



# UFBA

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
ESCOLA POLITÉCNICA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI

MESTRADO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL

DIEGO LIMA MEDEIROS

APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DAS MICROALGAS:  
UMA AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA



**SALVADOR**  
**2012**

**DIEGO LIMA MEDEIROS**

**APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DAS MICROALGAS: UMA AVALIAÇÃO  
DE CICLO DE VIDA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial (PEI) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), como requerimento final para a obtenção do título de Mestre.

Orientadores: Prof. Dr. Asher Kiperstok e Prof. Dr. Emerson Andrade Sales.

**SALVADOR - BAHIA**

**2012**

---

M488 Medeiros, Diego Lima

Aproveitamento energético das microalgas: uma avaliação de ciclo de vida / Diego Lima Medeiros. – Salvador, 2012.  
123 f. : il. color.

Orientador: Prof. Dr. Asher Kiperstok  
Co-orientador: Emerson Andrade Sales

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Bahia.  
Escola Politécnica, 2012.

1. Alga – Cultura e meios de cultura. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Biocombustíveis. 4. Gases estufa. I. Kiperstok, Asher. II. Sales, Emerson Andrade. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDD: 662

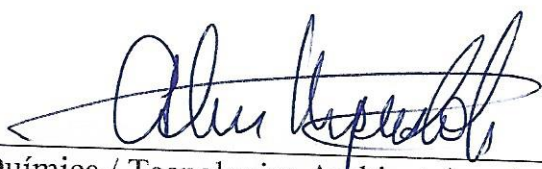
---


**“APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DAS MICROALGAS: UMA AVALIAÇÃO DE  
CICLO DE VIDA**

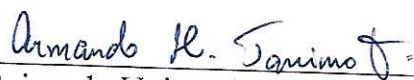
**Diego Lima Medeiros**


Dissertação submetida ao corpo docente do programa de pós-graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de mestre em Engenharia Industrial.

Examinada por:

Prof. Asher Kiperstok   
Doutor em Engenharia Química / Tecnologias Ambientais pela University of Manchester Institute of Science and Technology (1996);

Prof. Emerson Andrade Sales   
Doutor em Ciências / Engenharia Química pela Université Paris VII – Denis Diderot (1996);

Prof. Armando Hirohumi Tanimoto   
Doutor em Gestão e Políticas Ambientais pela Universidade de Brasília (2010);

Prof. José Adolfo de Almeida Neto   
Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade de Kassel (2006);

Prof. Sérgio Túlio Alves Cassini   
Doutor em Microbiologia Ambiental pela North Carolina State University (1988).

Salvador, BA - BRASIL  
Outubro/2012

*Dedico esse trabalho à busca prioritária pelo melhoramento do bem-estar na  
experiência de vida humana.*

## Agradecimentos

Primeiramente, eu gostaria de agradecer ao Criador pela oportunidade de viver esta experiência na Terra como ser humano, vendo o mundo além de suas fronteiras físicas e podendo ter acesso à força ilimitada de criação do universo. Em seguida, à minha família, principalmente aos meus pais, Jorge e Dulce, pelo apoio incondicional nesta trajetória. Gostaria de agradecer aos meus tios e às minhas tias, aos primos e às primas, aos avôs e às avós, aos amigos e às amigas por saber que estão sempre me apoiando (fisicamente, mentalmente ou espiritualmente) para o que der e vier desde quando eu seja Eu. Dentro da academia, em que nasceu o propósito deste trabalho, os meus agradecimentos vão para os meus orientadores, Asher, Emerson e Orlando, pelas frutíferas discussões e considerações. Eu acredito que cada um deles deu o melhor de si. Outros calorosos agradecimentos vão para os colegas de classe e de laboratório (LIPEI e TECLIM) pela troca diária de experiências e pelos momentos profanos. À secretaria do PEI, em especial, Taty e a do TECLIM, sobretudo, a Suzi. Aos novos amigos que fiz na UFBA, ao longo desta jornada, com destaque para: Gallotti, Ramon, Alan, Ronaldo, Dimas, Angelo, Rosinha, Inaura, Fabão, Leo, Carlos, Geiza, Tatiane, Darlan, Áurea, Ângela Lima, Sergio Oliva, Iracema, Jacson, Antonio, Danilo e, especialmente, para aqueles que me ajudaram nas correções finais dessa dissertação: Ângela Rocha, Adam Molinari, Luciano Sapucaia e Sheyla Paranaguá. Também agradeço ao grupo de pesquisa BIOMA da UESC, ao professor José Adolfo e a Henrique Maranduba, com quem tive uma interação valiosa. Gostaria de agradecer o apoio financeiro do governo brasileiro pelo fomento à pesquisa e desenvolvimento através das bolsas de pesquisa DTI do CNPq em parceria com o Ministério da Ciência e Tecnologia e da bolsa de mestrado da CAPES. Para finalizar, seguem os agradecimentos ao intercâmbio proporcionado pelo Ecoinvent (Banco de Dados Suíço para Inventários de Ciclo de Vida) e aos pesquisadores do EMPA (Laboratório Suíço de Ciência e Tecnologia dos Materiais) que acrescentaram nesta jornada uma experiência cultural transformadora e de grande valor à minha carreira e na minha vida como um todo.

*A poluição do planeta é apenas um reflexo  
externo de uma poluição interior psíquica  
gerada por milhões de indivíduos inconscientes  
sem a menor responsabilidade pelos espaços  
que trazem dentro de si.*

*(Eckhart Tolle em O Poder do Agora, 2002 p.80)*

## RESUMO

Esta dissertação tem como objetivos revisar o estado da arte referente à produção energética das microalgas, analisar Inventários de Ciclo de Vida (ICV) do cultivo de microalgas, investigar o potencial de aumento de escala da produção de biocombustíveis a partir das microalgas e avaliar a sua Razão Energética Líquida (REL) e emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Na análise do REL e GEE, foi escolhida a espécie *Nannochloropsis sp.* para a produção de energia térmica iniciando da sua biomassa, usando diferentes cenários de produção (com e sem o uso de fertilizantes) e comparando-os com algumas opções fósseis. A metodologia utilizada no estudo de caso foi baseada na norma ISO 14.040 e 14.044 de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV). Utilizou-se o software SimaPro 7.3™ de ACV e a base de dados Ecoinvent v2.2. Os resultados demonstraram que há muitos desafios e oportunidades na pesquisa e no desenvolvimento da produção energética usando as microalgas. A REL média dos cenários de microalgas demonstrou ser desfavorável, mas com grandes oportunidades de melhoria. Observou-se também que a REL dos não desempenhou de maneira favorável. Quanto às emissões de GEE, há uma proximidade entre os resultados das microalgas e os dos fósseis, porém as microalgas detêm um maior potencial de redução.

Palavras-chave: Microalgas, ACV, Aumento de Escala, Energia térmica, Razão de Energia Líquida, Gases Efeito Estufa.



## **ABSTRACT**

This dissertation aimed to review the state of the art related to energy production from microalgae, to analyze Life Cycle Inventory (LCI) of microalgae cultivation processes, to investigate the scaling-up potential of microalgae biofuel production and to evaluate the Net Energy Ratio (NER) and Greenhouse Gases emissions (GHG). The NER and GHG analysis were from *Nannochloropsis sp.* for thermal energy production in different production scenarios. The results from microalgae were compared with some fossil options. The methodology used in the case study was based on ISO 14040 and 14044 for Life Cycle Assessment (LCA). It was used the LCA software SimaPro 7.3 and the inventory database Ecoinvent v2.2. The results showed that there are several challenges and opportunities in research and development for microalgae energy production. The average NER of microalgae showed unfavorable scenarios, despite the great opportunities for improvements. It was observed that the fossils' NER also played unfavorable. Regarding GHG emissions there is proximity between the results of microalgae and fossil sources, although microalgae hold the greatest potential for reduction.

Key-words: Microalgae, LCA, scaling-up, thermal energy, Net Energy Ratio and Greenhouse Gases.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Demanda mundial total de energia primária entre 1971 e 2010, em Mtoe (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo) .....	19
Figura 2 - Frações da demanda energética primária em 2010.....	20
Figura 3 – Distribuição percentual da produção de derivados de petróleo energéticos em relação ao ano de 2009 .....	20
Figura 4 – Repartição da oferta interna de energia .....	21
Figura 5 – Consumo final de energia por fonte no Brasil .....	22
Figura 6 – Estrutura do Consumo Energético no Setor Transportes do Brasil ...	23
Figura 7 – Matérias-primas utilizadas na produção mensal de biodiesel (B100) em 2009.....	27
Figura 8 - Tecnologias mais usadas na cadeia de produção de biocombustíveis de microalgas, incluindo as etapas de Cultivo, Colheita, Extração, Conversão, Produto final.....	35
Figura 9 – Sistemas de colheita .....	44
Figura 10 – Secador Solar.....	45
Figura 11 – Extração de óleo das microalgas pelo solvente DME .....	48
Figura 12 – Fraturamento Quântico.....	49
Figura 13 - Live Extraction.....	50
Figura 14 – Ciclo fechado da cadeia de microalgas.....	63
Figura 15 – Tecnologia Algae Screen.....	67
Figura 16 – Rota tecnológica considerada no estudo para produção de energia térmica a partir de microalgas .....	83
Figura 17 – Desenho esquemático do método do cone invertido .....	85
Figura 18 - Cadeia de produção de energia térmica a partir da biomassa de microalgas.....	88
Figura 19 – Balanço Energético da produção de 20 MJ (PCI) da <i>Nannochloropsis sp.</i> nos cenários LA1, LA2, LA3 e LA4 e das opções fósseis .....	94

Figura 20 - Emissões de GEE das rotas LA1, LA2, FPP1, FPP2 e de algumas fontes fósseis referente a produção de 20 MJ (PCI) de energia térmica na termelétrica .....	95
Figura 21 – Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário LA1 .....	96
Figura 22 – Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário LA2 .....	97
Figura 23 - Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário FPP1 .....	98
Figura 24 - Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário FPP2.....	99
Figura 25 - Cadeia de processos em função das emissões de GEE da produção de energia térmica a partir do Gás natural.....	100

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição bioquímica das algas expressa numa base de % do peso seco .....	29
Tabela 2 - Conteúdo de óleo de algumas microalgas expressa em % do peso seco .....	30
Tabela 3 - Massa molar e valor energético líquido das frações da biomassa.....	31
Tabela 4 - Comparação entre algumas matérias primas oleaginosas para a produção de biodiesel.....	32
Tabela 5 - Comparação entre algumas fontes vegetais oleaginosas para a produção de biodiesel.....	33
Tabela 6 – Inventários da etapa de cultivo de microalgas em LA por kilograma de biomassa seca.....	53
Tabela 7 - Inventários da etapa de cultivo de microalgas em FBR por kilograma de biomassa seca.....	56
Tabela 8 - Comparativo entre a REL de diferentes rotas de aproveitamento energético de microalgas.....	77
Tabela 9 - Inventário das rotas de produção por kilograma de biomassa da <i>Nannochloropsis sp.</i> a partir do cultivo em Lagoas Abertas (LA) e Fotobiorreatores de Placa Plana (FPP).....	92

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais métodos de extração de lipídeos de microalgas.....	46
Quadro 2 – Empresas biotecnológicas na cadeia de microalgas .....	62
Quadro 3 – Desafios para a implementação da produção de biocombustíveis de microalgas em larga escala .....	68
Quadro 4 - Comparação de resultados de balanço energético de biocombustíveis de microalgas numa perspectiva de ciclo de vida .....	77

## GLOSSÁRIO

CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CO <sub>2</sub> e	Dioxide de carbon equivalente, indicador ambiental na categoria de Gases de Efeito Estufa
REL	Razão de Energia Líquida (NER)
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
AIE	Agência Internacional de Energia
FBR	Fotobiorreatores
LA	Lagos ou lagoas abertas
FPP	Fotobiorreatores de Placas Planas
CRIEPI	Central Research Institute of Electric Power Industry
DME	Dimetil éter
NREL	Laboratório Nacional de Energias Renováveis dos EUA
GREET	Argonne National Laboratory GREET model
Microalga	Um tipo de alga unicelular
MPa	Mega Pascal
°C	Graus Celcius
pH	Potencial hidrogeniônico
NO <sub>x</sub>	Óxidos de nitrogênio
SO <sub>x</sub>	Óxidos de enxofre
ha	Hectare
gal	Galão

## SUMÁRIO

### INTRODUÇÃO

1. ENERGIA QUE MOVE O MUNDO .....	19
1.1. Consumo de diesel no setor de transportes.....	22
1.2. Riscos relacionados aos combustíveis fósseis .....	23
1.3. Biocombustíveis .....	25
1.4. Matérias-primas para produção de biodiesel .....	26
2. COMBUSTÍVEIS DE MICROALGAS E AS TECNOLOGIAS ENVOLVIDAS NA SUA PRODUÇÃO .....	29
2.1. Espécies e composição das microalgas.....	29
2.2. Peculiaridades e potencialidades das microalgas.....	31
2.3. Combustíveis de algas .....	34
2.4. Tecnologias usadas na produção de biodiesel de microalgas: do cultivo até a produção do combustível .....	36
2.4.1. Cultivo.....	36
2.4.2. Luz.....	38
2.4.3. Nutrientes .....	39
2.4.4. Água no meio de cultivo .....	42
2.4.5. Colheita e Secagem.....	43
2.4.6. Extração do óleo .....	45
2.4.7. Produção de biodiesel.....	51
2.5. Avaliação comparativa entre inventários na etapa de cultivo de microalgas.....	52
2.6. Economia na produção do biodiesel de microalgas.....	59
2.7. Viabilidade, desafios e oportunidades.....	64
2.8. Desafios para a produção de biocombustíveis de microalgas .....	67

3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV).....	69
3.1. Etapas da ACV.....	69
3.1.1. Objetivo e Escopo.....	70
3.1.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV).....	70
3.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV).....	72
3.1.4. Interpretação do Ciclo de Vida.....	72
3.2. ACV da produção energética a partir das microalgas.....	72
4. METODOLOGIA.....	79
4.1. Objetivo e Escopo.....	81
4.1.1. Unidade funcional.....	81
4.1.2. Sistemas de produção e fases do ciclo de vida.....	82
4.1.3. Definições, suposições e limitações.....	84
4.1.4. Método de avaliação de impacto.....	85
4.2. Inventário.....	86
4.2.1. Representatividade Tecnológica.....	87
4.3. Comparação com o potencial energético de algumas opções fósseis.....	91
5. RESULTADOS.....	92
5.1. Análise de Inventário.....	92
5.2. Balanço Energético.....	93
5.3. Emissões de GEE.....	95
6. DISCUSSÃO.....	101
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES.....	108

## INTRODUÇÃO

As questões ambientais colocam na agenda política de várias nações a necessidade de desenvolver fontes alternativas de energia que sejam capazes de reduzir a emissão de gases poluentes na atmosfera (MELLO *et al.*, 2007). De acordo com o portal Instituto Carbono Brasil (2012), vários países do globo estão se mobilizando para minimizar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) a partir de mecanismos políticos e econômicos.

A crescente demanda energética, juntamente com a grande dependência mundial de combustíveis fósseis, vem trazendo sérias complicações ambientais e insegurança quanto à finitude destes recursos. Por serem renováveis, os biocombustíveis são considerados como uma alternativa para essas emissões (UNICEF, 2009).

A diminuição das reservas de petróleo, a significativa dependência de importações e a urgência em se manter o equilíbrio ambiental, vêm fazendo com que governos e empresas privadas invistam, cada vez mais, na pesquisa e no desenvolvimento de combustíveis alternativos, menos poluentes e renováveis, como o biodiesel e o álcool (MENDONÇA, 2007).

A União Europeia já definiu alguns pré-requisitos para a aceitação dos biocombustíveis. Eles (Pode ser substituído por Eles para evitar a repetição?) terão que reduzir pelo menos 35% dos GEEs em relação ao concorrente de origem fóssil para poderem ser comercializados no continente (MITTELBAACH, 2009).

Pelo fato do diesel ser o combustível líquido mais consumido mundialmente, o biodiesel aparece como a grande alternativa e com o maior mercado potencial. O biodiesel, como um sucedâneo do óleo diesel, tem seu mercado potencial determinado pelo consumo nacional dos derivados de petróleo, do qual o óleo diesel representa 49,9 %, segundo as estatísticas de vendas de derivados de petróleo no Brasil elaboradas pela ANP para o ano de 2006 (SEBRAE, 2007).



Segundo a ANP (2009), a produção e o uso do biodiesel no Brasil propiciam o desenvolvimento de uma fonte energética sustentável sob os aspectos ambiental, econômico e social e também trazem a perspectiva da redução das importações de óleo diesel.

As microalgas são vistas como uma fonte energética que poderia suprir toda a demanda dos combustíveis fósseis, sem comprometer a produção de alimento (pela competição por grandes áreas ou solos férteis) e sem pressionar o desmatamento das florestas (CHISTI, 2007).

Contudo, há uma grande polêmica associada aos biocombustíveis. Estudos concluíram que alguns deles são mais poluidores do que os combustíveis fósseis (CRUTZEN *et al.*, 2008). Para saber qual o nível de impacto de um produto, é importante avaliá-lo de forma mais ampla, ou seja, não se restringindo apenas ao seu local de produção. Isso por que muitos impactos, geralmente, são causados em outros locais. Também para as novas tecnologias é essencial se fazer uma análise prévia, a fim de que os potenciais impactos sejam detectados antes do seu nascimento.

Algumas avaliações realizadas constataram que nem todos os biocombustíveis de fato minimizam as emissões de GEE. As afirmações relacionadas ao desempenho ambiental dos biocombustíveis em relação aos combustíveis fósseis são contraditórias, como por exemplo:

- Por ser biodegradável, não tóxico e praticamente, livre de enxofre e aromáticos, é considerado um combustível ecológico (BIODIESELBR, 2009). 1 kg de biodiesel é responsável pela retirada de 3 kg de CO<sub>2</sub> da atmosfera, por isso, o uso do biodiesel resulta em uma redução de 65% a 90% de CO<sub>2</sub> comparado ao diesel convencional (EBB, 2009).
- O biodiesel, apesar de ser renovável, não está livre de ser poluente. Estudos já relataram que os biocombustíveis emitiam mais GEE que diesel fóssil, o que colocaria todo o esforço mundial em usar combustíveis renováveis a perder (CRUTZEN *et al.*, 2008).
- Apenas 13 de 26 combustíveis investigados reduzem os GEE significativamente, ou seja, em mais de 50%. Cinco deles eram provenientes de resíduos (ZAH *et al.*, 2007).

Em vista disso, fazem-se necessárias novas avaliações para enriquecer a discussão sobre as condições em que os biocombustíveis são mais poluidores do que os combustíveis fósseis, pois o fato de serem derivados da biomassa não os isenta de provocarem impactos ambientais.

O uso de microalgas para a produção de biocombustíveis está em fase de pesquisa e desenvolvimento por vários grupos no mundo. Existem diversas espécies e métodos para cultivar e processar as algas até a sua conversão em uma forma de biocombustível.

As microalgas são vistas como uma promessa para a produção de biocombustíveis (LIU *et al.*, 2009; CLARENS *et al.*, 2011). A biomassa de microalgas pode ser utilizada na produção de vários biocombustíveis, tais como: biodiesel, bioetanol, biogás, biohidrogênio e gás de síntese. A biomassa de microalga residual (também conhecida como torta), gerada após a extração dos lipídeos para produção de biodiesel, pode ser usada apropriadamente para a produção de bioetanol ou biometano (SINGH e OLSEN, 2011). A torta de microalgas também é usada como matéria-prima na produção de ração animal ou fertilizantes, após sua biodigestão (HENRIKSON, 2012).

Falta consenso sobre a viabilidade econômica dos combustíveis de microalga no curto prazo, devido à especulações e incertezas no escalonamento do processo associado com o estágio nascente da indústria de biocombustíveis de microalgas (DAVIS, ADEN e PIENKOS, 2011). De acordo com Chisti e Yan (2011), em termos de Avaliação do Ciclo de Vida, os combustíveis de microalgas podem ser melhores que os fósseis, mas não existem respostas definitivas nesse campo emergente.

Esta dissertação foi dividida basicamente em três partes. Na primeira, é feita uma análise crítica da bibliografia revisada sobre o tema. Na segunda, são analisados os inventários de cultivo de microalgas, a fim de verificar a discrepância entre eles e definir aqueles para o estudo de caso. Na terceira, faz-se uma avaliação energética e de gases efeito estufa da produção de biomassa a partir da espécie de microalga *Nannochloropsis sp.*, comparando com algumas opções de produção de energia a partir de fontes fósseis.

## OBJETIVOS

### GERAL

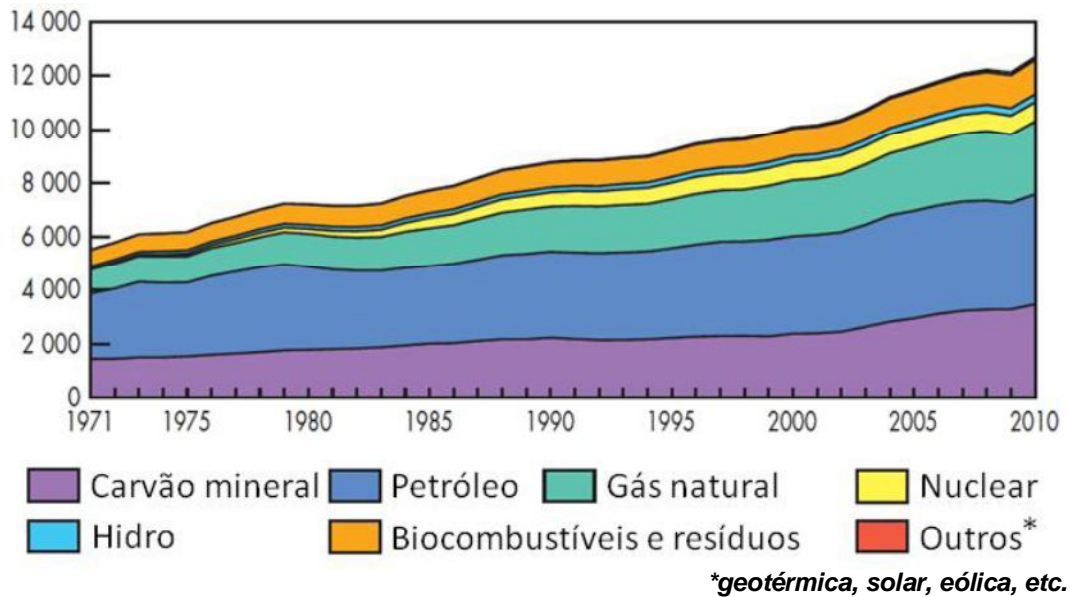
- Avaliação energética e das emissões de gases efeito estufa no aumento de escala de processos de aproveitamento energético de microalgas.

### ESPECÍFICOS

- Avaliar o potencial aumento de escala das microalgas para a produção de biocombustíveis
- Comparar processos de cultivo de biomassa de microalgas
- Realizar uma Análise do Ciclo de Vida aplicada ao balanço energético e a emissão de gases de efeito estufa da produção de biomassa a partir da *Nannochloropsis sp.*
- Comparar as emissões de gases efeito estufa da produção de energia térmica a partir da biomassa da microalga *Nannochloropsis sp.* com diversas opções de produção de energia de fontes fósseis.

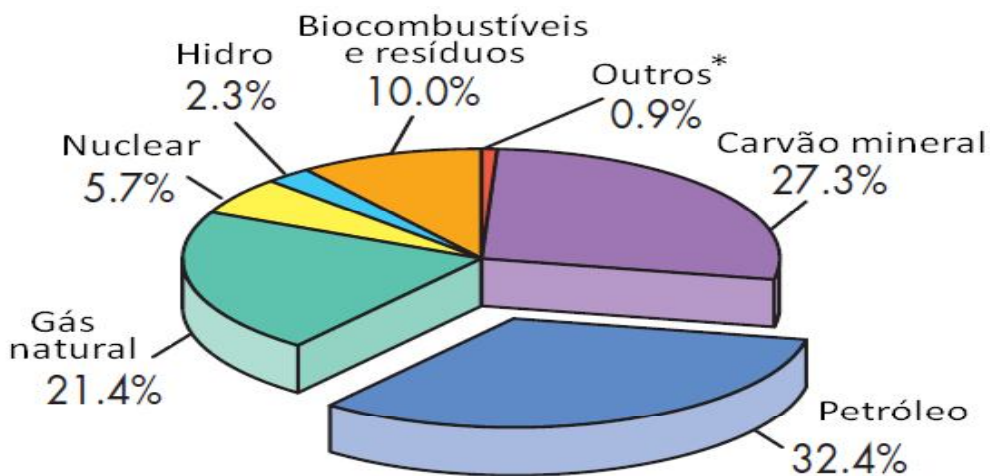
## 1. ENERGIA QUE MOVE O MUNDO

A economia mundial depende fundamentalmente dos recursos energéticos para o seu crescimento. De 1970 a 2010, a demanda energética mundial praticamente dobrou, Figura 1.



**Figura 1 - Demanda mundial total de energia primária entre 1971 e 2010, em Mtoe (Milhões de toneladas equivalentes de petróleo).**  
**Fonte: IEA, 2012.**

Está posto um grande desafio, caso haja uma mudança da matriz energética mundial predominantemente fóssil para fontes renováveis. A Agência Internacional de Energia (AIE) aponta para uma tendência de crescimento na demanda energética de aproximadamente 15% por década até 2035 (EIA, 2010). O petróleo, o carvão mineral e o gás natural, juntos, totalizam 81,1% da demanda energética mundial, Figura 2.

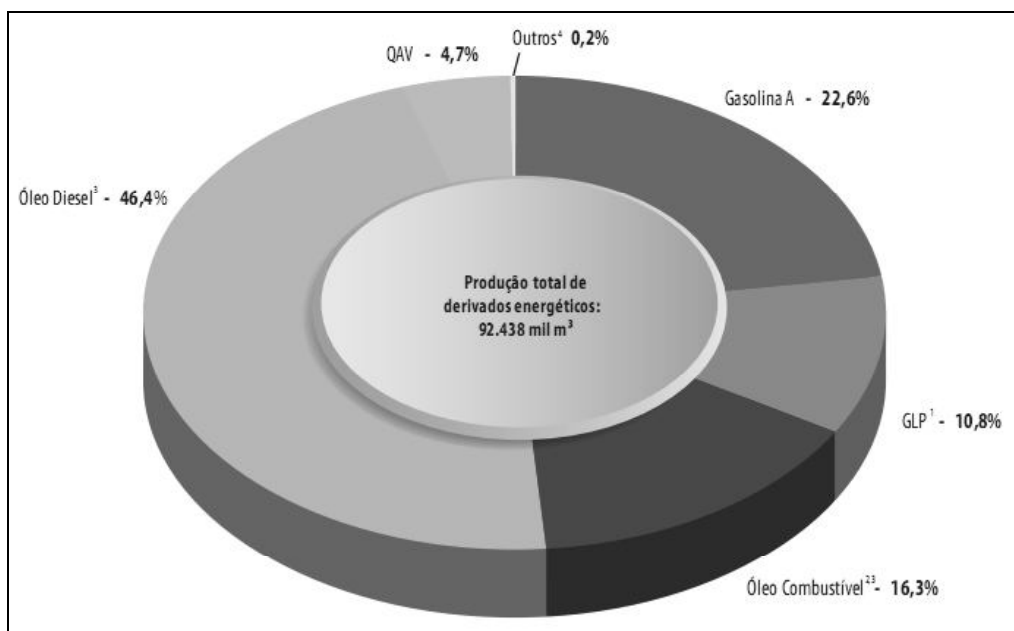


\*geotérmica, solar, eólica, etc.

**Figura 2 - Frações da demanda energética primária em 2010.**

Fonte: IEA, 2012.

O petróleo representa a maior participação dentre os fósseis, 32,4%. Geralmente, a maior fração do petróleo refinado é óleo diesel, constatando o grande mercado desse combustível no mundo, Figura 3.



**Figura 3 – Distribuição percentual da produção de derivados de petróleo energéticos em relação ao ano de 2009.**

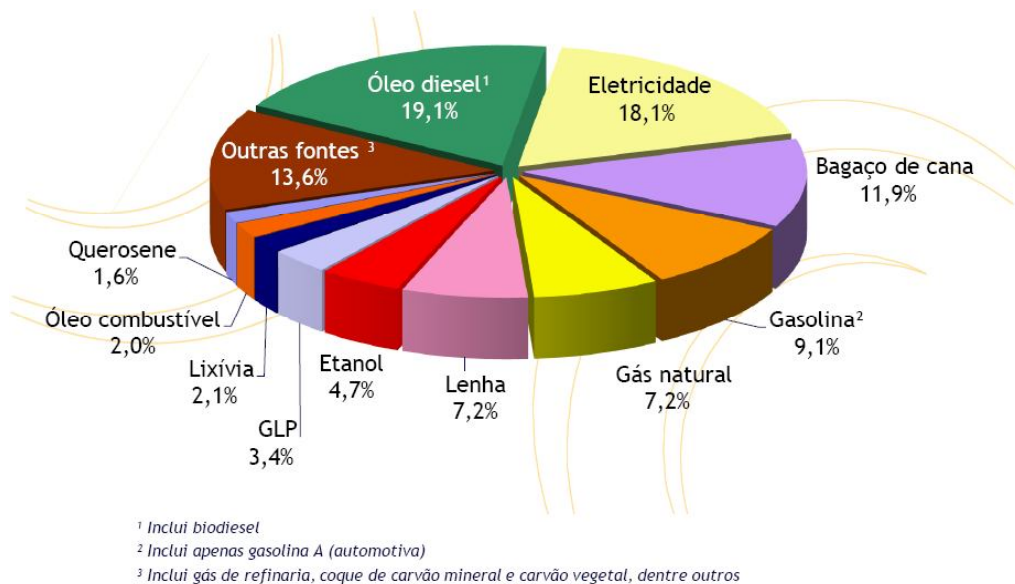
Fonte: ANP, 2010 p.105.

A realidade brasileira é atípica frente ao quadro energético mundial. A matriz energética primária do Brasil possui uma parcela maior de fontes renováveis em relação às de origem fóssil, Figura 4.



**Figura 4 – Repartição da oferta interna de energia.**  
Fonte: BEN 2012, p.16.

Apesar do baixo uso do óleo diesel no transporte rodoviário urbano, o transporte de cargas rodoviário e as atividades agrícolas contribuem fortemente no consumo dessa fonte. Na eletricidade, 81% são provenientes de hidroelétricas. O bagaço de cana junto com o etanol contribuem significativamente no suprimento energético nacional, Figura 5.



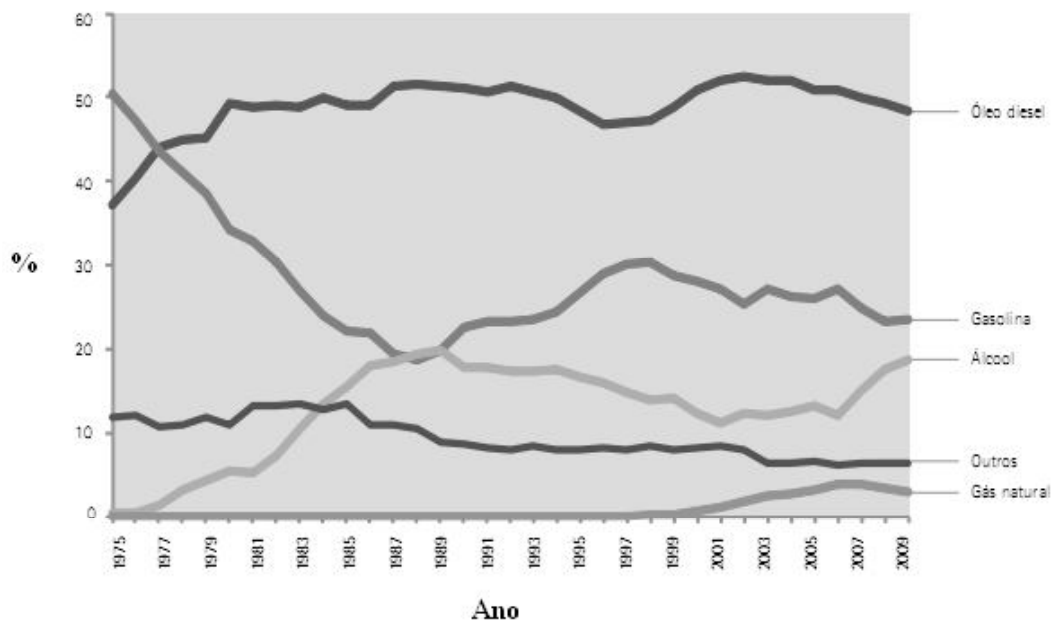
**Figura 5 – Consumo final de energia por fonte no Brasil.**  
**Fonte: BEN 2012, p.16.**

De acordo com as estatísticas do BEN (2012), o crescimento econômico brasileiro está favorecendo o aumento da sua demanda energética e eletrificação da sua matriz (aumento da parcela de eletricidade na demanda total de energia do país), seguindo a tendência dos países desenvolvidos.

### 1.1. Consumo de diesel no setor de transportes

O setor de transportes representa 28,3% do consumo energético total do país (BEN, 2010). Segundo Mendonça (2007, p.12), o óleo diesel é um combustível com alta demanda para o suprimento de diversas atividades de produção, pois a engenharia a diesel domina o transporte comercial e de maquinário agrícola com fácil operação e eficiência.

A Figura 6 mostra a parcela do consumo dos combustíveis no setor de transportes brasileiro de 1975 a 2009.



**Figura 6 – Estrutura do Consumo Energético no Setor Transportes do Brasil.**  
**Fonte: BEN, 2010 p. 74.**

O óleo diesel predomina o consumo energético no setor de transportes brasileiro com uma participação média de aproximadamente 50%.

### 1.2. Riscos relacionados aos combustíveis fósseis

A geração de riqueza no mundo está assentada sobre um padrão industrial intensivo em energia, sendo o petróleo a principal fonte. A demanda de energia no mundo sinaliza um aumento de 1,7% ao ano, entre 2000 e 2030 (PNA, 2006). No entanto, as reservas mundiais comprovadas de petróleo somam 1,137 trilhão de barris, 78% dos quais no subsolo dos países da Organização dos Países Exportadores de Petróleo (OPEP). Este volume permite suprir a demanda mundial por cerca de 40 anos, mantido o atual nível de consumo (RATHMANN, 2005; MELLO, PAULILLO e VIAN, 2007).

É evidente que tanto as reservas fósseis quanto o consumo aumentarão nos próximos anos. Mas, se prevê que as reservas crescerão menos ao longo desse período, ou seja, os cenários futuros apontam para a possível finitude



das reservas de petróleo (PNA, 2006; RATHMANN, 2005). Sendo assim, fica clara a necessidade de soluções alternativas para a substituição dessa fonte de combustíveis por uma renovável e que tenha o potencial de produção para substituir os combustíveis fósseis na escala que eles se encontram.

A concentração de petróleo explorado atualmente em áreas geográficas de conflito impacta no preço e na regularidade de fornecimento do produto. As novas jazidas em prospecção estão situadas geograficamente em áreas de elevado custo para a sua extração (SEBRAE, 2007).

Na questão dos combustíveis fósseis, outro aspecto que vem ganhando força são os impactos ambientais relacionados com as mudanças climáticas. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, em inglês), o dióxido de carbono proveniente da queima de combustíveis fósseis é o principal causador desse impacto (IPCC, 2007).

A Agência Internacional de Energia (AIE) estima que sejam necessários investir US\$ 10,5 trilhões entre 2010 e 2030 (ou US\$ 500 bilhões/ano) para estabilizar a concentração de GEE na atmosfera em 450 partes por milhão e evitar uma elevação maior que 2°C em relação à era pré-industrial. Portanto, a mudança na matriz energética será crucial para essa atenuação (SHEIDT, 2009).

A boa situação do Brasil tanto na sua matriz limpa quanto na sua abundância em recursos naturais como terra cultivável, água e muita insolação o torna estrategicamente mais favorável ao desenvolvimento e uso de tecnologias mais limpas.

Encontrar fontes limpas e renováveis de energia é classificado como um dos problemas mais desafiadores da humanidade no médio e longo prazo. Um objetivo importante é tomar medidas para a redução das emissões de transporte tais como a substituição gradual dos combustíveis fósseis por fontes de energias renováveis. Os biocombustíveis são vistos como contribuintes reais para alcançar esses objetivos, especialmente no curto prazo (MATA *et al.*, 2010).

Uma alternativa que apresenta crescente interesse é a utilização de combustíveis obtidos da agricultura, tais como: o etanol e o biodiesel (RATHMANN, 2005).

### **1.3. Biocombustíveis**

Os biocombustíveis são classificados em primeira, segunda e terceira geração, a depender do tipo de matéria-prima e processamento utilizado na sua produção. Os biocombustíveis de primeira geração são aqueles que já existiam, produzidos a partir das culturas tradicionais, como: cana-de-açúcar, mamona, beterraba, milho e canola. Os de segunda geração são aqueles de culturas não alimentares, que ainda estão em escala piloto ou em fase implementação, os derivados da agricultura lignocelulósica (resíduos florestais), biopetróleo e gaseificação de biomassa (ex. biobutano, biometano). Os de terceira geração são aqueles que ainda estão em estágio de pesquisa, por exemplo: biocombustíveis a partir de microalgas e biohidrogênio (BRENNAN, 2009; MITTELBAACH, 2009).

Segundo Mello, Paulillo e Vian (2007) o Brasil é considerado um dos países mais propícios para a exploração e expansão da biomassa para fins energéticos. Ele tem condições de liderar a produção mundial de biodiesel, possibilitando a substituição de 60% da demanda mundial de óleo diesel mineral. Em 2004, foi criado, pelo Governo Federal, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), como ação estratégica e prioritária para o Brasil. As principais diretrizes do programa são (MDA, 2011):

- Implantar um programa sustentável, promovendo inclusão social;
- Garantir preços competitivos, qualidade e suprimento;
- Produzir o biodiesel a partir de diferentes fontes oleaginosas, fortalecendo as potencialidades regionais para a produção de matéria-prima.

A Lei nº 11.097, de 13 de janeiro de 2005, dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira. Para Mello, Paulillo e Vian (2007), o mercado do biodiesel vem crescendo consideravelmente nos últimos anos, em função das preocupações de vários países com o meio ambiente e a intenção de reduzir a dependência do petróleo importado.

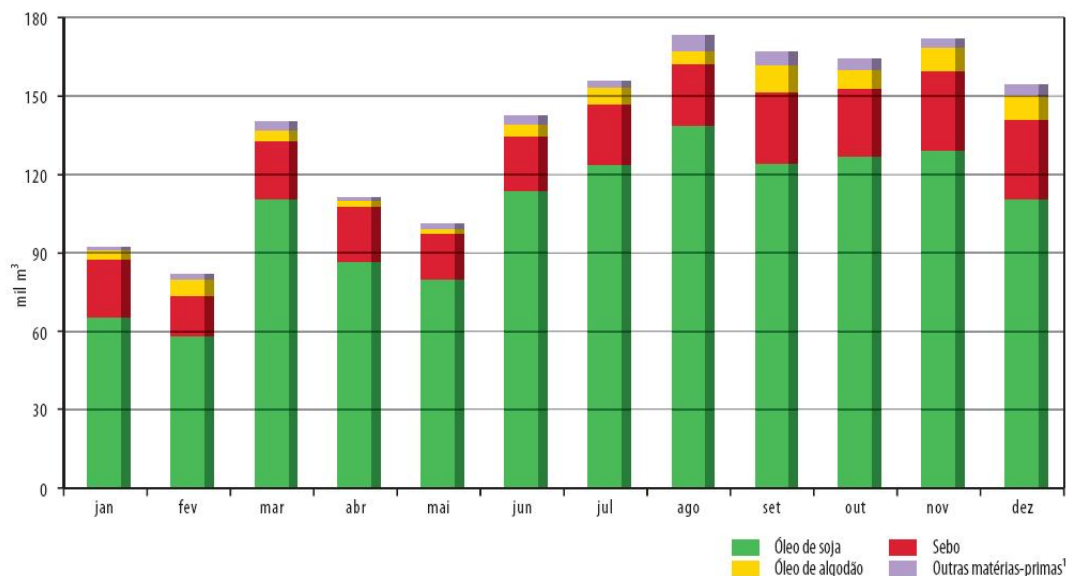
De acordo com o estudo denominado Biodiesel 2020 (2008), o mercado global do biodiesel segue firme para um crescimento explosivo nos próximos dez anos. É esperado que o Brasil ultrapasse a produção de biodiesel dos EUA e da Europa no ano de 2015.

Segundo Salum (2011), uma das plataformas de pesquisa previstas no Plano Nacional de Agroenergia (PNA) 2006 – 2011 é a plataforma do biodiesel. Tendo em vista que cerca de 46% da matriz de combustíveis veiculares nacional é composta por diesel, o biodiesel aparece nesse cenário como um combustível promissor, já que suas propriedades físicas e químicas são similares ao diesel convencional, permitindo o seu uso em misturas com o diesel em qualquer motor a diesel sem a necessidade de modificações no sistema de ignição ou no injetor de combustível.

#### **1.4. Matérias-primas para produção de biodiesel**

O Brasil é um país que por sua extensa área geográfica e clima, tropical e subtropical, favorece o cultivo de uma ampla diversidade de matérias-primas para a produção de biodiesel. Destacam-se, dentre as principais matérias-primas para o biodiesel, as oleaginosas: algodão, amendoim, dendê, girassol, mamona, pinhão manso e soja. São também consideradas matérias-primas para biocombustíveis os óleos de descarte, gorduras animais e óleos já utilizados em frituras de alimentos (SEBRAE, 2007).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) publicou no seu Anuário Estatístico Brasileiro as principais matérias-primas utilizadas na produção de biodiesel no ano de 2009 (ANP, 2010).



**Figura 7 – Matérias-primas utilizadas na produção mensal de biodiesel (B100) em 2009.**

Fonte: ANP 2010, p. 182.

De acordo com a Figura 7, a principal matéria-prima consumida no Brasil para a produção de biodiesel é a soja, com uma participação média de 80%, depois o sebo bovino em torno de 10 a 15%, o óleo de algodão e outras matérias-primas oleaginosas compostas por óleos de mamona, palma, amendoim, girassol, nabo forrageiro e óleos e gorduras residuais em torno de 5 a 10%.

Segundo Aranda *apud* UDOP (2009), a soja foi importante na implantação e rápida consolidação do Programa Nacional de Produção do Biodiesel (PNPB). Por outro lado, o PNPB não pode ficar dependente apenas da soja. A matriz brasileira do biodiesel tem que ser mais diversificada.

Outro fato que reforça a necessidade de diversificação da matriz brasileira de biodiesel é devido às misturas entre diferentes biodieseis, que mostrou ser mais uma opção para aumentar a estabilidade oxidativa, aumentando o período de armazenamento do combustível e diminuindo a demanda por aditivos (SANTOS, 2009).

A produção de energias renováveis tem sido fortemente debatida em nível mundial, uma vez que é entendido de forma crescente que os

biocombustíveis de primeira geração, produzidos, especialmente, a partir de sementes de culturas alimentares, estão limitados na sua capacidade de alcançar metas de produção de biocombustíveis, mitigação da mudança climática e crescimento econômico. Estas preocupações têm aumentado o interesse no desenvolvimento de outras matérias-primas para biodiesel (MATA *et al.*, 2010).

Existem fortes críticas contra os biocombustíveis de primeira geração, devido a supostos indícios de eles pressionarem o mercado de alimentos, contribuírem com a escassez de água e acelerarem a destruição das florestas. Os biocombustíveis de segunda geração resolvem alguns dos problemas acima, embora haja uma preocupação na competição do uso da terra ou a necessidade de modificação do solo. Portanto, baseado em atuais projeções de conhecimento e tecnologia, os de terceira geração, especificamente, derivados de microalgas são considerados recursos energéticos alternativos, tecnicamente viáveis e desprovidos de inconvenientes associados com os de primeira e segunda gerações (BRENNAN e OWENDE, 2009).

Para avaliar a sustentabilidade ambiental de um combustível, é preciso analisá-lo de forma sistêmica. Nesse tipo de avaliação, deve-se pensar não apenas nos impactos provocados na queima do combustível, todavia em todo o seu ciclo de vida, que abrange desde os impactos gerados na produção da sua matéria-prima, no transporte, no processamento até o seu uso final.

A Avaliação do Ciclo de Vida pode direcionar as pesquisas para buscar alternativas tecnológicas mais ecológicas na cadeia de produção e incentivar políticas de subsídio para as tecnologias mais limpas.

## 2. COMBUSTÍVEIS DE MICROALGAS E AS TECNOLOGIAS ENVOLVIDAS NA SUA PRODUÇÃO

Uma pequena fração da energia da luz solar que banha a Terra é capturada pela fotossíntese e move a maioria dos sistemas vivos. A vida na Terra é baseada em carbono e a energia usada para fixar o dióxido de carbono atmosférico em material biológico (biomassa) é proveniente do sol. De fato, os combustíveis fósseis que a humanidade consome hoje são um legado, na sua maior parte, da fotossíntese. As microalgas podem ser pensadas como plantas marinhas ou de água doce detentoras de maior eficiência na fotossíntese que as plantas terrestres, utilizando água, dióxido de carbono, luz solar e nutrientes para, a partir da fotossíntese, obterem a energia necessária ao seu desenvolvimento e a sua reprodução. Elas são formadas basicamente de três grupos moleculares, que são: os carboidratos, as proteínas, os lipídeos e, em menor quantidade, os ácidos nucleicos (PACKER, 2009).

### 2.1. Espécies e composição das microalgas

Cada espécie de microalga possui diferentes conteúdos de proteína, carboidratos e lipídeos. As Tabela 1 e Tabela 2 apresentam diferentes proporções da composição bioquímica de algumas espécies de microalgas.

**Tabela 1 - Composição bioquímica das algas expressa numa base de % do peso seco.**

Espécie	Proteína	Carboidratos	Lipídeo	Ácido Nucleico
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8-18	21-52	16-40	-
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22	4-5
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6	-
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8-14	4-9	2-5
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20	-
<i>Prymnesium parvum</i>	28-45	25-33	22-39	1-2

**Fonte: Adaptado de Becker 1994 apud UM et al., 2009.**

Muitos estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) de microalgas utilizam a espécie *Chlorella vulgaris*. De acordo com Lardon et al. (2009), a

*C. vulgaris* foi estudada significativamente e estimativas quantitativas de sua composição e produtividades estão disponíveis.

Na Tabela 2, Chisti (2007) afirma: teores de lipídeos entre 20-50% são completamente comuns para algumas microalgas. Para o gênero *Chlorella sp.*, a Tabela 2 apresenta teores de lipídeos superiores aos apresentados na Tabela 1. Essa variação pode ser justificada por diferenças entre métodos de análise laboratorial, uso de diferentes métodos de cultivo ou diferentes ambientes nos quais cada estudo coletou suas amostras de microalgas. Vale ressaltar que, a depender do produto final desejado, que refletirá no tipo de método de cultivo, as microalgas produzirão uma biomassa em quantidades e qualidades diferenciadas.

**Tabela 2 - Conteúdo de óleo de algumas microalgas expressa em % do peso seco.**

Espécie	Lipídeos
<i>Botryococcus braunii</i>	25-75
<i>Chlorella sp.</i>	28-32
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis sp.</i>	25-33
<i>Nannochloris sp.</i>	20-35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31-68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35-54
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20-30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50-77

Fonte: CHISTI, 2007.

A produtividade de óleo, massa de óleo produzida por volume de meio de cultivo de microalgas, depende da taxa de crescimento da alga e do conteúdo de óleo da biomassa. Nem todos os lipídeos das microalgas são satisfatórios para se produzir biodiesel, mas é comum encontrar óleos adequados (CHISTI, 2007). Baseado na Tabela 3, é possível estimar as necessidades de nitrogênio e o valor calorífico do óleo e da biomassa restante (torta) de acordo com a composição da microalga (LARDON *et al.*, 2009).

**Tabela 3 - Massa molar e valor energético líquido das frações da biomassa.**

Fração	Valor calorífico líquido (MJ/kg)
Proteína $C_{4.43}H_7O_{1.44}N_{1.16}$	15.5
Carboidrato $C_6H_{12}O_6$	13
Lipídeo $C_{40}H_{74}O_5$	38.3

Fonte: Adaptado de LARDON *et al.*, 2009.

É fundamental ressaltar que o desempenho e a eficiência das várias etapas no processo dependem, entre outros fatores, da composição química das microalgas (LARDON *et al.*, 2009).

## 2.2. Peculiaridades e potencialidades das microalgas

Devido às microalgas crescerem de 50 a 100 vezes mais rápido em relação às culturas alimentares, os biocombustíveis produzidos de algas têm o potencial de se tornar uma solução energética alternativa de escala, a qual poderia um dia substituir os combustíveis fósseis. Uma desvantagem dos agro-biocombustíveis relacionada com as algas é eles requerem solo de boa qualidade para agricultura, o qual aumenta a demanda por terras agricultáveis (RAUSEN, 2009; UNICEF 2009).

As microalgas podem ser cultivadas em águas de várias qualidades (ex. águas não potáveis, efluentes, águas salinas) e em áreas não cultiváveis, dessa forma, elas não competem com a produção de alimentos ou com terras agricultáveis (CLARENS *et al.*, 2010).

Ao não competir com terras férteis ou com a abertura de novas áreas as microalgas também não contribuiriam com a redução da perda de biodiversidade. Elas também podem ser usadas para o controle de poluição: em particular com o sequestro biológico das emissões de  $CO_2$  e outros gases de efeito estufa e no tratamento de águas residuais (MATA *et al.*, 2010).



Segundo Um *et al.* (2009) algumas espécies de microalgas possuem muitos atributos desejáveis como produtoras de energia:

- Elas são a fonte não alimentar para combustível mais promissor;
- Elas possuem uma estrutura celular simples;
- Composição com potencial de altas taxas de lipídeos, 40-80% da massa seca;
- Rápida taxa de reprodução;
- Elas podem crescer em condições ambientais e climáticas severas;
- Elas podem crescer em dióxido de carbono provenientes da combustão de gás e carvão em usinas elétricas;
- Biocombustível de algas não contém enxofre, não é tóxico e é altamente biodegradável.

Embora a tecnologia de produção de biocombustíveis a partir das microalgas ainda enfrente vários obstáculos de P&D antes de se tornar exequível em larga escala, fica claro que a limitação não da carência de recursos naturais.

**Tabela 4 - Comparação entre algumas matérias primas oleaginosas para a produção de biodiesel.**

<b>Cultura</b>	<b>Rendimento de óleo (l/ha.ano)</b>
Milho	172
Soja	446
Canola	1190
Pinhão manso	1892
Coco	2689
Dendê	5950
Microalga	58700

**Fonte: Adaptado de CHISTI, 2007.**

As microalgas podem fornecer uma série de diferentes tipos de biocombustíveis renováveis. Segundo Chisti (2007), o rendimento do óleo da microalga, dado na Tabela 4, é baseado na produtividade de biomassa demonstrado experimentalmente em fotobiorreatores. As microalgas mostram ser uma fonte de biodiesel com grande potencial de substituir os combustíveis

fósseis na escala atual (CHISTI, 2007). Lardon *et al.* (2009) também compara o potencial das microalgas com outras fontes, apesar da produtividade de óleo das microalgas apresentada por eles não ser tão otimista quanto a de Chisti (2007), Tabela 5.

**Tabela 5 - Comparação entre algumas fontes vegetais oleaginosas para a produção de biodiesel.**

Cultura	Rendimento de óleo (l/ha.ano)	Autor
Soja	510	Zah 2007 apud Lardon et al., 2009
Canola	1400	Zah 2007 apud Lardon et al., 2009
Dendê	5100	Zah 2007 apud Lardon et al., 2009
Microalgas	28000	Lardon et al., 2009

Segundo Um *et al.* (2009), ensaios em condições ideais mostram que microalgas de crescimento rápido podem render 17000-19000 l/ha.ano de óleo enquanto as outras culturas rendem: 470 l/ha.ano para a soja, 1200 l/ha.ano para a canola e, aproximadamente, 6000 l/ha.ano para o óleo de palma. Comparado aos biocombustíveis de culturas agrícolas, a quantidade de área requerida seria mínima.

Uma publicação mais recente com dados modelados a partir da operação de uma planta industrial no estado do Arizona – EUA confirma o potencial das microalgas para a produção de biomassa e óleo. Quinn *et al.* (2011) estimaram uma produção de 57,2 t/ha.a de biomassa, representando 26.400 l/ha.a de óleo.

Em 1978 o *U.S. Department of Energy* (DOE) lançou o Programa de Espécies Aquáticas (do inglês, *Aquatic Species Program*) para pesquisar a produção de energia e biodiesel a partir de algas. Em decorrência da queda no preço do petróleo e da necessidade de cortar custos, o programa foi desligado em 1996. A conclusão mais importante foi que, definitivamente, as algas poderiam atingir rendimentos desejáveis de produção. Na época, para que os biocombustíveis de microalgas fossem economicamente viáveis o preço do petróleo teria que dobrar, pois ele custava apenas US\$ 20,00 o barril. Em 2006, quando o preço do petróleo triplicou em relação às décadas anteriores e com a

pressão corrente das mudanças climáticas e a tendência de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em nível global, voltou-se o interesse pelas algas como uma fonte energética potencial (RAUSEN, 2009; UNICEF, 2009).

No momento, existem grupos de várias partes do mundo trabalhando para viabilizar a produção energética partindo das microalgas (AIM, 2012). Por exemplo, o estado de Pahang, no centro da Malásia, está prestes a abrigar o maior projeto agrícola comercial do mundo, produzindo microalgas para biocombustível, no Vale de Algas Integrado da Malásia (do inglês, *Malaysian Integrated Algae Valley*), em um local de 2.020 hectares. A fazenda vai integrar em seu sistema de cultivo a água descartada, rica em efluentes orgânicos, de 11 moinhos de óleo de palma. ‘Essa água é muito suja e difícil de limpar, porém podem ajudar a limpar as plantações de óleo de palma (KOLESNIKOV-JESSOP, 2011). Dessa forma, as microalgas se mostram como uma tecnologia complementar à produção de outros agrocombustíveis.

### **2.3. Combustíveis de algas**

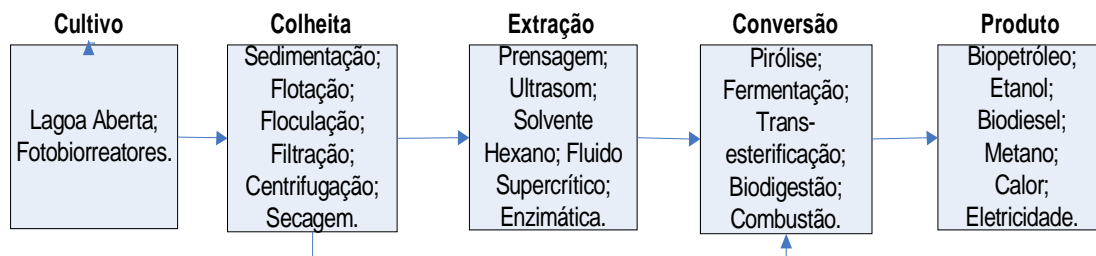
O uso contínuo de combustíveis advindos do petróleo é hoje amplamente reconhecido como insustentável, principalmente, pela finitude deste recurso e a contribuição desses combustíveis no acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera. Combustíveis para o transporte, renováveis e neutros em carbono, são necessários para a sustentabilidade ambiental e econômica. Infelizmente, o biodiesel de óleos agrícolas, óleo residual e gordura animal não podem realisticamente satisfazer nem uma pequena fração da demanda existente. As microalgas parecem ser a fonte de biodiesel renovável que seria capaz de atender esta demanda (CHISTI, 2007).

As microalgas usam energia solar para converter dióxido de carbono em carboidratos, proteínas e lipídeos, com uma eficiência maior em área de cultivo que as plantas terrestres. Os lipídeos (ácidos graxos) podem ser extraídos e servirem de matéria-prima para a produção de biodiesel (JORQUERA *et al.*, 2009).

Os biocombustíveis líquidos permitem o armazenamento de energia solar e, além disso, o seu uso diretamente em motores e infraestrutura de transporte. As microalgas oferecem um grande potencial de exploração, incluindo a produção de biodiesel. O maior desafio é assegurar que a produção do biodiesel de microalgas seja produzida com um saldo positivo de energia (SCOTT *et al.*, 2010).

Os biocombustíveis baseados em óleos vegetais ou bioetanol têm a principal vantagem de contar com as redes de distribuição e motores existentes. Contudo, a tecnologia dos biocombustíveis provoca impactos ambientais negativos, por exemplo, causados por pesticidas e fertilizantes além de competirem pelo uso da terra com as culturas alimentares (LARDON *et al.*, 2009). Em comparação com as culturas energéticas convencionais, o alto rendimento fotossintético das microalgas reduz significativamente o uso da terra e dos pesticidas (LARDON *et al.*, 2009).

A Figura 8 exemplifica as principais tecnologias usadas na cadeia para o aproveitamento energético das microalgas.



**Figura 8 - Tecnologias mais usadas na cadeia de produção de biocombustíveis de microalgas, incluindo as etapas de Cultivo<sup>1</sup>, Colheita<sup>2</sup>, Extração<sup>3</sup>, Conversão<sup>4</sup>, Produto final<sup>4</sup>.  
Fonte: Mata *et al.*, 2010<sup>1</sup>; Larsdotter *et al.*, 2006<sup>2</sup>; Oilgae, 2011<sup>3</sup>; Rawat *et al.*, 2011<sup>4</sup>.**

## **2.4. Tecnologias usadas na produção de biodiesel de microalgas: do cultivo até a produção do combustível**

As tecnologias para a produção de biodiesel de microalgas incluem as etapas de cultivo, colheita e secagem das microalgas, extração do óleo e finalmente a conversão do óleo em biodiesel. Existem tecnologias sendo desenvolvidas que prometem simplificar ou mesmo eliminar algumas destas etapas na cadeia de processamento das microalgas.

Nesta secção, serão abordadas mais detalhadamente algumas tecnologias para as etapas de cultivo, colheita/separação, secagem e processamento das microalgas em biodiesel.

### **2.4.1. Cultivo**

O crescimento fotossintético das microalgas requer luz, dióxido de carbono, água e sais inorgânicos. A temperatura tem que permanecer geralmente entre 20 e 30 °C (CHISTI, 2007).

O cultivo de microalgas pode ser feito em sistemas abertos, tais como: lagoas ou lagoas abertas (LAs) e em sistemas fechados altamente controlados chamados de fotobiorreatores (FBRs). Um fotobiorreator é definido como um sistema no qual a conversão biológica é atingida pela luz (MATA *et al.*, 2010).

O cultivo se inicia em fotobiorreatores de pequena escala para preparar o inóculo. O inóculo é a quantidade mínima para o cultivo (5-10% do volume) e é usado como uma semente para o cultivo em grandes lagoas abertas (MOLINARI, 2012; SANDER e MURTHY, 2010). Quando se usam reatores abertos e fechados, o sistema de cultivo é caracterizado como sistema híbrido.

As microalgas podem ser cultivadas de duas maneiras: em lagoas abertas, tanto naturais quanto projetadas, ou em sistemas fechados projetados. Comparações de desempenhos atingidos por FBRs e LAs podem ser difíceis, por que a avaliação depende de vários fatores. Entre eles estão as espécies de algas cultivadas e o método adotado para computar a produtividade. Ambos os

sistemas não devem ser vistos como tecnologias concorrentes (MATA *et al.*, 2010).

A seguir uma caracterização dos sistemas de cultivo:

- Lagoas Abertas

As lagoas abertas de grandes áreas são relativamente baratas de construir e fáceis de operar, contudo é difícil de controlar a contaminação, a temperatura, além de possuir baixa densidade celular. Devido às desvantagens dos sistemas de cultura abertos, muita atenção tem sido dada aos fotobiorreatores fechados, particularmente em função da produtividade de biomassa obtida (SCOTT *et al.*, 2010).

Devido às significantes perdas para a atmosfera, as lagoas abertas usam o dióxido de carbono de maneira muito menos eficiente que os fotobiorreatores. As lagoas abertas seriam mais baratas se comparadas aos fotobiorreatores, por que custam menos para construir e operar. Apesar das lagoas abertas terem baixo custo, elas possuem uma baixa produtividade de biomassa comparadas aos fotobiorreatores (CHISTI, 2007). Assume-se que o potencial de fotossíntese de uma lagoa é equivalente a 5 cm da sua profundidade (LARDON *et al.*, 2009).

- Reatores Fechados

Os sistemas de crescimento fechado possuem várias vantagens, não apenas porque neles se podem cultivar tipos específicos de culturas, mas também têm uma maior eficiência na absorção de CO<sub>2</sub> proveniente de processos industriais em altas concentrações, os quais aumentam a quantidade de CO<sub>2</sub> capturado (UNICEF, 2009).

Os FBRs são sistemas flexíveis que podem ser otimizados de acordo com as características biológicas e fisiológicas das espécies de algas, permitindo cultivar espécies impossibilitadas de crescer em lagoas abertas. Algumas das vantagens sobre as lagoas abertas são: oferecem um melhor controle sobre as condições da cultura e sobre os parâmetros de crescimento

(luz, pH, temperatura, mistura, CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>), previnem a evaporação de água, reduzem as perdas de CO<sub>2</sub>, permitem atingir concentrações celulares mais altas de microalgas, maiores produtividades volumétricas, oferecem um ambiente mais seguro e protegido, prevenindo a contaminação ou minimizando a invasão de organismos competidores (MATA *et al.*, 2010).

De acordo com Packer (2009) os reatores fechados oferecem a vantagem de permitirem um melhor controle do tipo de alga cultivada, particularmente importante para atingir produtividades econômicas, dependendo dos produtos desejados.

Por outro lado, os FBRs sofrem com vários inconvenientes que precisam ser considerados e resolvidos. As suas principais limitações incluem: superaquecimento, bioincrustantes, acumulação de oxigênio, dificuldade em aumentar a escala, alto custo de construção, operação e do cultivo de biomassa algal, e danos celulares por estresse de cisalhamento e deterioração do material usado na fase luminosa (MATA *et al.*, 2010). O custo da produção de microalgas em FBRs pode ser uma ordem de magnitude maior que em lagoas abertas.

Segundo Chisti (2007), os fotobiorreatores devem ser higienizados periodicamente. Essa manutenção pode ser atingida usando operações automatizadas de limpeza no local. A alta concentração de oxigênio dissolvido em combinação com luz do sol intensa produz danos foto-oxidativos às células das microalgas. Os fotobiorreatores podem requerer resfriamento durante alguns períodos do dia. Além disso, também é útil o controle da temperatura durante a noite. Um procedimento para diminuir a perda de biomassa noturna, devido à respiração, seria a redução da temperatura à noite (CHISTI, 2007).

#### 2.4.2. Luz

O Brasil oferece condições favoráveis ao cultivo de microalgas devido à abundância de luz solar, quase todo o ano, principalmente na região do semiárido nordestino.

Em condições de luminosidade favorável, pode-se atingir rendimentos de 30-40 g de biomassa seca por metro quadrado de LA por dia. Isso significa uma produção de 90 t/ha.ano de biomassa seca. Segundo Rodolfi e outros (2009, apud SCOTT *et al.*, 2010), estudos pilotos mostram que os rendimentos potenciais foram de 20 t/ha.ano de lipídeos no clima Mediterrâneo e mais que 30 t/ha.ano em áreas tropicais, obtidos pela privação de nutrientes em culturas abertas da microalga *Nannochloropsis sp.*

#### 2.4.3. Nutrientes

O meio de cultivo tem que fornecer os elementos inorgânicos que constituem a célula da alga. Os elementos essenciais incluem nitrogênio, fósforo, ferro e, em alguns casos, silício (CHISTI, 2007). Segundo Molinari (2012), a água do mar é pobre em nitrogênio e rica em fósforo enquanto que a água do continente é pobre em fósforo e rica em nitrogênio.

O CO<sub>2</sub> é um nutriente importante para qualquer organismo fotossintético e, quando introduzido à cultura de algas, estimula seu crescimento e sua reprodução. Outros constituintes dos gases da combustão devem ser considerados, especialmente, óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e enxofre (SO<sub>x</sub>) e ainda os metais presentes em níveis muito menores, níquel, vanádio e mercúrio, dependendo do combustível usado. Vários estudos sugerem que os níveis de NO<sub>x</sub> presentes nos gases da combustão não representam um problema para o crescimento das algas (PACKER, 2009).

O nitrogênio é conhecido por ter uma forte influência na síntese de proteínas que favorece o crescimento das microalgas (MOLINARI, 2012). Segundo Becker (1994, apud HSIEH e WU, 2009) uma ampla variedade de fontes de nitrogênio, como: amônia, nitrato, nitrito e ureia, podem ser usadas como fonte de nitrogênio no cultivo de microalgas, sendo a ureia a melhor fonte de nitrogênio no cultivo da *Chlorella sp.* O resultado implica que culturas com a quantidade e tempo apropriado de alimentação de ureia podem efetivamente estimular a produção de lipídeos das microalgas. A produção de lipídeos em microalgas para a produção de biocombustíveis pode ser maximizada com



sucesso usando um processo semicontínuo com reposição de quantidades limitadas de ureia durante o cultivo (HSIEH e WU, 2009).

Onde não há N suficiente para produção protéica necessária ao crescimento o excesso de carbono da fotossíntese é canalizado para moléculas de armazenamento, tais como: amido ou lipídeos. Stephenson (2010 apud SCOTT *et al.*, 2010) encontrou que a estratégia mais efetiva para atingir altos teores de lipídeos na *Chlorella vulgaris* seria deixando que o meio de cultivo esgote o N naturalmente ao invés de transferi-las para um meio pobre em N (SCOTT *et al.*, 2010).

No estudo de Avaliação do Ciclo de Vida de Lardon *et al.*, (2009), os autores assumiram que os nutrientes levantados para o inventário de avaliação seriam usados com uma eficiência total, ou seja, contabilizando apenas que seriam incorporados a biomassa da microalga. No mesmo estudo, os autores consideraram que o nitrogênio seria proveniente do nitrato de cálcio  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , o fósforo do superfosfato ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), o potássio do cloreto de potássio KCl, e o magnésio do fosfato de magnésio  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ . Quando eles avaliaram a mudança do meio de cultivo normal para um de baixo teor de nitrogênio, observaram uma melhoria relacionada a todas as categorias de impacto (LARDON *et al.*, 2009). Esse fato decorre do nitrogênio possuir uma maior contribuição mássica na mistura de nutrientes e a sua produção ser intensiva em energia, como será visto ao longo desta dissertação.

A geração de biomassa é dramaticamente estimulada pela adição de pequenos teores de  $\text{CO}_2$  (PACKER, 2009). De acordo com *US Department of Energy* (2006 apud UM *et al.*, 2009) não é necessário  $\text{CO}_2$  puro para a cultura de algas. É possível suprir diretamente o fotobiorreator com gases da combustão contendo entre 2-5% de  $\text{CO}_2$ , isso simplifica o processo de separação de  $\text{CO}_2$  dos gases de combustão significativamente. A produção de 100 t de biomassa de microalgas fixam aproximadamente 183 t de dióxido de carbono (CHISTI, 2007).

Segundo o relatório *US Department of Energy* (2006 apud UM *et al.*, 2009) e Stephenson *et al.* (2010) alguns produtos da combustão como, por

exemplo, NO<sub>x</sub> ou SO<sub>x</sub> podem ser efetivamente usados como nutrientes para as microalgas. Se esse aproveitamento for eficaz em escala industrial será um grande avanço para o cultivo de microalgas devido à simplificação de processos de purificação dos gases da combustão e minimização de custos, facilitando a implementação dessa tecnologia.

Yoo *et al.* (2009) testaram os gases da combustão para cultivar algumas espécies de microalgas. Foram selecionadas microalgas com elevada produção de biomassa e lipídeos, *Botryococcus braunii*, *Chlorella vulgaris*, e *Scenedesmus sp.*, cultivando-as em ar ambiente contendo 10% de CO<sub>2</sub> alimentado a partir de gases da combustão. A produtividade da biomassa e dos lipídeos para *Scenedesmus sp.* com 10% de CO<sub>2</sub> foram de 217,5 e 20,65 mg / l.dia (equivalente a uma fração mássica de 9% da biomassa), enquanto para a *B.braunii* foram de 26,55 e 5,51 mg / l.dia (21% da biomassa). Com os gases da combustão, contendo 5,5% de CO<sub>2</sub> a produtividade de lipídios para a *Scenedesmus sp.* e para a *B.braunii* aumentou 1,9 vezes (39,44 mg / l.dia) e 3,7 vezes (20,65 mg / l.dia), respectivamente, comparado ao anterior. O ácido oléico, principal componente do biodiesel, ocupou 55% entre os ácidos graxos na *B.braunii*. Portanto, esses resultados sugerem que a *Scenedesmus sp.* seria adequada para mitigação de CO<sub>2</sub> devido à sua alta produtividade de biomassa e à sua capacidade de fixação de carbono, enquanto a *B.braunii* seria adequada para a produção de biodiesel, em virtude do seu alto conteúdo de lipídios e proporção de ácido oléico.

Os requisitos nutricionais mínimos podem ser estimados usando a fórmula molecular aproximada da biomassa de microalgas, CO<sub>0,48</sub>H<sub>1,83</sub>N<sub>0,11</sub>P<sub>0,01</sub>, baseado nos dados apresentados por Grobbelaar (2004 *apud* CHISTI, 2007).

Os micronutrientes Mg, S, Cu e Fe são requeridos em menores quantidades e, geralmente, são negligenciados dos estudos de ACV de biocombustíveis de microalgas.

#### 2.4.4. Água no meio de cultivo

A grande quantidade de água necessária para a produção em larga escala em ambos os sistemas (abertos ou fechados) colocam outro desafio. A água do meio de cultivo tem que ser resfriada a cada dia e tirada da luz para limitar o crescimento de qualquer predador ou microalga invasora. Essa condição envolve um bombeamento contínuo dessa água (UM *et al.*, 2009).

De acordo com o relatório *National Algal Biofuels Technology Roadmap* (2010) embora o tratamento de águas residuais com algas requeira muito mais área do que as tecnologias de tratamento convencionais, o tratamento utilizando as algas em climas propícios possuem as seguintes vantagens:

- ❖ Potencial para a reciclagem dos nutrientes.
- ❖ Diminuição nos custos tanto no cultivo das algas quanto no tratamento das águas residuais (economia ambiental).
- ❖ Potencial de ser integrada com usinas termelétricas ou outras operações industriais emissoras de CO<sub>2</sub>.
- ❖ Potencial de tratamento de drenagem da agricultura ou corpos d'água eutrofizados.

Uma quantidade significativa de água é perdida para cada kg de alga que deixa o sistema de cultivo. Num contexto do Mediterrâneo, o equilíbrio entre a precipitação anual e a evaporação resulta numa perda de água de 300 mm. Consequentemente, a quantidade total de água requerida é em torno de 4 litros por kilograma de biomassa seca (LARDON *et al.*, 2009).

Águas residuais, após tratamento secundário, podem ser usadas como meio de nutrientes, no qual se assume ter todos os nutrientes menos carbono, além de dispensar uma fonte externa de água, visto que ela vem do efluente tratado, não usando nenhuma fonte de água tratada para abastecimento (SANDER e MURTHY, 2010).

Conforme Palani (2011) se alguém for cultivar alga para queimá-la como combustível a tecnologia usando águas residuais é favorável. A alga produzida

em FBR em de grau farmacêutico que, geralmente, utiliza fertilizantes comerciais, possui um alto valor para seus constituintes serem queimados como combustível.

#### 2.4.5. Colheita e secagem

Ainda não existe um método universal de colheita de microalgas. Esta é uma área em pleno desenvolvimento. Os métodos mais comuns incluem: sedimentação, centrifugação, filtração, ultrafiltração, algumas vezes com uma etapa adicional de floculação ou com uma combinação de floculação-flotação (MATA *et al.*, 2010).

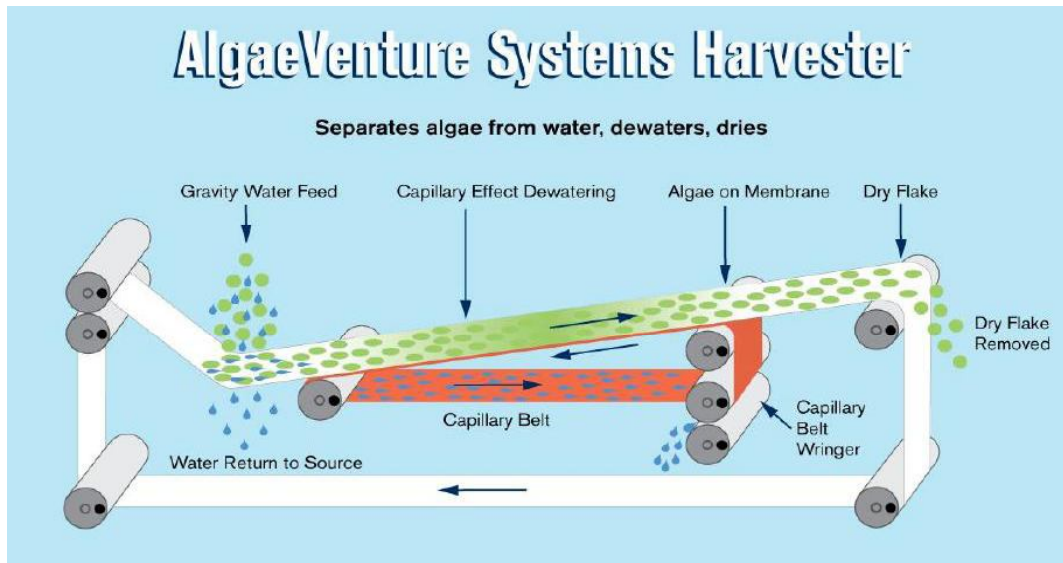
O processamento (ex. colheita, secagem e extração das substâncias químicas) representa a maior limitação econômica para a produção de *commodities* de baixo custo (ex. combustíveis, rações e alimentos). Vários métodos foram empregados para secar microalgas como *Chlorella*, *Scenedesmus* e *Spirulina*, e os mais comuns incluem pulverização seca, tambor de secagem, liofilização e secagem ao sol (RICHMOND 2004 *apud* MATA *et al.*, 2010).

Culturas de alta densidade representam um menor consumo de energia para o desaguamento (PACKER, 2009). Existem vários métodos disponíveis para separação de algas (Você não destaca os métodos. è isso mesmo?) . As células são mais diluídas em culturas de lagoas em relação aos fotobiorreatores e as concentrações de microalgas naturais nos oceanos são ainda uma ou duas ordens de magnitude menores. O método escolhido depende muito do produto final e do processo usado subsequente. Alguns processos requerem que a microalga seja secada completamente, enquanto outros podem requerer um desaguamento moderado (PACKER, 2009).

Já existe tecnologia para recuperar facilmente a biomassa do caldo por filtração. A recuperação de biomassa do caldo cultivado no fotobiorreator custa apenas uma fração do custo para o caldo produzido em lagoas abertas. Isso é devido à concentração de biomassa típica produzida nos fotobiorreatores é de

aproximadamente 30 vezes a concentração geralmente obtida em lagoas abertas (CHISTI, 2007).

A tecnologia desenvolvida pela empresa *AlgaeVenture* demonstra ser uma das mais eficientes até o momento tanto economicamente quanto ambientalmente, para ambos processos de colheita e secagem juntos, Figura 9 (AVS, 2009).



**Figura 9 – Sistemas de colheita.**  
**Fonte: AlgaeVenture, 2009.**

O secador de correia é um dos processos menos demandantes no consumo elétrico, em relação aos concorrentes, capaz de atingir um conteúdo sólido de 90% a um consumo energético de 400 Wh de eletricidade e 13,8 MJ de calor por kg de biomassa seca processada (HASSEBRAUK 1996 *apud* LARDON *et al.*, 2009). Então, a energia térmica pode ser advinda da cogeração na própria biorrefinaria.

Normalmente, a secagem térmica das microalgas requer altas quantidades de energia derivada dos combustíveis fósseis (3,556 kJ/kg de água removida). O desaguamento da alga é o sumidouro de energia mais significativo no processo. Existem registros sobre o uso da secagem solar,

principalmente na Ásia, para secagem de algas para alimentação (HILLS e NAKAMURA 1978, *apud* SANDER e MURTHY, 2010).



**Figura 10 – Secador Solar.**  
**Fonte: Algaelink, 2010.**

#### 2.4.6. Extração do óleo

Após a secagem, segue-se o rompimento da célula das microalgas para a liberação dos metabólitos de interesse. Diversos métodos podem ser usados dependendo da parede celular e da natureza do produto a ser obtida, baseada em ação mecânica, por exemplo, homogenizadores celulares, moinho de esferas, ultrassom, autoclave, e pulverização seca ou ação não mecânica, por exemplo, congelamento, solventes orgânicos e choque ácido e osmótico, reações com base e enzima (MATA *et al.*, 2010).

A dificuldade está em liberar os lipídeos dos seus locais intracelulares da forma mais eficiente possível, energética e economicamente. Existe muito escopo para abordagens baseadas na decomposição seletiva da parede celular, possivelmente usando enzimas, e outras abordagens que minimizam o uso de solventes (SCOTT *et al.*, 2010). Há ainda abordagens de uso múltiplo de solventes que prometem melhorar o desempenho na extração (SAMORÍ *et al.*, 2010).

Para a produção de biodiesel, os lipídios e ácidos graxos devem ser extraídos da biomassa de microalgas. Para os lipídios, uma extração por solvente é normalmente feita diretamente a partir da biomassa seca ou liofilizada (MATA *et al.*, 2010). O uso da torta para fins mais nobres dependerá da qualidade dela após a extração do óleo. Depois de extraído o óleo, pode-se

usar a torta para a recuperação energética e dos nutrientes a partir da sua biodigestão anaeróbia (COLLET *et al.*, 2010).

A extração pode ser amplamente categorizada em dois métodos, como mostra o Quadro 1:

**Quadro 1 - Principais métodos de extração de lipídeos de microalgas.**

Métodos	Entraves
Mecânicos	
Prensagem	A prensagem mecânica geralmente requer secagem da alga, que é um processo intensivo em energia tanto quanto o ultrassom.
Ultrassom	
Choque osmótico	Choque Osmótico é uma repentina redução na pressão osmótica, isso pode levar a uma ruptura das células na solução. Choque osmótico é, algumas vezes, usado para liberar os componentes das células como o óleo.
Químicos	
Solvente hexano	O uso de solventes químicos apresenta problemas de saúde e segurança.
Extração por fluido supercrítico	A extração supercrítica requer equipamento de alta pressão que são ambos caros e intensivos em energia.
Extração enzimática	Usa enzimas para degradar as paredes celulares com água agindo como um solvente, tornando a saída do óleo mais fácil. Os custos desse processo são muito maiores que a extração com hexano.

**Fonte: Oilgae, 2011.**

A extração de óleo é objeto de muitas discussões e ainda não está claro qual das tecnologias supracitadas é a mais eficiente. É comum o uso da combinação de prensagem mecânica e solventes químicos na extração do óleo. No estudo de caso de Avaliação do Ciclo de Vida de Lardon *et al.* (2009), eles consideraram que as microalgas eram prensadas num moinho similar àqueles usados na prensagem da soja e, posteriormente, o óleo era separado da biomassa pela circulação do solvente em contracorrente, usualmente o hexano. Eles consideraram 2 g de hexano são perdidas para cada kg de biomassa seca (LARDON *et al.*, 2009).

Segundo Packer (2009) o hexano é um solvente tipicamente usado, ou sozinho ou combinado com um expelidor de óleo ou uma prensa. Após o óleo ter sido extraído usando um expelidor, a torta pode ser misturada ao hexano para extrair o óleo remanescente. O óleo se dissolve no hexano, e a torta é filtrada para fora da solução. O óleo e o hexano são separados por meio da

destilação. Estas duas etapas, prensagem e solvente hexano, juntas, são capazes de obter mais de 95% do óleo total presente na alga.

Devido à escassez de dados para as microalgas, alguns autores modelaram o processo de extração por hexano e a transesterificação do óleo de microalgas, resultando em biodiesel baseado em estudos prévios de ACV de biodiesel de soja. Sander e Murthy (2010) usaram dados de esmagamento do grão de soja para a extração do óleo, feitas algumas modificações aos processos que coincidiam com o das microalgas. Igualmente em virtude da falta de dados primários, alguns estudos de ACV assumiram que o óleo de alga extraído tinha a mesma composição do óleo de soja.

A seguir algumas tecnologias de extração, ainda em desenvolvimento, que podem ser promissoras:

- Por solvente dimetil éter (DME)

O *Central Research Institute of Electric Power Industry* (CRIEPI) do Japão desenvolveu uma tecnologia de desaguamento e extração de óleo de microalgas que promete minimizar os custos em 60 vezes. O CRIEPI tem conduzido pesquisa básica para desenvolver um método de extração de “petróleo de alga” econômico e ambientalmente amigável, usando dimetil éter (DME,  $\text{CH}_3\text{OCH}_3$ ) liquefeito a partir das algas verde-azuis (fitoplâncton) coletado *in natura* e simplificando o processo de pós-secagem. O solvente DME ainda pode ser recuperado a temperatura de 50 °C, utilizando calor residual (CRIEPI, 2010).

Métodos tradicionais usam a centrifuga para concentrar as microalgas, chegando a uma concentração de 91% de água no meio de cultivo e secagem ao sol até elas virarem pó. Na centrifuga, a parede celular das microalgas pode ser rompida usando ácidos ou pulverização e o óleo é extraído com o uso de solventes (hexano, acetona ou clorofórmio). Depois, é preciso separar todo o solvente do óleo por destilação.

A Figura 11 mostra a coluna interior na qual o DME foi circulado de baixo para cima. A parte mais escura são as algas e a parte mais clara é o DME,



incluindo o óleo extraído. O ponto de ebulição do DME é 25 °C e, no estudo citado, ele foi usado liquefeito a 20 °C a 0.5 MPa. A recuperação do DME é feita através da despressurização à temperatura ambiente e ele pode ser reutilizado.

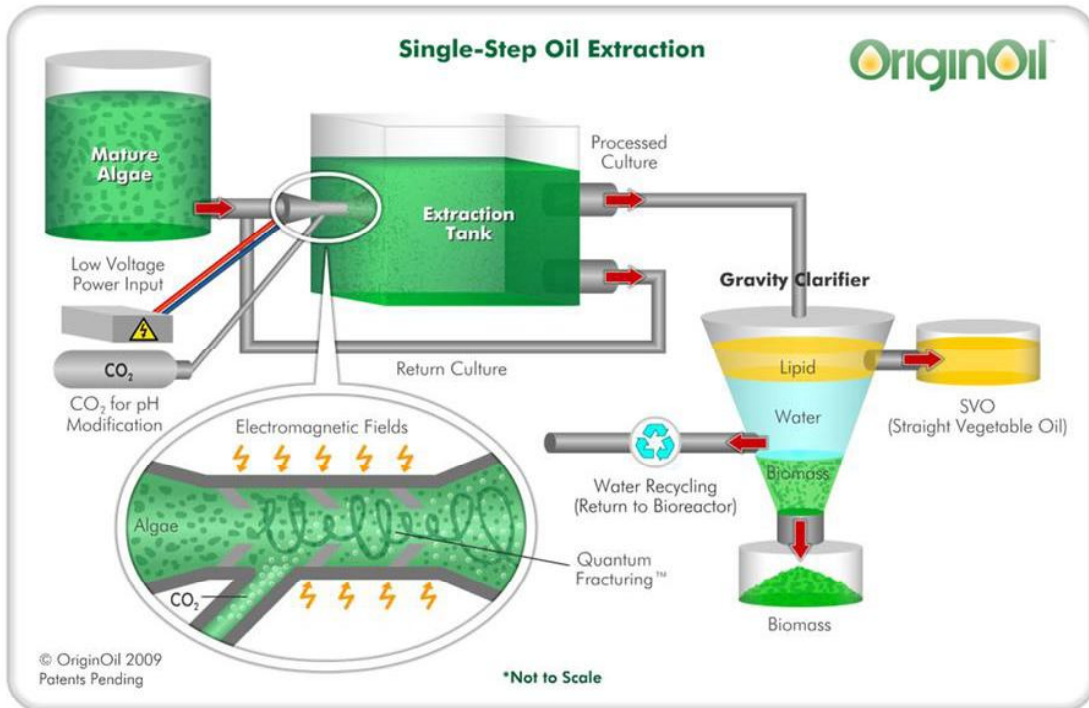


**Figura 11 – Extração de óleo das microalgas pelo solvente DME.  
Fonte: CRIEPI, 2010.**

Essa técnica conseguiu extrair 40,1% de óleo do peso seco da microalga. Usando os solventes tradicionais, foi extraído apenas 0,6%. O novo método representa um aumento na eficiência de 60 vezes. O DME não é tóxico, não forma peróxidos, não tem efeito na camada de ozônio nem no aquecimento global (CRIEPI, 2010).

Um exemplo de extração do óleo em meio aquoso foi desenvolvido pela empresa OrignOil ® por meio da ruptura da parede celular. Trata-se, segundo os responsáveis pelo desenvolvimento, de uma tecnologia prestes a entrar em escala comercial e que promete baratear as etapas de separação e extração do óleo das microalgas, fisicamente, propiciando usos mais nobres da torta algal para indústria de alimentos, nutrição ou farmacêutica pertencente à empresa OrignOil ®.

- Por fraturamento quântico

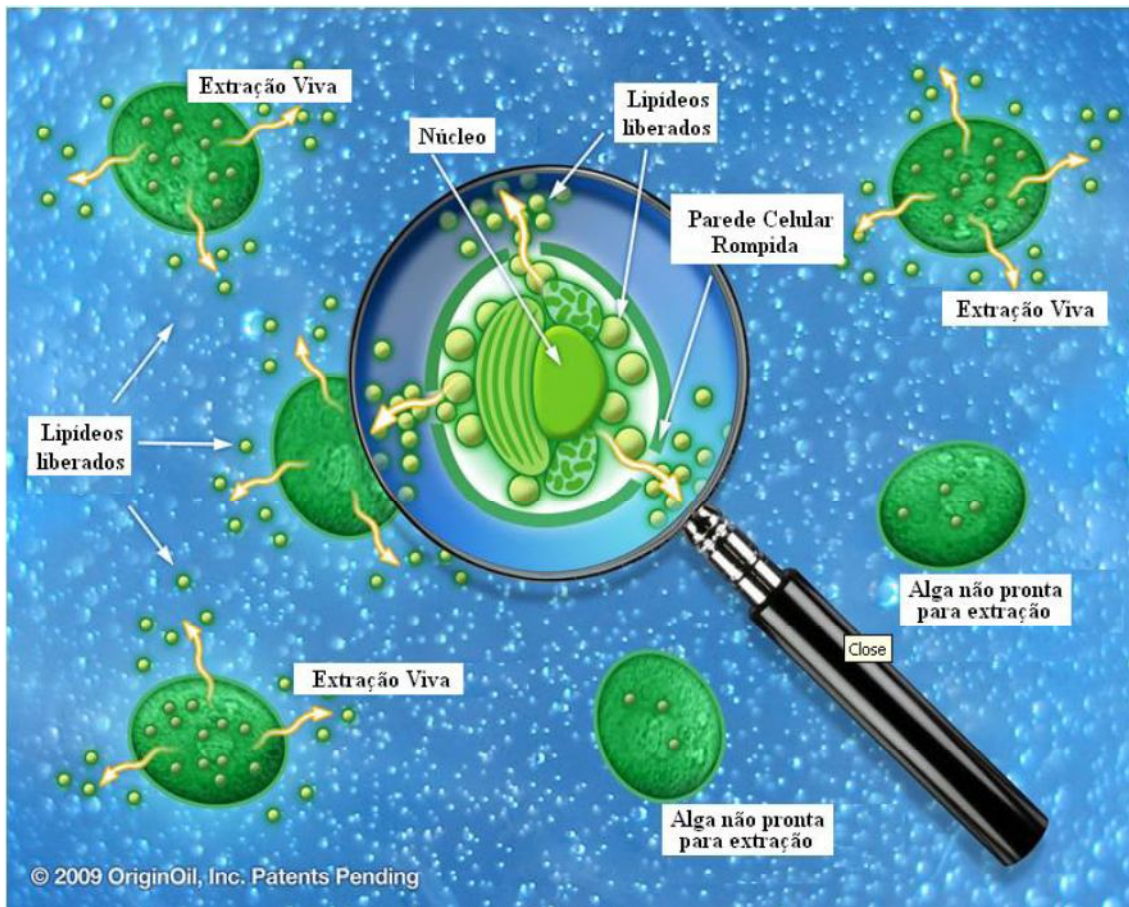


**Figura 12 – Fraturamento Quântico.**  
**Fonte: Originoil, 2011.**

Culturas de algas maduras são objetos de fraturamento quântico, campos de pulsos eletromagnéticos e modificação no pH (usando CO<sub>2</sub>), que combinam quebrando as paredes celulares. A cultura processada então vai para o tanque de decantação, ou clarificador gravitacional, para posterior separação do óleo, da água e da biomassa, Figura 12.

- Extração viva

A qualquer momento, num processo contínuo, apenas algumas algas estão prontas para extração. O processo colhe essas algas enquanto as células “não maduras” continuam a crescer. As algas colhidas se regenerarão para outra eventual colheita. Extração de Única-etapa (quantum fracturing) ainda deve ser empregada para uma produtividade máxima e para renovar a população de microalgas. Live extraction™ é especialmente vantajosa quando usada com algas geneticamente modificadas, com maior rendimento lipídico. A patente Live Extraction™ permite a contínua extração do óleo sem sacrificar a microalga, Figura 13.



**Figura 13 - Live Extraction™.**  
Fonte: Orignoil, 2011.

#### 2.4.7. Produção de biodiesel

O óleo das microalgas difere da maioria dos óleos vegetais por ser bastante rico em ácidos graxos poliinsaturados com quatro ou mais ligações duplas (Belarbi *et al.*, 2000 apud CHISTI, 2007). Ácidos graxos e ácidos graxos de ésteres de metil (FAME em inglês ou comumente conhecido como biodiesel) com quatro ou mais ligações duplas são suscetíveis à oxidação durante o armazenamento e isso reduz a sua aceitabilidade para uso. Em vista da composição de vários óleos de microalgas, a maioria deles é improvável para cumprir com o padrão europeu de biodiesel, mas isso não necessariamente se apresenta como uma limitação. A extensão da insaturação do óleo de microalga e seu conteúdo de ácidos graxos com mais de 4 ligações duplas pode ser reduzida facilmente por hidrogenação catalítica parcial do óleo (JANG *et al.*, 2005 apud CHISTI, 2007) a mesma tecnologia comumente usada para fazer margarina a partir de óleos vegetais (CHISTI, 2007). Mata *et al.* (2010) dizem que a transesterificação do óleo de microalgas não difere muito de outros óleos.

Para Mendonça (2007) o biodiesel é uma alternativa de combustível com modificações químicas para uso em engenharias habitualmente a diesel. Ele pode ser obtido através do processo de transesterificação de qualquer triglicerídeo (óleos e gorduras animais ou vegetais) ou óleos de fritura residuais em reação com um álcool de cadeia curta, etanol na rota etílica e o metanol na rota metílica.

A transesterificação é uma etapa de múltiplas reações, incluindo três etapas reversíveis em série, nas quais os triglicerídeos são convertidos em diglicerídeos, e os diglicerídeos são convertidos em ésteres (biodiesel) e glicerol (coproduto). Na reação de transesterificação o óleo ou gordura e um álcool de cadeia curta (usualmente o metanol) são usados como reagentes na presença de um catalizador, frequentemente o hidróxido de sódio (NaOH) ou hidróxido de potássio (KOH) (MATA *et al.*, 2010).

O rendimento da reação depende do deslocamento do equilíbrio químico em favor dos ésteres, otimização de fatores como a temperatura de reação,

concentração e base do catalisador, bem como o excesso estequiométrico do agente de transesterificação (álcool) (KUCEK, 2004 *apud* MENDONÇA, 2007, p.36).

Lardon *et al.* (2009) consideraram, em seu estudo, que o biodiesel de microalgas teria o mesmo comportamento em motores a diesel em relação aos outros biodieseis, sendo seu conteúdo energético de 37,8 MJ/kg.

Embora a razão molar teórica de álcool:óleo seja 3:1, geralmente se usa uma razão molar de 6:1 para completar a reação com precisão. Teoricamente 1 kg de óleo resulta em 1 kg de biodiesel, razão 1:1 (MATA *et al.*, 2010). O biodiesel é recuperado pela lavagem repetida com água para remover o glicerol e o metanol (CHISTI, 2007).

No Brasil, os dados do Anuário de 2009 da ANP (2010) revelam que 94,7% do biodiesel produzido neste ano foram pela rota metílica.

## **2.5. Avaliação comparativa entre inventários na etapa de cultivo de microalgas**

Pelo fato da etapa de cultivo ter a maior demanda de insumos, acarretando numa maior contribuição para o balanço energético e para as emissões de GEE ao longo da cadeia de biocombustíveis de microalgas, resolveu-se analisar alguns inventários a fim de verificar suas semelhanças. Comparou-se o valor dos insumos utilizados na etapa de cultivo dos inventários para a produção de 1 kg de biomassa de microalgas, com o intuito de identificar uma consistência das informações em relação ao estudo de caso proposto nesta dissertação (capítulos 4 METODOLOGIA, 5 RESULTADOS e 6 DISCUSSÃO) devido à escassez de dados de plantas industriais de microalgas para fins energéticos até a publicação deste trabalho.

**Tabela 6 – Inventários da etapa de cultivo de microalgas em LA por kilograma de biomassa seca.**

Método		Lagoas Abertas									
Autor	Chisti, 2007.	Lardon et al., 2009.	Lardon et al., 2009.	Lardon et al., 2009.	Campbell et al., 2010.	Clarens et al., 2010.	Stephenson et al., 2010.	Quinn et al., 2011.	Razon e Tan, 2011.		
Espécie:	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Chlorella vulgaris</i> , Normal	<i>Chlorella vulgaris</i> , pouco N	<i>Dunaliella</i>	Mix de microalgas	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Nannochloropsis oculata</i>	<i>Nannochloropsis sp.</i>			
Entrada	Unidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade
Energia	kWh	-	0,35	0,42	0,2	0,19	0,8	-	-	12,7	
CO <sub>2</sub>	kg	1,83	1,75	1,97	1,69	-	-	-	-	-	
N	kg	0,07	0,046	0,01	0,008	-	0,024	-	-	0,007	
P	kg	0,01	-	-	0,0056	-	-	-	-	0,013	
Água	m <sup>3</sup>	7,1	-	-	0,7	-	0,7	-	-	-	
Produtividade	g/m <sup>2</sup> .dia	-	25	19	30	15	30	15	16	16	
Concentração	kg/m <sup>3</sup>	0,1	0,5	0,5	-	1	1,67	3	0,13	0,13	
Conteúdo lipídico	%	30	18	40	-	-	40	51	30	30	

Eletricidade – Houve uma variação significativa entre os valores do consumo de energia elétrica. Na maioria dos casos, esse valor não ultrapassou 0,5 kWh/kg, com exceção de Stephenson *et al.* (2010) com 0,8 kWh/kg e Razon e Tan (2011), distorcendo bastante dos outros autores com 12,7 kWh/kg. Esses valores incluem gastos com mistura (funcionamento das pás), bombeamento d'água e bombeamento de CO<sub>2</sub> durante o dia. Vale lembrar que cada um usou uma espécie de microalgas diferente.

CO<sub>2</sub> - O valor do dióxido de carbono sofreu pouca variação entre os autores.

Nutrientes (N e P) - Chisti (2007) estima a demanda de nutrientes a partir da composição da biomassa algal, sendo 0,07 kg N/kg e 0,01 kg P/kg. Para Lardon *et al.* (2009) esse dado varia entre 0,046-0,010 kg N/kg, sendo o nitrogênio trazido pelo nitrato de cálcio e o fósforo por superfosfato simples, transportado numa distância de 100 km da planta. Campbell *et al.* (2010) calculam em 0,08 kg N/kg e 0,056 kg P/kg, nitrogênio e fósforo do fertilizante NPKS 32% / 10% / 0% / 0% e o nitrogênio extra para completar o fertilizante combinado foi a ureia. Clarens *et al.* (2010) não fornecem esses dados. Stephenson *et al.* (2010) estimaram a demanda de nitrogênio com base na composição elementar da biomassa de microalgas, sendo CH<sub>1.83</sub>O<sub>0.48</sub>N<sub>0.11</sub>P<sub>0.01</sub>. Razon e Tan (2011) calculam a demanda de fertilizantes usando as fórmulas empíricas de Angelidaki e Sanders (2004, *apud* Razon e Tan 2011) para carboidratos, proteínas e lipídeos que são respectivamente: C<sub>6</sub>H<sub>10</sub>O<sub>5</sub>, C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub> e C<sub>57</sub>H<sub>104</sub>O<sub>6</sub>.

Água - Chisti (2007) estimada em 7,14 m<sup>3</sup>/kg no qual pode ser usada água residual como insumo no processo. Água da lagoa é lavada a cada dois meses para controlar o desenvolvimento de bactérias e evitar o acúmulo de compostos tóxicos ou mesmo inibir-los. Em Lardon *et al.* (2009) a água de lavagem é tratada *in situ* em uma planta tradicional de tratamento de águas residuais. Campbell *et al.* (2010) calculam a demanda de água em aproximadamente 0,47 m<sup>3</sup>/kg, sendo que a água do mar é bombeada até a costa para compensar as perdas em virtude da evaporação que ocorre nos reatores abertos. Posteriormente a água retorna de volta ao mar com os níveis

de sal ligeiramente mais elevados devido à evaporação ou ela é tratada para remover o excesso de sal antes de ser liberada de volta ao oceano por gravidade. Clarens *et al.* (2010) estimaram em  $0,15 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Stephenson *et al.* (2010) apresentam os valores totais para o consumo de água por kg de biomassa. Eles calcularam as demandas de água de processo, para ambos os sistemas (abertos e fechados), e identificaram que os sistemas abertos, no clima do Reino Unido, demandam menos água do que os fechados em função da média de precipitação nessa região ser maior do que a evaporação.

Produtividade - Chisti (2007) não informa a produtividade de biomassa, apenas de óleo por hectare, mostrado na Tabela 4. Lardon *et al.* (2009) detectaram a produtividade em  $24,75 \text{ g/m}^2.\text{dia}$  e  $19,25 \text{ g/m}^2.\text{dia}$ . Campbell *et al.* (2010) e *et al.* (2010) estimam em  $30 \text{ g/m}^2.\text{dia}$ , Clarens *et al.* (2010)  $15 \text{ g/m}^2.\text{dia}$ , Quinn *et al.* (2011)  $15 \text{ g/m}^2.\text{dia}$  e Razon e Tan (2011)  $16 \text{ g/m}^2.\text{dia}$ . Apesar das diferenças entre as localidades e espécies estimadas, os valores giram próximos.

Concentração de biomassa – Normalmente, dados de concentração são medidos no topo da curva exponencial de cultivo, ou seja, na concentração máxima. Chisti (2007) estima em  $0,1 \text{ kg/m}^3$ , a mais baixa em relação às outras, logo em seguida Razon e Tan (2011)  $0,13 \text{ kg/m}^3$ . Para Lardon *et al.* (2009), em ambos os casos, esse dado é  $0,5 \text{ kg/m}^3$ . Campbell *et al.* (2010) não fornecem essa informação. Clarens *et al.* (2010) estimou em  $1 \text{ kg/m}^3$ . Stephenson *et al.* (2010) dividiram o cultivo em duas etapas, uma com os requisitos de nitrogênio necessários e a posterior com a deprivação desse fertilizante, estimando a concentração média de  $1,67 \text{ kg/m}^3$ . Quinn *et al.* (2011) calcularam, com base em dados reais de escala industrial, em  $3 \text{ kg/m}^3$ , sendo a maior concentração atingida entre os autores. Geralmente, a concentração de biomassa no meio de cultivo é um fator de grande relevância na eficiência do processo de colheita quando usada uma centrífuga, por exemplo.



**Tabela 7 - Inventários da etapa de cultivo de microalgas em FBR por kilograma de biomassa seca.**

Método	Fotobioreator Tubular				Híbrido [FPP-LA]		Sacolas de polietileno
	Chisti, 2007.	Collet et al., 2010.	Stephenson et al., 2010.	Khoo et al., 2011.	Razon e Tan, 2011.	Batan et al., 2010.	
Autor	Chisti, 2007.	Collet et al., 2010.	Stephenson et al., 2010.	Khoo et al., 2011.	Razon e Tan, 2011.	Batan et al., 2010.	
Espécie:	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Chlorella vulgaris</i>	<i>Nannochloropsis sp.</i>	<i>Haematococcus pluvialis</i>	<i>Nannochloropsis salina</i>	
Entrada	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	Quantidade	
Energia	-	0,23	7,27	0,972	5,77	0,455	
CO <sub>2</sub>	1,83	1,17	-	1,83	-	-	
N	0,07	0,01	0,0236	0,15	0,0128	0,147	
P	0,01	0,002	-	0,01	0,013	0,02	
Água	0,25	-	0,134	2,125	-	0,134	
Produtividade	-	25	75	-	16	25	
Concentração	4	0,5	8,3	0,5	0,43	-	
Conteúdo lipídico	30	-	40	-	25	-	

Para Chisti (2007) aplicam-se os comentários anteriores para a maioria dos parâmetros.

Eletricidade – Houve uma variação bastante significativa nesse aspecto, que pode ser decisivo na viabilidade energética do produto final. Collet *et al.* (2010) usam em aproximadamente 0,23 kWh/kg. A maioria dos autores consideraram apenas a energia elétrica para o funcionamento do reator e o transporte do CO<sub>2</sub>, sem considerar o transporte da água até o local. Khoo *et al.* (2011) calculam em aproximadamente 0,94 kWh/kg relativo à mistura do meio de cultivo nos reatores (abertos e fechados) e ao bombeamento de CO<sub>2</sub>, enquanto Batan *et al.* (2010) calculam em 0,455 kWh/kg com o mesmo fim e ambos usando a *Nannochloropsis sp.* Stephenson *et al.* (2010) estimaram que o consumo de energia elétrica na etapa de cultivo seria responsável por 85% da demanda energética na cadeia do biodiesel de microalgas, o que justifica o valor ser tão alto em comparação aos outros autores. Razon e Tan (2011) consideraram a energia para o bombeamento do CO<sub>2</sub> nas lagoas, assumindo uma absorção de 80% do CO<sub>2</sub> na água, usando um compressor com eficiência de 30%. Esse modelo resultou numa estimativa de 13,6 kJ/kg de CO<sub>2</sub> puro bombeado no meio de cultivo.

CO<sub>2</sub> - O valor do dióxido de carbono sofreu variação entre os autores. Khoo *et al.* (2011) usam a estimativa de Chisti (2007) de 1,83 kg/kg. Collet *et al.* (2010) utilizam 1,17 kg/kg, visto que este montante vem da indústria, e o resto de uma biorrefinaria (biogás de combustão) na qual estão situados os fotobiorreatores. Supõe-se que as microalgas capturaram 90% do CO<sub>2</sub> gasoso injectado (Sheehan *et al.*, 1998 apud Collet *et al.*, 2010). O custo da energia da injeção é avaliado em 22,2 Wh por kg de CO<sub>2</sub> (Kadam, 2002 apud Collet *et al.*, 2010). Batan *et al.* (2010) não quantificam esse dado, mas afirmam que a instalação de microalgas presumidamente está localizada ao lado de uma fonte de CO<sub>2</sub> puro, tal como uma central de gás natural de amina, o que não implica em custos de transporte, custos pré-processamento ou requisitos energéticos para fornecer o CO<sub>2</sub>.

Nutrientes (N e P) - Collet *et al.* (2010) usam 0,0088 kg N/kg e 0,0026 kg P/kg, porém esse dado é parcial, pois uma parte dos nutrientes do efluente é proveniente da biodigestão da torta residual. Os dados experimentais em Ras *et al.* (2010 apud Collet *et al.*, 2010) fornecem a seguinte composição para 1 kg de algas secas: 367 g C e 61 g N. A razão de P em comparação com N em *Chlorella vulgaris* conduzem a uma composição em fósforo de 8,1 g P por kg de microalgas secas (Lardon *et al.*, 2009 apud Collet *et al.*, 2010). Os digeridos líquidos recirculados a partir dos digestores anaeróbicos fornecem uma parte do requisito de fertilizantes da cultura. O restante foi fornecido por fertilizantes convencionais. Todos os autores assumem uma eficiência total para a utilização dos fertilizantes, significando que não há perdas de nutrientes no sistema. Khoo *et al.* (2011) estimam em 0,15 kg N/kg na forma de  $\text{NaNO}_3$  e 0,01 kg P/kg na forma de  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ . Batan *et al.* (2010) consideram em 0,147 kg N/kg e 0,02 kg P/kg. O teor de nitrogênio e fosfato das microalgas são definidos como 15% e 2%, em massa, de acordo com requisitos de crescimento biológico e de investigação da produtividade lipídica (Rodolfi *et al.* 2005 apud Batan *et al.* 2010). Para Stephenson *et al.* (2010), aplicam-se os comentários de sistemas abertos. Razon e Tan (2011) julgaram as quantidades de nitrogênio usando a composição elementar da *Haematococcus pluvialis*: 45.6% C, 8.2% H, 6% N, 0.58% S, e 39.625% O, a partir do balanço de Garcia–Malea *et al.* (2006 apud Razon e Tan, 2011). A tradicional razão N:P de Redfield de 16 foi usada para ponderar os requisitos do fertilizante fosfatado.

Água - Chisti (2007) avalia em 2,25 m<sup>3</sup>/kg. Collet *et al.* (2010) usa 3,07 m<sup>3</sup>/kg sendo que ela é recirculada. A perda de água é estimada em 600 milímetros por ano. As perdas de água são compensadas pela água fresca utilizada na etapa de purificação e é reinjetada. Khoo *et al.* (2011) calculam em 2,12 m<sup>3</sup>/kg proveniente da água do mar sem tratamento. Stephenson *et al.* (2010) comentam que, em climas de maior evaporação do que precipitação, os reatores fechados são mais favoráveis.

Produtividade – As literaturas dos reatores fechados, geralmente, fornecem os dados de produtividade por volume, diferentemente dos abertos que fornecem em unidade de área. Não obstante, alguns autores informaram essa taxa em

medida de área  $\text{g/m}^2\cdot\text{dia}$ . Collet *et al.* (2010) estimou em  $25 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ . De acordo com Suen *et al.* (1987 apud Batan *et al.* 2010), a *Nannochloropsis salina* pode atingir um teor de lipídeos de 50%, em peso e uma taxa de crescimento média anual de  $25 \text{ g/m}^2\cdot\text{dia}$ . A estimativa de Stephenson *et al.* (2010) considera apenas a área nominal da superfície dos reatores tubulares. Na prática, eles não ficam colados uns aos outros, o que implicaria numa diminuição em torno de 50% da produtividade em relação à área. Razon e Tan (2011) usaram uma etapa em reatores fechados e depois lagoas abertas, relatando a produtividade apenas da etapa aberta.

Concentração de biomassa - Chisti (2007) estima em  $4 \text{ kg/m}^3$ , Collet *et al.* (2010) em  $0,5 \text{ kg/m}^3$  e Khoo *et al.* (2011)  $0,5 \text{ kg/m}^3$ . A estimativa de Chisti se mostra muito superior a de Collet *et al.* apesar de ambos terem usado FBR tubular. A alta produtividade dos reatores tubulares de Stephenson *et al.* (2010) justificam uma altíssima concentração de biomassa no meio,  $8,3 \text{ kg/m}^3$ .

## **2.6. Economia na produção do biodiesel de microalgas**

A produção de óleo de alga requer uma habilidade de produzir a baixo custo grandes quantidades de biomassa de microalga rica em óleo, além de colher e extraílos de maneira eficiente e barata. Por causa desses gargalos tecnológicos o aproveitamento energético das microalgas ainda não se difundiu em escala comercial. A maioria dos estudos estão voltados para o barateamento dos custos nas etapas de produção, colheita e extração do óleo. Algumas empresas como a AlgaeVS®, Algaenesis® e Bodega Algae® estão empenhadas em liderar este nicho de mercado.

A fase de maior impacto no custo da produção do biodiesel está na produção da matéria-prima (60 – 75%), segundo vem à fase da colheita, que consiste em recuperar a biomassa do meio de cultura, podendo contribuir de 20-30% no custo de produção da biomassa (MATA *et al.*, 2010).

As maiorias das estimativas de produtividade de combustíveis de alga preveem que, com as tecnologias de produção atuais, o biodiesel de alga pode

ser manufaturado por, na melhor das hipóteses, US\$ 4,54 o galão, usando fotobiorreatores de alta densidade. Para competir com o diesel de petróleo dos Estados Unidos, sem auxílio de subsídios, esse preço teria que cair para US\$ 1,81 o galão, relativo ao preço dos combustíveis em 2006 (UM *et al.*, 2009).

A produção de biocombustível a partir de algas poderia ser um competidor surpresa no mercado de combustíveis alternativos em um futuro não tão distante, especialmente se o preço do petróleo continuar crescendo (UNICEF 2009).

Uma alternativa pode ser a queima da biomassa diretamente em termoelétricas substituindo o carvão mineral do que extrair os seus lipídeos (KADAM 2002 apud SCOTT *et al.*, 2010).

O custo estimado para produzir um quilograma de biomassa algal é US\$ 2,95 e US\$ 3,80 para o fotobioreator tubular e a lagoa aberta, respectivamente, de acordo com Chisti (2007). Estas estimativas assumem que o dióxido de carbono está disponível a custo zero. Se a capacidade de produção de biomassa anual é aumentada para 10.000 t, o custo da produção por quilograma reduz para aproximadamente US\$ 0,47 e US\$ 0,60 para o fotobioreator tubular e a lagoa aberta, respectivamente, por causa da economia de escala. O custo de um litro de óleo extraído seria, no mínimo, de US\$ 2,80. Isso assume que o processo de recuperação contribui 50% do custo do óleo recuperado. O processo de conversão de óleo em biodiesel adiciona US\$ 0,14/l. No ano de 2006, o biodiesel do dendê custava aproximadamente US\$ 0,66/l e o diesel de petróleo (petrodiesel) US\$ 0,49/l, excluindo as taxas e os custos de distribuição (CHISTI, 2007).

Segundo Chisti e Yan (2011) a produção de biocombustíveis líquidos de microalgas já é tecnicamente possível, contudo ainda muito custosa comparada aos combustíveis de petróleo. Uma estimativa financeira realizada por Davis, Aden e Pienkos (2011) encontrou que o custo da produção de lipídeos para atingir um retorno financeiro de 10% seria de US\$ 2,25 para LA e US\$ 4,78 para FBR por litro de óleo. Uma hidrogenização para produzir o

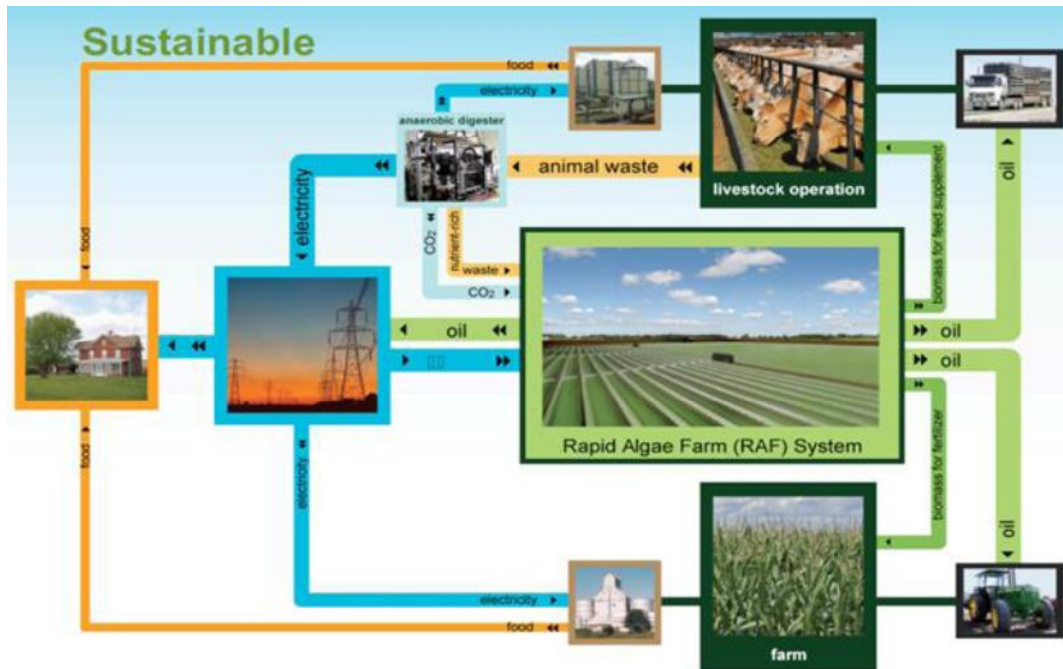
biodiesel adicionaria um valor marginal aos custos, totalizando US\$ 2,60 e US\$ 5,42 por litro respectivamente.

Produtos como combustíveis e alimentos são vendidos por menos de US\$ 1000 a tonelada. Uma tonelada de biomassa de microalgas para combustível tem que custar menos de US\$ 1000 para ser competitiva (BENEMANN, 2010). De acordo com RAWAT *et al.* (2011) a solução para a viabilidade econômica aponta para a possibilidade de uso de efluentes para o cultivo das microalgas com uma alta produtividade em lipídeos, maior que 505 mg/l.dia, no laboratório. O Quadro 2 resume algumas das várias empresas que estão surgindo no campo biotecnológico da cadeia de microalgas para produção de biocombustíveis.

**Quadro 2 – Empresas biotecnológicas na cadeia de microalgas**

Empresas	Área de atuação
MBD Energy Limited (www.mbdenergy.com)	A sua tecnologia usa as microalgas para tratar efluentes líquidos e gasosos e produzir biocombustível a partir da biomassa.
Bioprocess Algae valuing carbon (www.bioprocessalgae.com/technology)	Usa uma tecnologia de biofilmes destinada a produção de alimentos e combustíveis, usando dióxido de carbono proveniente de processos de fermentação, para cultivar as microalgas.
Helia (www.heliae.com)	Opera em escala comercial com tecnologia da cadeia de produção de combustíveis e alimento de microalgas usando fluxos residuais da indústria.
Open Algae (www.openalgae.com)	Tecnologia de extração de óleo em campo para microalgas de lagos naturais eutrofizados.
Algae venture systems (www.algaevs.com)	Tecnologia eficiente em colheita e secagem de microalgas.
Origin oil (www.originoil.com)	Tecnologia avançada na extração do óleo da biomassa em meio aquoso.
Algaetec (www.algaetec.com.au)	Cultivo e processamento das microalgas em biocombustíveis.
Algae Link (www.algaelink.com)	Cadeia de produção de bioprodutos de microalgas.
Solazyme (www.solazyme.com)	Bioprodutos de microalgas com ênfase em óleos.
Algevolve (www.algevolve.com)	Uso de efluentes tratados para cultivar microalgas.
Rwenergies (www.rwenergies.com)	Sistemas de cultivo em pequena e larga escala.
Lgem (www.lgem.nl)	Fotobiorreatores tubulares.
Algeternal (www.algeternal.com)	Fotobiorreatores tubulares.
Sapphireenergy (www.sapphireenergy.com)	Plantas comerciais de biocombustíveis de microalgas.
Solix Biofuels (www.solixbiofuels.com)	Sistemas de cultivo de microalgas.
Kuehnleagro (www.kuehnleagro.com)	Engenharia e genética para cultivo de microalgas.
Univerve Biofuel (www.univerve-biofuel.com)	Planeja uma planta comercial em 2014.
Algae.Tec (algaetec.com.au)	Planeja produzir comercialmente biocombustível de aviação na Europa.
Algaetech (algaetech.com.my)	Comercializar biocombustíveis de microalgas a partir da biorremediação de efluentes.

A empresa *Algae Venture Systems* acredita na inserção de uma cadeia de produção circular a partir das microalgas, isso significa praticamente a não geração de resíduos. Esta abordagem é considerada como um pensamento do Ciclo de Vida, Figura 14.



**Figura 14 – Ciclo fechado da cadeia de microalgas.**  
Fonte: AlgaeVS, 2009.

A empresa acredita, com esse pensamento, ser possível fechar o ciclo dos hidrocarbonetos e dos nutrientes, desenvolvendo sinergia entre a biodigestão e o cultivo de algas. Os produtos gerados são: água limpa, O<sub>2</sub>, energia e uma valiosa biomassa. Essa visão tornará o processo economicamente rentável. Esse conceito antecipa as necessidades locais para serem autorrentáveis e usar os escoamentos residuais de forma construtiva, conhecido como *upcycling* (Algaeopro, 2010).



## 2.7. Viabilidade, desafios e oportunidades

Segundo Chisti (2007), o custo da produção de biodiesel de microalga pode ser reduzido substancialmente pelo uso da estratégia de produção baseada em biorrefinarias, no melhoramento das capacidades das microalgas através da engenharia genética e nos avanços na engenharia de fotobiorreatores. A economia da produção de biodiesel baseado nas microalgas precisa melhorar consideravelmente para tornar-se competitiva com o diesel de petróleo, mas o nível de melhoramento necessário parece ser atingível (CHISTI, 2007).

Aumentando as taxas de crescimento e as concentrações celulares no meio de cultura ajudam a compensar a energia embutida nos materiais usados na infraestrutura dos FBR's e das LA's e reduz os custos de processamento posteriormente. O aumento do conteúdo lipídico, por unidade de massa das células, reduz as quantidades de nutriente necessárias, e também minimiza a quantidade de biomassa residual produzida após a extração. Ou seja, é necessário juntar todas as forças para viabilizar essa tecnologia o mais rapidamente, em particular pela integração da engenharia e da biologia (SCOTT *et al.*, 2010).

Os gases da combustão, o fornecimento de nutrientes e água provenientes de águas residuais, a digestão da biomassa residual e a comercialização de novos coprodutos representam grandes oportunidades para a viabilidade e a sustentabilidade do uso das microalgas para a produção de biocombustíveis.

De acordo com Sheehan (1998 *apud* UM *et al.*, 2009), o Laboratório Nacional de Energias Renováveis americano (NREL) delinea vários objetos de pesquisa incluindo desde o aumento da eficiência fotossintética das espécies de alga para uma alta produção de lipídeos até um controle de processo mais eficiente.

A cultura de microalgas rende produtos de alto valor agregado que poderiam compensar os custos de bens de capital e operação dos processos.

Alguns produtos seriam: carbono mineralizado do sequestro estável e compostos de alto valor comercial (ex. nutracéuticos). Selecionando espécies de algas apropriadas, um ou ambos podem ser produzidos (UM *et al.*, 2009; EARTHRISE, 2012).

Foi publicada na revista eletrônica BiodieselBR (2011a), uma entrevista com o diretor da empresa holandesa Ingrepro, Carel Callenbach, sobre a produção de biocombustíveis a partir das microalgas. Ele está convicto de que já é possível utilizar microalgas para tratar águas com resíduos. De acordo com ele, “o problema deixou de ser tecnológico e agora é de investimento no processo produtivo. Ele considera inviável utilizar os microrganismos para produzir apenas biocombustíveis, um produto com baixo valor agregado. Todavia considera muito conveniente usar as microalgas para tratar águas com resíduos ou fixar gases-estufa produzidos por fábricas. ‘Com isso, transformamos o carbono e os nutrientes presentes em dejetos em produtos capazes de oferecer lucros”, afirma o empresário. Para Callenbach, já seria possível instalar fotobiorreatores no topo de prédios onde as algas, alimentadas com a água e com os resíduos descartados pelas casas, produziram biomassa que, depois, seria vendida para biorrefinarias (BIODIESELBR, 2011). Existem microalgas que apreciam águas salobras ou águas residuais. O uso de tais microrganismos alivia a demanda por água doce e limpa, que costuma ser alta em culturas terrestres para produção de biocombustíveis, exemplo a soja e a cana-de-açúcar (BIODIESELBR, 2011a).

A solução para as microalgas é a comercialização de outros produtos e serviços para desenvolver um modelo de negócio crescente e sustentável. Alguns dos serviços ambientais podem incluir a mitigação de CO<sub>2</sub> e a redução da poluição, o tratamento de efluentes, a produção de biomassa e o calor residual para a geração de eletricidade (HENRIKSON, 2012).

Se a cadeia de microalgas para combustíveis agrega várias funções como: o tratamento de efluentes e o tratamento de gases de combustão para a produção de biomassa e esses serviços são contabilizados, isso pode aumentar a chance de implementação das microalgas em escala comercial.

Benemann (2010) diz que se alguém conseguir cultivar as microalgas de forma barata e coleta-las, conseqüentemente, será encontrado um aproveitamento para elas. Segundo o relatório U.S. DOE (2010), existe uma falta de pesquisa sobre o cultivo de microalgas alimentadas por efluentes e gases da combustão ao mesmo tempo.

Alguns resultados de análises de biocombustíveis de microalgas com outros agrocombustíveis se mostram bastante controversos (LAM e LEE, 2011; HOU *et al.*, 2011). Por isso, as microalgas não podem ser vistas como concorrentes, pois ainda há muito que ocorrer até os biocombustíveis ganharem escala significativa para concorrer com os combustíveis fósseis de maneira sustentável.

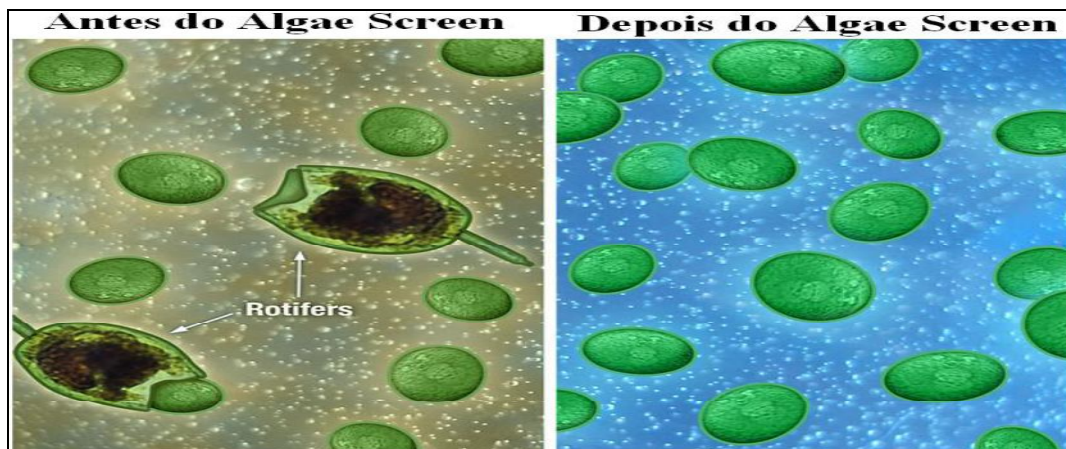
Rockström *et al.* (2009) apontam que os impactos das emissões de nitrogênio e fósforo na natureza são de maior relevância que os GEE em relação à capacidade de resiliência do planeta em diversas categorias de impacto. Por isso, as microalgas não devem ser vistas apenas como mais uma fonte de biocombustível, mas também como uma tecnologia capaz de resolver outras questões ambientais pelo uso dos efluentes como meio de cultivo.

A contaminação ocorre em praticamente todos os sistemas de cultivo, e é particularmente problemático em ambientes de lagoas abertas. Em relação ao uso da engenharia genética e de pesticidas, conforme Ana Teresa Lombardi, professora da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar):

‘Apesar de apresentar menor custo e maior facilidade de manutenção, em comparação com fotobiorreatores fechados, os tanques abertos têm alto risco de contaminação e inviabiliza a manipulação bioquímica da composição das microalgas – o fator que possibilita originar biomoléculas para a produção de diversos compósitos’ (ALISSON, 2011).

A tecnologia Algae Screen <sup>TM</sup> (ou Peneiramento Algal) emprega um impulso eletromagnético altamente sintonizado concebido para exterminar rotíferos, bactérias e ciliados. Esses predadores reduzem o rendimento das culturas de alga, consumindo a biomassa e óleos valiosos. Resolver esse

problema é a maior barreira para a produção em escala comercial, Figura 15 (ORIGNOIL, 2011).



**Figura 15 – Tecnologia Algae Screen™.**  
**Fonte: Orignoil, 2011.**

Uma potencial solução para combater a contaminação de predadores nos reatores de lagoas abertas é o cultivo de múltiplas espécies, também conhecido como culturas mixotróficas (KAZAMIA *et al.*, 2012).

## **2.8. Desafios identificados para a produção de biocombustíveis de microalgas**

Melhorias significativas na eficiência, custo e habilidade de aumento de escala do cultivo de microalgas, extração de lipídeos e produção de biocombustível precisam ser feitas para produzir biocombustíveis comercialmente viáveis. Com esse propósito, um conjunto definido de rupturas tecnológicas será requerido para a utilização ótima da biomassa de microalgas para a produção comercial de biocombustíveis (SINGH e OLSEN, 2011).

O Quadro 3 apresenta um resumo da situação atual e as perspectivas de produção de biocombustíveis a partir das microalgas, baseado em informações recentes sobre o desafio da sua produção em larga escala e suas implicações técnicas e ambientais. Pode-se caracterizar essa análise como uma Avaliação do Ciclo de Vida conceitual da produção de microalgas em escala real, sua situação atual e seus desafios futuros. Esta opção foi feita na medida em que

não se tem notícia de alguma planta comercial produzindo biocombustíveis de microalgas fotossinteticamente até o momento.

**Quadro 3 – Desafios para a implementação da produção de biocombustíveis de microalgas em larga escala.**

Fatores de produção	Oportunidades	Desafios
Fontes de CO <sub>2</sub>	De plantas industriais intensivas em energia <sup>1</sup> .	Escassez de área em parques industriais <sup>2, 11</sup> .
Fontes de Nutrientes	Tratamento secundário das ETEs.	Não foi bem estudado ainda <sup>3</sup> .
Consumo de Água	Pode ser recirculada.	Essa prática ainda não está bem estabelecida <sup>4</sup> .
Infraestrutura e Operação	Oferece maior controle no cultivo, principalmente os fotobiorreatores fechados.	Alto custo e atualmente é intensivo em energia <sup>5</sup> .
Fonte de Sol/luz	Regiões áridas são promissoras.	Os recursos têm que ser transportados através de longas distâncias e precisa-se de investimento em infraestrutura nessas áreas.
Temperatura	Lugares próximos a montanhas, florestas tropicais ou grandes corpos d'água oferecem temperaturas amenas.	Normalmente, esses lugares são protegidos. Em lugares áridos, o controle da temperatura pode ser um desafio <sup>6</sup> .
Espécies de algas	Estão sendo usados tipos de algas selvagens sem muita seleção ou muito melhoramento.	A alga deverá ser domesticada <sup>8</sup> .
Produtividade de óleo	Diminuir o nitrogênio do meio aumenta a produtividade da alga em lipídeos <sup>10</sup> .	Diminui a taxa de crescimento e consequentemente os custos de operação.
Contaminação da cultura	As microalgas do laboratório não suportaram as condições severas encontradas em campo.	Permitir que um contaminante nativo da região invadisse os reatores <sup>6</sup> .
Colheita das microalgas	Existem várias tecnologias sendo usadas e em desenvolvimento.	Deve ser adaptada a uma espécie, meio de cultivo e processamentos específicos <sup>7</sup> .
Extração de lipídeos	Existem tecnologias promissoras sendo desenvolvidas.	A escolha dependerá da espécie de alga e como ela foi cultivada <sup>8</sup> .
Biomassa	Pode ser aproveitada energeticamente a partir da conversão em diversas formas de combustível.	Nem todas elas foram testadas com sucesso. Os testes estão em escala piloto ainda <sup>9</sup> .

**Fontes:** Campbell *et al.*, 2010<sup>1</sup>; Pate *et al.*, 2011<sup>2</sup>; Park *et al.*, 2011 e Christenson & Sims 2011<sup>3</sup>; Yang *et al.*, 2011<sup>4</sup>; Norsker *et al.*, 2011<sup>5</sup>; NREL 1998<sup>6</sup>; Uduman *et al.*, 2010 e Mata *et al.*, 2010<sup>7</sup>; Rawat *et al.*, 2011 e Benemann 2010<sup>8</sup>; Singh & Olsen 2011<sup>9</sup>; Lardon *et al.*, 2009<sup>10</sup>; Stephenson *et al.*, 2010<sup>11</sup>.

Se as rupturas tecnológicas citadas por Singh e Olsen (2011) ocorrerem, os biocombustíveis de microalgas desempenharão um papel fundamental como energias alternativas de médio à longo prazo. Esses autores afirmam que ainda é muito cedo para comentar qual é a rota de produção preferencial das microalgas. As tecnologias de produção de biocombustíveis de microalgas

ainda estão enfrentando alguns obstáculos de pesquisa e desenvolvimento antes de se tornarem viáveis (UM *et al.*, 2009).

### **3. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)**

De acordo com Sinden (2009) a Avaliação do Ciclo de Vida é utilizada para estimar o potencial impacto ambiental de uma atividade ou de um conjunto de atividades interligadas. Essa ferramenta articula o conhecimento de várias ciências e exige uma boa experiência do analista na hora de aplicá-la a algum estudo de caso.

Segundo a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009) ACV é uma técnica de avaliação de aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um sistema de produto através da:

- Compilação de inventário de insumos e emissões no sistema produtivo;
- Avaliação potencial dos impactos ambientais associados com os insumos e as emissões;
- Interpretação dos resultados da análise do inventário e das fases da análise do impacto em relação aos objetivos do estudo.

#### **3.1. Etapas da ACV**

A ACV se divide em quatro fases distintas, são elas: objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação de resultados. Todas as fases estão interligadas e se comunicam entre si até se conseguir gerar informações de valor para determinadas aplicações.

### 3.1.1. Objetivo e Escopo

O objetivo de um estudo da ACV deve declarar inequivocamente a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo (ABNT NBR ISO 14040, 2009). O escopo delinea e caracteriza todo o sistema.

Na definição do escopo de um estudo da ACV, devem constar alguns itens como:

- unidade funcional<sup>1</sup>;
- o sistema de produto a ser estudado;
- as fronteiras do sistema<sup>2</sup> de produto;
- procedimentos de alocação;
- tipos de impacto e metodologia de avaliação de impacto e interpretação subsequente a ser usada;
- requisitos dos dados;
- suposições;
- limitações;
- requisitos da qualidade dos dados iniciais;
- tipo de análise crítica, se aplicável; e
- tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

### 3.1.2. Análise do Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Conforme Ferreira (2004) a análise do inventário envolve a coleta de dados e procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas, ou

---

<sup>1</sup> Unidade Funcional - desempenho quantificado de um sistema de produto para uso como uma unidade de referência (PE INTERNATIONAL, 2008).

<sup>2</sup> Fronteira do sistema - define o conteúdo da avaliação do ciclo de vida executada. Ela foca na necessidade de decidir quais processos devem ser incluídos (PE INTERNATIONAL, 2008).

fluxos elementares<sup>3</sup>, pertinentes a um sistema de produto. Os dados qualitativos e quantitativos para inclusão no inventário devem ser coletados para cada unidade de processo<sup>4</sup> incluída dentro das fronteiras do sistema. Segundo o USEPA (2006) o ICV é o processo de quantificar a energia e os insumos, emissões atmosféricas, esgoto, resíduos sólidos e outras emissões, ao longo de todo o ciclo de vida do produto, processo ou serviço.

Um estudo de ACV é exaustivo em informações. Isso exige tempo e dinheiro. A empresa alemã PE International (2008), com vinte anos de experiência no ramo de avaliação de sustentabilidade, afirma que os resultados de um estudo de ICV estão relacionados a um respectivo problema. Os esforços para encontrar uma resposta e a qualidade da resposta devem ser balanceados com a complexidade e a importância da pesquisa. Para comparar resultados de pegada ambiental de diferentes produtos, é preciso levar em conta a metodologia utilizada em cada cálculo como, por exemplo, as fronteiras adotadas em cada sistema e a qualidade dos dados (PE INTERNATIONAL, 2008).

Para reduzir o consumo de tempo e os custos de um estudo de ciclo de vida, a coleta de dados deverá ser limitada aos mais importantes no sentido de responder às questões propostas. É para estes dados chaves que uma alta qualidade (validação, nível de detalhes, completude e representatividade) é requerida, enquanto na parte restante do estudo podem ser aplicados dados padrões ou mesmo serem desconsiderados (FERREIRA, 2004). Então, a identificação de dados chaves, a partir da avaliação de impacto, pode ser usada para orientar a coleta de dados em um estudo específico. Isso mostra como a estrutura da ACV é bastante interativa.

---

<sup>3</sup> Fluxos elementares - energia ou materiais provenientes da natureza sem transformação humana prévia que entram no sistema em estudo, ou material ou energia que são emitidos no ambiente sem transformação humana subsequente que saem do sistema em estudo (PE INTERNATIONAL, 2008).

<sup>4</sup> Unidade de processo - o menor elemento considerado na análise do inventário do ciclo de vida, no qual dados de entrada e de saída são quantificados (PE INTERNATIONAL, 2008).



### 3.1.3. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV)

A fase de avaliação do impacto da ACV é dirigida à avaliação da significância de impactos ambientais potenciais, usando os resultados da análise de inventário do ciclo de vida. Em geral, este processo envolve a associação de dados de inventário com impactos ambientais específicos e a tentativa de compreendê-los (FERREIRA, 2004).

Segundo o USEPA (2006) a AICV é a estimativa do potencial de impacto à saúde humana e ambiental proveniente da extração de recursos naturais e das emissões identificados na etapa de inventário (ICV). A AICV não necessariamente tenta quantificar um impacto específico associado com um produto, processo ou atividade, na verdade, ela procura estabelecer uma ligação entre um sistema e seus potenciais impactos.

### 3.1.4. Interpretação do Ciclo de Vida

Interpretação é a fase da ACV na qual as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto são combinadas com o objetivo e o escopo definidos, visando alcançar conclusões e recomendações (ISO 14044, 2009).

A Interpretação do Ciclo de Vida é uma técnica sistemática para identificar, quantificar, checar e avaliar informações dos resultados do ICV e AICV, e comunicá-las efetivamente (USEPA, 2006).

## **3.2. ACV da produção energética a partir das microalgas**

O estudo do ciclo de vida de um produto é uma ferramenta fundamental para entender como um combustível se relaciona com seus insumos e com o meio ambiente, calculando o balanço de recursos e emissões, bem como seus respectivos impactos. Por Ciclo de Vida, entendem-se todas as operações envolvidas desde o plantio de uma oleaginosa, no caso do biodiesel, ou desde a perfuração do poço, no caso do diesel, até a sua combustão nos motores (BIODIESELBR, 2009).

Conforme Panichelli *et al.* (2009), para se certificar se o biodiesel é menos poluente que o diesel, ou comparar as emissões de GEE entre biodieseis, derivados de diferentes matérias-primas, é preciso fazer uma Análise do Ciclo de Vida para cada um deles.

Existem vantagens e desvantagens no setor de biocombustíveis. De um lado, os requisitos em recursos naturais podem ser debilitantes e os ganhos energéticos questionáveis. Do outro lado, a produção de óleo pode ser sustentável, renovável e acessível (CHISTI e YAN, 2011).

Os biocombustíveis de algas são um campo de pesquisa que avança rapidamente com vários estudos focando nas tecnologias de produção, separação e processamento. Entretanto, existem relativamente poucos estudos na sustentabilidade de longo prazo e de análise do ciclo de vida das rotas de biocombustíveis de algas (SANDER e MURTHY, 2010).

De acordo com Batan *et al.* (2010), os biocombustíveis obtidos a partir de microalgas têm potencial para substituir combustíveis derivados do petróleo e de biocombustíveis de primeira geração, entretanto a eficácia com que as metas de sustentabilidade pode ser alcançada depende do impacto do ciclo de vida do processamento das microalgas para biocombustível.

Um exemplo de como estudos de ACV podem auxiliar os tomadores de decisão no que se refere à implementação de tecnologias de menor impacto ambiental é o estudo de Jorqueira e colaboradores (2009). Através de um estudo comparativo do consumo energético do ciclo de vida entre os sistemas de cultivo de microalgas em lagoas abertas, fotobiorreatores de placas planas e os de placas tubulares horizontais concluiu-se que os primeiros apresentam uma maior produtividade energética em relação às outras opções.

Um estudo comparativo de ACV de uma instalação virtual, devido aos estudos realizados neste assunto terem se restringido a escalas piloto e laboratoriais, foi realizado para avaliar o balanço energético e os potenciais impactos ambientais de toda a cadeia de produção das microalgas para

combustível, desde o cultivo da biomassa até a combustão do biodiesel (LARDON *et al.*, 2009).

A escolha das espécies de microalgas tem que ser provavelmente considerada em concordância com a extração, e as espécies, na qual a recuperação do óleo é mais fácil, deve ser considerada como prioridade. A digestão anaeróbia da torta poderia produzir biogás o qual pode ser usado diretamente para fornecer calor e eletricidade para a unidade de extração de óleo, mas também remineralizar parte dos nutrientes armazenados na alga, principalmente na forma de amônia e fosfato. Uma produção em larga escala pode ser seriamente considerada sob o alcance das seguintes melhorias: escolha de espécies de microalga com altos teores de lipídeos e baixo conteúdo de proteínas com taxas de crescimento sustentadas, configuração de métodos de extração eficientes, e a recuperação de energia e nutrientes contidos na torta. Os autores enfatizam o potencial da digestão anaeróbica da torta gorda como uma maneira de reduzir a demanda energética externa e reciclar uma parte dos fertilizantes minerais. É perceptível que a maioria dos impactos são dirigidos principalmente pelo consumo energético, combustão do combustível e uso de fertilizantes (LARDON *et al.*, 2009).

O objetivo chave do estudo de Lardon *et al.* (2009) não foi oferecer uma ACV da tecnologia atual de biodiesel de microalgas, porém identificar os obstáculos e as limitações que deveriam receber esforços específicos de pesquisa para tornar esse processo ambientalmente sustentável. No estudo deles, foram usadas suposições razoáveis e tentou-se minimizar a proporção de escolhas arbitrárias para desenhar o melhor processo de biocombustível baseado em microalgas, com as tecnologias disponíveis, até o momento da realização do estudo. O resultado confirmou o potencial das microalgas como fonte energética, todavia ressaltou a necessidade de diminuição do consumo de energia e fertilizantes.

O estudo de ACV, conduzido por Clarens e colaboradores (2010), buscou determinar os impactos associados à produção de biomassa de microalgas, usando um modelo de ciclo de vida estocástico, comparando-o com a produção de capim, canola e milho.

Os resultados indicaram que aquelas culturas convencionais possuem menor impactos ambientais que as microalgas nas categorias de uso de energia, emissões de gases de efeito estufa e uso de água, desconsiderando um local específico de cultivo. Apenas em uso total da terra e potencial de eutrofização as microalgas desempenharam favoráveis. A larga pegada ambiental do cultivo de algas é guiado predominantemente pelos impactos a montante, como a demanda por CO<sub>2</sub> e fertilizante. Para reduzir estes impactos, o uso de gases da combustão e, numa maior extensão, águas residuais poderiam minimizar a maioria das cargas ambientais associados às algas. Para demonstrar os benefícios da produção de algas acoplada com o tratamento de águas residuais, o modelo foi expandido para incluir três tratamentos municipais de efluentes residuais diferentes como fonte de nitrogênio e fósforo. Cada um forneceu uma redução significativa nas cargas ambientais do cultivo de microalgas. O uso da urina separada na fonte mostrou fazer das microalgas uma fonte de biomassa mais ambientalmente benéfica que as culturas terrestres analisadas (CLARENS *et al.*, 2010).

Uma análise detalhada, modelo de engenharia em escala industrial para a espécie *Nannochloropsis sp.* através de uma arquitetura de fotobiorreator, foi conduzida por Batan e colaboradores (2010). O modelo, em nível de processo real, foi integrado a uma análise de energia e de emissões de gases estufa do ciclo de vida compatível com o método e os limites do *Argonne National Laboratory GREET model* para assegurar uma comparabilidade a avaliações de ciclo de combustíveis preexistentes. Os resultados foram utilizados para avaliar a Razão de Energia Líquida (REL), definida como a razão entre a energia produzida pela que foi utilizada, e emissões líquidas de Gases de Efeito Estufa (GEE) do biodiesel de microalgas em comparação as do diesel de petróleo e biodiesel à base de soja do cultivo à bomba do posto. A REL resultante da cadeia de biodiesel de microalgas foi de 0,93. Em termos de GEE, os biocombustíveis de microalgas evitam 75g de emissões de CO<sub>2</sub>e por MJ de energia produzida (BATAN *et al.*, 2010).

Liu e colaboradores (2009) conduziram uma ACV da produção de metanol, a partir de microalgas, a fim de identificar e quantificar as emissões para o ambiente e a eficiência energética do sistema em todo o ciclo de vida,

incluindo: o cultivo e a conversão das microalgas em metanol, o transporte e o uso final do combustível. A REL da energia do metanol produzido foi de 1,24. Assim, os resultados indicaram que a rota de produção analisada era viável como um processo de produção de energia. Os autores também compararam o metanol de microalgas com a gasolina e o primeiro se mostrou menos impactante.

O estudo de Lardon e outros (apud SCOTT *et al.*, 2010) de uma ACV do biodiesel produzido inicialmente a partir da *Chlorella Vulgaris* cultivada em lagoas abertas com nitrogênio suficiente ou limitado concluiu-se que a extração do óleo das microalgas com solvente resultou numa penalidade energética significativa, especialmente se a biomassa for secada antes da extração.

Scott *et al.* (2010) encontraram que 1 MJ de energia no biodiesel de microalgas requereu o gasto de 1,66 MJ. A Análise do Ciclo de Vida sugeriu que, usando os processos disponíveis no momento do estudo, a produção seria inviável em termos de REL e GEE. Os autores concluíram que os esquemas esperados para o escalonamento da produção de microalgas precisam ser definidos por uma cuidadosa modelagem de processo e ACV desde a etapa de projeto. Sem uma avaliação cuidadosa dos balanços de energia e dos impactos ambientais, existem riscos de muitos esquemas propostos perderem sentido do ponto de vista da sustentabilidade.

Um estudo conduzido por Liu *et al.* (2011), usando seis modelos de produção de microalgas para biodiesel para derivar uma aproximação média, detectou que o ganho energético da produção de microalgas advém apenas quando a biomassa residual, proveniente da etapa de extração do óleo, é aproveitada, por exemplo, na produção de biometano.

O estudo de Stephenson *et al.* (2010) comparou a produção de biodiesel de microalgas, utilizando o cultivo em lagoas abertas e em fotobiorreatores tubulares horizontais, com o diesel de NER 0,86 e emissões de GEE de 3,7 kg CO<sub>2</sub>e por kg de diesel queimado em veículos. Os autores constataram que a rota usando lagoas abertas produzia um biodiesel com uma demanda de energia fóssil de 85% e uma emissão de GEE de 78% menor que as do diesel.

Por outro lado, quando foi usado fotobiorreatores de placas planas na etapa de cultivo a demanda de energia fóssil e as emissões de GEE aumentaram em 362 e 273% respectivamente.

O Quadro 4 compara as conclusões de alguns estudos de avaliação energética de diferentes produtos a partir de microalgas feitas por diferentes grupos de pesquisa, usando o pensamento de ciclo de vida.

**Quadro 4 - Comparação de resultados de balanço energético de biocombustíveis de microalgas numa perspectiva de ciclo de vida.**

Autores	Produto	Positivo	Negativo
Lardon <i>et al.</i> (2009)	Biodiesel de microalgas	X	
Clarens <i>et al.</i> (2010)	Biomassa de microalgas	X	
Liu <i>et al.</i> (2009)	Metanol de microalgas	X	
Scott <i>et al.</i> (2010)	Biodiesel de microalgas		X
Jorquera <i>et al.</i> (2010)	Biomassa de microalgas (análise de três modelos)	X	X
Stephenson <i>et al.</i> (2010)	Biodiesel (análise de dois modelos)	X	X
Liu <i>et al.</i> (2011)	Biodiesel de microalgas (análise de seis modelos)	X	X
Razon and Tan (2011)	Biodiesel e metano de microalgas (análise de dois modelos)		X

Pode-se notar que alguns resultados do balanço energético foram positivos e negativos. Isso significa que foram feitas análises de várias alternativas de produção.

Clarens *et al.* (2011) compararam diferentes rotas de conversão da biomassa de microalgas em combustível e/ou energia elétrica. A Tabela 8 mostra diferentes combinações tecnológicas do aproveitamento energético das microalgas.

**Tabela 8 - Comparativo entre a REL de diferentes rotas de aproveitamento energético de microalgas.**

Cenário	Rota	1. CO <sub>2</sub> comercial	2. Gás da combustão	3. Suplementação de efluente
A.	Biodiesel + Digestão Anaeróbia	0,65	1,11	1,13
B.	Biodiesel + Combustão Direta da biomassa residual para Bioeletricidade	0,99	1,99	1,99
C.	Combustão Direta total da biomassa para Bioeletricidade	1,53	4,1	4,09

**Fonte: Adaptado de Clarens *et al.*, 2011.**

Cada rota foi modelada para três cenários de aquisição de insumos: 1) CO<sub>2</sub> comercial virgem; 2) Compressão direta de gás da combustão; 3) Gás da combustão e efluente doméstico para recuperar a água evaporada e suprir uma pequena parte da demanda de nutrientes. De acordo com a Tabela 8, a produção de biodiesel a partir das microalgas mostrou-se viável do ponto de vista energético nos cenários 2 e 3. Devido aos processos de conversão da biomassa de microalgas em biodiesel serem intensivos em energia, principalmente na etapa de secagem da biomassa e extração do óleo, a rota C teve a REL mais favorável entre os outros.

O uso da alocação dos coprodutos em relação a outras fontes poderia tornar as algas uma alternativa mais sustentável. A alocação dos coprodutos minimiza a carga ambiental do biodiesel de microalgas e ainda gera relativos ganhos quando substitui um produto concorrente mais poluente.

Sander e Murthy (2010) realizaram uma ACV *well-to-pump* (do poço à bomba, ou seja, até o posto de combustível) para investigar a sustentabilidade e o balanço energético de uma cadeia de produção de biodiesel de microalgas, considerando o sistema de cultivo de lagoas abertas. Diagnosticou-se que as emissões de GEE do biodiesel de microalgas, para o cenário onde foi utilizado filtro de pressão na etapa de colheita, foram negativas, ou seja, elas sequestram carbono. O cenário que usou a centrífuga teve um balanço de emissões positivo e até maior que o da gasolina.

Os ganhos de energia e créditos de carbono verificados no estudo de Sander e Murthy (2010) são atribuídos à substituição do milho por torta de microalgas para a produção de etanol. O aproveitamento integral da biomassa de microalgas tornaram os biocombustíveis de microalgas mais atrativos do ponto de vista ambiental, com relação às emissões de GEE, em comparação as opções fósseis.

Como foi visto neste capítulo, vários estudos concluíram a respeito do potencial das microalgas como fonte de combustível. Porém, segundo Sander e Murthy (2010), estudos de ACV mostram claramente uma necessidade de

novas tecnologias para tornar os biocombustíveis de algas sustentáveis em realidade comercial.

Lardon *et al.* (2009) discutem a importância do uso da ACV na avaliação de tecnologias em transição. Segundo os autores, a ACV aparece como uma ferramenta relevante – com a finalidade de avaliar novas tecnologias para produção energética. Mesmo lidando com tecnologias jovens e imaturas, essa ferramenta identifica os gargalos tecnológicos, portanto apoia o ecodesign de uma cadeia de produção mais eficiente e sustentável.

#### **4. METODOLOGIA**

Uma revisão bibliográfica sobre o tema foi realizada, conforme apresentado nos capítulos anteriores, a fim de identificar as tecnologias existentes e em desenvolvimento para a produção de produtos energéticos a partir das microalgas. Em seguida, definiu-se um estudo de caso de Análise do Ciclo de Vida (ACV), visto que foram avaliados apenas dois aspectos ambientais. A revisão bibliográfica realizada serviu como embasamento na decisão a respeito das tecnologias que iriam compor os cenários a serem avaliados neste estudo de caso.

No levantamento das informações foram estudados diversos periódicos publicados referentes ao tema, experiências das pesquisas desenvolvidas pelo Laboratório de Energia e Catálise (LABEC) da Universidade Federal da Bahia (UFBA), bancos de dados de Inventário de Ciclo de Vida (ECOINVENT v2.2, 2012) e estimativas de especialistas para a modelagem do ciclo de vida proposto. Nas próximas seções, serão detalhados os parâmetros utilizados na modelagem da Razão de Energia Líquida (REL) e dos Gases do Efeito Estufa (GEE) para produzir energia térmica, partindo da biomassa das microalgas do gênero *Nannochloropsis*.

Comparou-se a produção de biomassa de microalgas usando dois métodos de cultivo diferentes: reatores de Lagoas Abertas (LA) e os



Fotobiorreatores de Placas Planas (FPP), e, na etapa de colheita, incluindo os processos de floculação, centrifugação e secagem numa estufa solar com o intuito de produzir uma biomassa de microalgas apta para a produção energética através da combustão. Foi escolhida a combustão como processo de aproveitamento energético da biomassa de microalgas devido à conclusão do estudo de Clarens *et al.* (2011) responsável pela avaliação de diferentes rotas de conversão da biomassa de microalgas em produtos energéticos para uso veicular, sendo elas: biodiesel, biodigestão e combustão para eletricidade, nas quais esses produtos seriam usados para transporte. Eles constataram que a rota da combustão trazia o maior retorno energético no REL pelo fato das outras rotas precisarem de mais energia no processamento da biomassa, nas etapas de secagem, na extração de lipídeos, e na conversão do óleo e da torta em combustíveis, como mostra a Tabela 8.

Outro ponto proposto nesta avaliação, como uma alternativa mais viável para o aproveitamento energético das microalgas, foi o uso do CO<sub>2</sub> residual da combustão e o efluente doméstico, em substituição aos insumos comerciais na etapa de cultivo (YOO *et al.*, 2009; YANG *et al.*, 2010). Baseado na afirmação anterior modelou-se dois cenários para cada rota de produção de biomassa de microalgas, um usando o dióxido de carbono, proveniente da combustão e fertilizantes comerciais, e o outro utilizando, além do dióxido de carbono da combustão, a água e os nutrientes de duas fontes: efluente doméstico tratado e água de rejeito de dessalinizadores.

O seguinte trabalho avaliou do berço-ao-túmulo à produção de energia térmica a partir de microalgas em duas rotas, cada uma com dois cenários distintos. A escolha se deu numa avaliação preliminar na qual foi constatado que as maiores fontes de impacto eram provenientes da fase de cultivo. A partir desse resultado, decidiu-se comparar dois sistemas de cultivo distintos: FPP e LA.

Todas as informações coletadas de diversas fontes foram organizadas em planilhas e depois esses dados foram inseridos no Simapro 7.3 ® (software

de ACV utilizado nessa pesquisa) em que foram processadas as análises e avaliados os resultados obtidos.

Esta análise teve como objetivo aplicar os procedimentos da ferramenta de Avaliação do Ciclo de Vida aos cenários de produção de biomassa de microalgas destinadas ao aproveitamento térmico e compará-las com algumas fontes fósseis.

#### **4.1. Objetivo e escopo**

A definição do objetivo e do escopo é a primeira etapa de um estudo de ACV. Essa etapa precisa ser claramente definida, consistente com os princípios do estudo e deve considerar os anseios dos atores envolvidos no processo. A elaboração desse subcapítulo 'Objetivo e escopo' foi baseada tanto na norma ABNT NBR ISO 14040 e 14044 quanto no modelo de inventário da consultoria alemã PE International (2008) e também na metodologia de elaboração de inventários do Ecoinvent (FRISCHKNECHT *et al.*, 2007).

O objetivo principal do estudo de caso foi comparar entre si quatro cenários de produção de biomassa, a partir de microalgas, usando diferentes sistemas de cultivo e, em seguida, comparar a geração de energia térmica entre esses cenários de produção com algumas opções fósseis. O balanço energético foi medido através da divisão entre a energia total produzida pela energia total primária utilizada no ciclo de vida, a REL, juntamente com as emissões dos GEE para produzir biomassa de microalga *Nannochloropsis sp.* apta a ser queimada numa termelétrica. A metodologia desse estudo inspirou-se em Jorquera *et al.* (2009).

##### **4.1.1. Unidade funcional**

Assumiu-se que a qualidade da biomassa produzida pelos diferentes métodos seria a mesma em todos os cenários avaliados. O Poder Calorífico Inferior (PCI) de 1 kg de biomassa de *Nannochloropsis sp.* foi calculado baseado na composição química da sua biomassa e na entropia de reação, resultando numa estimativa de 18,26 MJ/kg de PCI, APÊNDICE I. A unidade

funcional desse estudo foi à produção de 20 MJ de PCI. Esse valor foi usado tanto na comparação entre as Razões de Energia Líquida quanto nas emissões de Gases Efeito Estufa, quando comparadas com os fósseis. Ou seja, a energia na forma de calor produzida a partir da queima em uma termelétrica movida à biomassa da *Nannochloropsis sp.* Compararam-se as emissões das microalgas com a de algumas opções fósseis: gás natural, petróleo e carvão mineral.

#### 4.1.2. Sistemas de produção e fases do ciclo de vida

Este estudo comparativo foi realizado até a etapa de produção da biomassa seca no ciclo de vida da produção energética a partir das microalgas, composto por quatro etapas principais, ilustrado na Figura 16:

I. Produção da biomassa - cultivo da microalga de água salina *Nannochloropsis sp.* pelas seguintes rotas:

- a. Reatores de lagoa aberta (LA)
- b. Reatores fechados de placas planas (FPP)

O transporte dos fertilizantes foi incluído. Não foram considerados os transportes externos do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e da água (H<sub>2</sub>O) até fazenda de microalgas, apenas o da circulação deles dentro da própria fazenda.

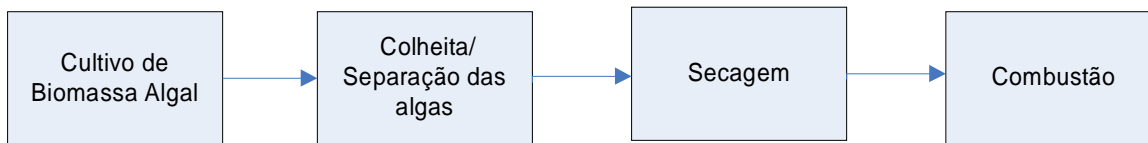
II. Colheita da biomassa de microalgas - a concentração do meio de cultivo numa pasta de microalgas se deu por dois processos:

- a. Floculação seguida de decantação
- b. Centrifugação

Considerando-se que ambos os processos se encontram na mesma planta, então, gastos com transporte foram desconsiderados nesta etapa.

III. Secagem da biomassa - nessa etapa, considerou-se uma estufa solar, assumindo que o clima da região é favorável ao uso dessa tecnologia.

IV. Combustão - foi considerado que a combustão das microalgas teria desempenho similar ao aproveitamento energético da madeira numa termelétrica, levando em consideração as diferenças entre os poderes caloríficos de cada matéria-prima.



**Figura 16 – Rota tecnológica considerada no estudo para produção de energia térmica a partir de microalgas.**

Tendo em vista a escassez de dados de escala piloto ou industrial da rota de produção de biomassa de microalgas, tentou-se usar dados da literatura que melhor expressassem a realidade da indústria para os inventários da cadeia principal, visto que eles diferem bastante da eficiência dos processos laboratoriais. Portanto, a meta foi usar o melhor dado genérico encontrado na literatura científica, em balanços estequiométricos, relatórios, estimativas, entre outros.

Foram comparadas duas rotas principais de produção, LA para a rota partindo do cultivo em lagoas abertas e FPP para a rota partindo dos fotobiorreatores de placas planas, totalizando quatro cenários de produção de biomassa de microalgas:

- LA1 Biomassa de alga, lagoa aberta, CO<sub>2</sub> residual e fertilizante comercial;
- LA2 Biomassa de alga, lagoa aberta, CO<sub>2</sub> residual e efluente doméstico;
- FPP1 Biomassa de alga, placa plana, CO<sub>2</sub> residual e fertilizante comercial;
- FPP2 Biomassa de alga, placa plana, CO<sub>2</sub> residual e efluente doméstico.

A fronteira do estudo vai desde a chegada dos insumos básicos para a etapa de cultivo, colheita e combustão até a entrega do produto final que, neste estudo, são 20 MJ de calor, denominado Poder Calorífico Inferior (PCI). A princípio, serão excluídos processos terciários ou de infraestrutura como: construções civis, equipamentos e máquinas. Segundo Goedkoop *et al.* (2008) essa escolha caracteriza o estudo numa ACV completa de segunda ordem, ou seja, excluindo os bens de capital.

Em relação à alocação de processos (coprodutos) ou de produtos (cenários específicos de aplicação) não foi necessário usá-la devido à

produção de um único produto, energia térmica na forma de calor, e não considerar uma aplicação geográfica pré-definida. Esse estudo de caso foi voltado mais para a avaliação da tecnologia em si.

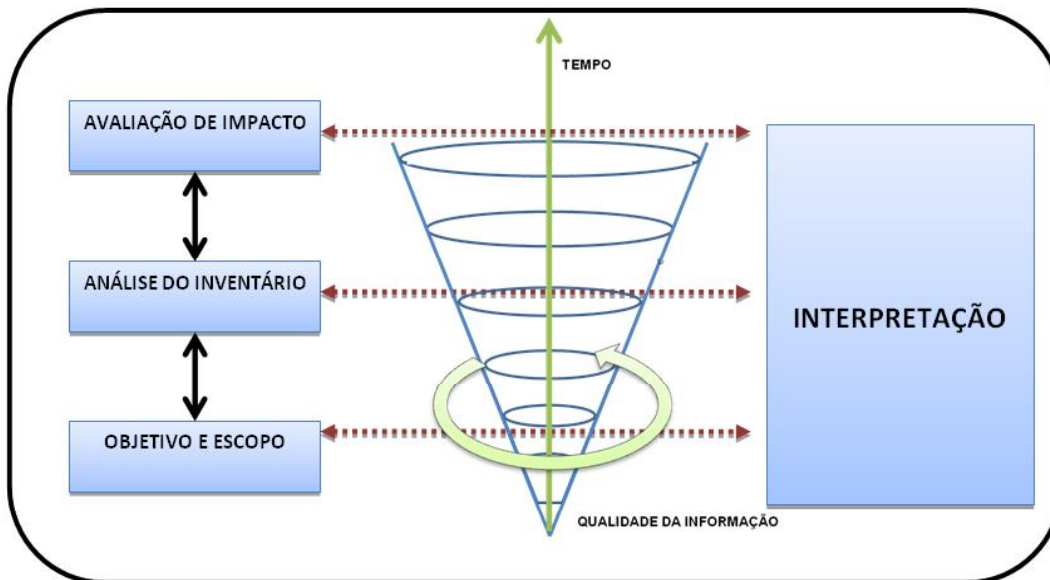
#### 4.1.3. Definições, suposições e limitações

Por se tratar de um estudo exploratório, não havendo uma quantidade significativa de dados primários disponíveis para essa modelagem, foram assumidas algumas hipóteses baseadas na literatura científica, como será mostrado no item 4.2 Inventário. Não obstante, essa avaliação permitiu identificar os principais gargalos e a ordem de grandeza dos aspectos e impactos ambientais.

Como estabelece a norma NBR ISO 14040 (2009) um estudo de ACV deve proporcionar transparência quanto às suas suposições e limitações, visando aumentar sua confiabilidade.

No requisito de qualidade dos dados, essa ACV buscou atender os seus objetivos sem muita restrição quanto à aplicação dessa tecnologia numa determinada localidade. Devido à natureza do estudo (ACV estocástica e simplificada), ao curto tempo disponível e à escassez dos dados para a realização do estudo, não houve muita restrição quanto à qualidade dos dados.

Utilizou-se a metodologia do Cone Invertido, desenvolvida pelo TECLIM, para o melhoramento contínuo do inventário, ao longo do tempo de execução deste projeto, à medida que dados mais confiáveis da literatura ou de experimentos do LABEC eram disponibilizados, Figura 17.



**Figura 17 – Desenho esquemático do método do cone invertido.**  
**Fonte: TECLIM e COELBA, 2009.**

Primeiramente, monta-se o inventário com os dados mais disponíveis (primeiros dados encontrados) mesmo que se tenha baixa confiança quanto à sua qualidade. Em seguida, identificam-se os dados de maior influência nos resultados para uma determinada categoria de impacto, ex. GEE, a fim de melhorar os dados com maior relevância no impacto total do produto analisado.

#### 4.1.4. Método de avaliação de impacto

Devido à falta de disponibilidade de métodos de avaliação de impacto regionais para a realidade brasileira, decidiu-se priorizar duas categorias de impacto de efeito global: mudanças climáticas (método IPCC 2007) e consumo de energia primária (Cumulative Energy Demand, CED) para avaliar o REL.

Uma categoria de impacto importante na avaliação ambiental de biocombustíveis é o uso da terra. Neste estudo de caso, não foi considerada essa categoria devido às altas produtividades das microalgas o que requer, conseqüentemente, pouca área de cultivo, além de não necessitarem de solo de qualidade, ou seja, não competirem por terras agricultáveis.

## 4.2. Inventário

Esta pesquisa buscou inspiração no estudo de Jorquera *et al.* (2009) ampliando seu escopo com adaptações e incrementos. Para cadeia produtiva de processos auxiliares (ou insumos básicos, ex. fertilizantes) foi utilizada a base de dados do Ecoinvent v2.2 (2012).

Devido ao desconhecimento a respeito da produção comercial de produtos energéticos a partir das microalgas, não foi possível usar dados da indústria como prioriza a norma ABNT NBR ISO 14040 (2009), em virtude da indisponibilidade desses dados. Sendo assim, foram usados dados de diversas fontes na construção do inventário da cadeia em estudo, na qual se encontram devidamente referenciadas.

Alguns requisitos de qualidade dos dados utilizados são destacados a seguir:

Tempo e área de referência: o ano de publicação dos dados usados no inventário é misto. A área de referência suposta foi o semiárido nordestino pela abundância de luz solar e efluente salobro, favoráveis para o cultivo da *Nannochloropsis sp.*, apesar dos dados de produtividade dessa região ainda serem pouco conhecidos. Os processos de segunda ordem (insumos básicos) foram do banco de dados Ecoinvent v2.2 (2012) referentes à região Europeia, com as matrizes energéticas predominantemente fósseis.

Cobertura tecnológica: montou-se uma cadeia de produção baseada nas tecnologias em desenvolvimento e tecnologias já existentes, buscando modelar cenários que tendessem a apresentar maior propensão de se tornarem comercialmente viáveis. A partir de duas rotas tecnológicas, foram modelados dois cenários em cada rota, a fim de avaliar as oportunidades de aumento da ecoeficiência na produção. Os dados da produção de algas, da separação, da secagem e da combustão foram baseados em estatísticas, estimativas, cálculos e na literatura.

Compleitude: todos os fluxos relevantes foram quantificados.

Representatividade: os dados representam uma situação realista, porém hipotética.

Plausibilidade: utilizou-se o banco de dados Ecoinvent v2.2 (2012) na maior parte dos inventários de insumos básicos considera-se um volume de massa maior que 95% do total e de carga ambiental maior que 95% do total em seus inventários.

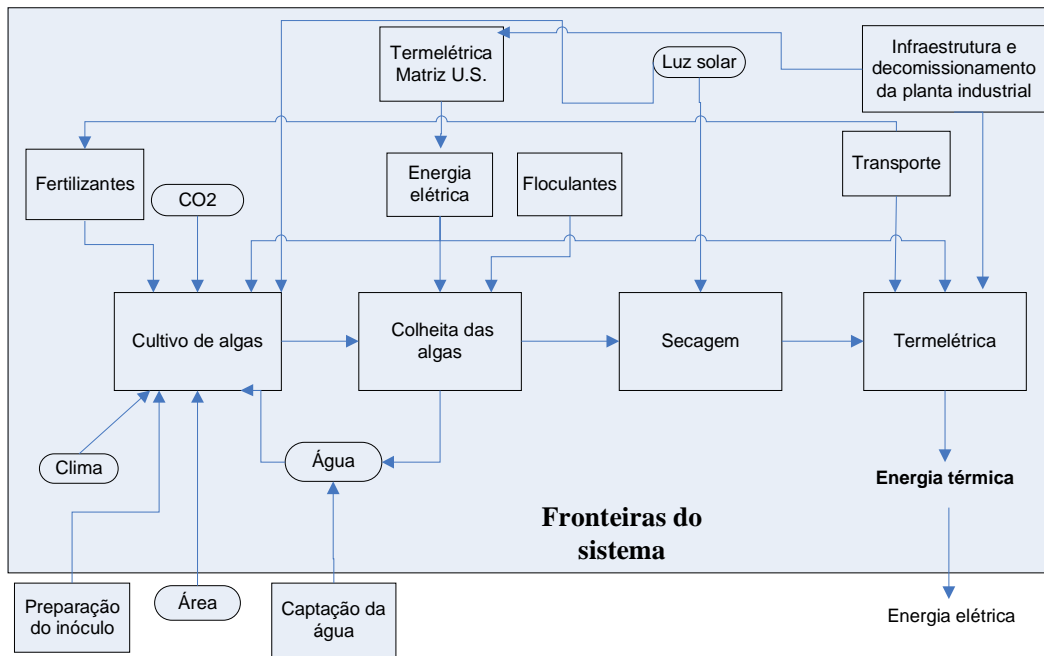
Incerteza: calculou-se no Simapro 7.3™, licença concedida pelo grupo de Bioenergia e Meio Ambiente (BIOMA) da Universidade Estadual de Santa Cruz, visto que a licença do Simapro Faculty do TECLIM não tinha essa função. O método usado nessa avaliação foi o Monte Carlos, o mais usado pelos softwares de ACV. Por se tratar de uma tecnologia nova e com poucos dados disponíveis a grande parte deles foram secundários, no qual, existem diversas fontes de incerteza associadas a essa modelagem. Baseado na tabela de incerteza básica das substâncias e na matriz pedigree, ver Anexo 2 e Anexo 3, caracterizou-se no inventário todos os insumos utilizados pela cadeia principal para rodar a avaliação de incerteza no Simapro 7.3™. Vale lembrar que os inventários do Ecoinvent (v2.2) já são caracterizados com suas incertezas, no qual aumenta ainda mais as incertezas dos resultados finais.

Tratamento dos dados indisponíveis: por ser uma tecnologia em transição, muito dos dados primários não estavam disponíveis, por isso foram usados dados da literatura para preencher essas lacunas. A experiência de especialistas no assunto ajudou muito quando foi preciso se fazer estimativas.

#### 4.2.1. Representatividade tecnológica

A rota tecnológica principal foi detalhada, mostrando os processos que alimentam a cadeia principal e os produtos produzidos. O sistema pode ser mais detalhado de forma a considerar outros processos que alimentam a cadeia principal e os produtos gerados. A Figura 18 apresenta o fluxograma.





**Figura 18 - Cadeia de produção de energia térmica a partir da biomassa de microalgas.**

Nos cenários LA1 e FPP1, apenas com CO<sub>2</sub> proveniente de fonte residual, não foi considerada a fase do ciclo de vida referente à produção desse insumo, posto que ele foi considerado resíduo do processo de combustão e o seu uso não causaria nenhuma perda na produtividade das microalgas (YOO *et al.*, 2009). O sequestro do CO<sub>2</sub> pelas microalgas também não foi considerado, uma vez que na combustão da biomassa algal, o CO<sub>2</sub> capturado na fotossíntese é novamente liberado para a atmosfera. Nos cenários LA2 e FPP2, além do uso do CO<sub>2</sub> residual, usou-se esgoto secundário como fonte de nutrientes, substituindo os fertilizantes químicos, sem perdas de produtividade, sendo a água contida no efluente aproveitada juntamente com a água de rejeito de dessalinizadores (YANG *et al.*, 2010; PERELO *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2011).

Utilizou-se a metodologia de ACV para calcular o REL e as emissões de GEE numa abordagem de segunda ordem, desconsiderando a infraestrutura da cadeia de produção principal (GOEDKOOP *et al.*, 2008). Para a definição do sistema em análise, foram considerados os seguintes pressupostos:

## a) Cultivo

- O principal consumo de eletricidade na etapa de cultivo é devido à pressurização e ao bombeamento do dióxido de carbono para o meio de cultivo, ao bombeamento da água para recirculação e ao resfriamento, no caso do FPP (JORQUERA *et al.*, 2009). A fonte da energia elétrica adotada foi a matriz elétrica americana (Electricity, medium voltage, at grid/US) do Ecoinvent v2.2 por conta dos dados de produtividade e concentração da biomassa de microalgas no estudo de Jorquera *et al.* (2009) serem referentes aos Estados Unidos da América.

- Assumiu-se que tanto a fonte de água e efluente doméstico quanto à fonte de dióxido de carbono (ex. termelétrica ou biodigestor) encontram-se próximos as fazendas de microalgas. No sistema das microalgas, não se considerou o produto evitado do tratamento dessas emissões, porque eles já teriam sido considerados nos seus processos de origem. Essa atribuição é considerada pela norma ABNT NBR ISO 14040 (2009) como critério de corte, ou *cut-off*.

- A água pode ser proveniente do mar ou de lençóis freáticos salinos, encontrados no semiárido nordestino, os quais precisam ser dessalinizados para abastecer a população, gerando água de rejeito como subproduto, a qual tem sido indicada como um meio de cultivo favorável para a *Nannochloropsis sp.* em conjunto com efluente doméstico tratado (PERELO *et al.*, 2012; JIANG *et al.*, 2011). Toda a água seria recirculada e o efluente secundário mais a água de rejeito dos dessalinizadores complementariam as perdas e alimentariam o sistema com os nutrientes.

- Os cenários LA1 e FPP1, que usam fertilizantes comerciais, são de origem europeia e usam uma matriz energética fóssil.

- Os dados de concentração da biomassa no ponto de colheita foram extraídos de Jorquera *et al.* (2009) sendo  $0,35 \text{ kg/m}^3$  em LA e  $2,7 \text{ kg/m}^3$  em FPP. Esses dados também serviram para estimar o volume de meio de cultivo necessário para cada kilograma de biomassa de microalgas colhido.

Segundo Jorquera *et al.* (2009) essa seria a concentração máxima atingida em 7 dias.

#### b) Colheita

- Os inventários da produção dos insumos no processo de floculação são europeus e usam uma matriz energética fóssil. Considerou-se que, após os três processos de colheita (floculação, decantação e centrifugação) e a etapa de secagem (estufa-solar) a biomassa estaria apta para ter um aproveitamento energético a partir da combustão para geração de calor. Devido à estufa-solar não precisar de nenhum insumo direto significativo além da luz solar, essa etapa foi desconsiderada no inventário.

#### c) Combustão

- Em virtude da escassez de dados para a composição de um inventário da queima da biomassa de microalgas, decidiu-se adotar um inventário que fosse mais próximo da composição elementar dessa fonte. Sendo assim, considerou-se o inventário de uma termelétrica movida a resíduos urbanos domésticos perecíveis devido à análise elementar dessa fonte ser a mais próxima das microalgas em relação à fração C/N dentre os inventários disponíveis no SimaPro 7.3. O Poder Calorífico Inferior (PCI) foi calculado para a biomassa da *Nannochloropsis sp.*, Apêndice I. Esse inventário inclui o consumo de energia elétrica, transporte, infraestrutura e as perdas referentes ao aproveitamento do calor útil na queima. Não foi considerado o sequestro nem a emissão do CO<sub>2</sub> biogênico proveniente da queima da biomassa. As demais emissões foram consideradas normalmente.

Os dados da cadeia de produção dos insumos usados para a avaliação de impacto, com exceção da água e do dióxido de carbono, considerados resíduos disponíveis sem precisarem de tratamento prévio ou transporte por longas distâncias para o seu aproveitamento nas fazendas de microalgas, foram provenientes da base de dados Ecoinvent v2.2 (2012).

Observou-se não haver emissões significativas de substâncias na cadeia principal, exceto da termelétrica. Isso significa que a maior parte dos impactos é advinda da produção dos insumos.

Segundo Bodlund (2008) em estudos de ciclo de vida os resíduos utilizados como matéria-prima são considerados isentos de carga ambiental, devido a elas já terem supostamente sido contabilizadas anteriormente, evitando assim dupla contagem. As cargas ambientais geradas depois da coleta desses resíduos, no seu processamento, são contabilizadas normalmente.

A contribuição da infraestrutura de produção em muitos casos não é tão relevante, devido ao tempo de vida ultrapassar 20 anos. Em muitos casos, ela pode ser excluída do escopo das fronteiras do sistema sem mudanças significativas no resultado (PE INTERNATIONAL, 2008). Por essa razão, a infraestrutura das etapas de cultivo e colheita não foi analisada nesta dissertação.

Dentre os insumos utilizados no processo de cultivo, apenas os fertilizantes necessitaram de transporte até a fazenda de microalgas, percorrendo uma distância de 200 km numa caminhonete movida a diesel. Todos os processos da cadeia principal ocorrem na mesma unidade (biorrefinaria) e não necessitam de transporte por longas distâncias, por isso desconsiderou-se esse processo dentro da unidade.

#### **4.3. Comparação com o potencial energético de algumas opções fósseis**

Em razão do produto final do processo de produção de biomassa de microalgas descrito no capítulo anterior ser propício ao aproveitamento energético a partir da combustão, tanto no aproveitamento térmico em fornos industriais, substituindo parcialmente um combustível de origem fóssil, quanto para a geração de energia elétrica, partindo de termoelétricas, fez sentido compará-las com algumas opções fósseis. Utilizaram-se os resultados do inventário do estudo de caso para comparar as emissões de GEE das

microalgas com algumas fontes fósseis: carvão mineral, gás natural, petróleo leve e pesado da base de dados Ecoinvent v2.2 (2012).

## 5. RESULTADOS

Neste capítulo, são mostrados os resultados da Análise de Inventário e da Avaliação de Impacto, referentes ao REL e GEE. As emissões de GEE das microalgas são comparadas com algumas opções fósseis como base de referência.

### 5.1. Análise de Inventário

A Tabela 9 apresenta o inventário completo das rotas de produção de biomassa, partindo da LA e FPP.

**Tabela 9 - Inventário das rotas de produção por kilograma de biomassa da *Nannochloropsis sp.* a partir do cultivo em Lagoas Abertas (LA) e Fotobiorreatores de Placa Plana (FPP).**

Etapas	LA	FPP	Unidade	Fonte
<b>CULTIVO</b>				
Nitrogênio (N)	0,07	0,07	kg/kg	Grobbelaar 2004 apud Chisti 2007
Fósforo (P)	0,01	0,01	kg/kg	Grobbelaar 2004 apud Chisti 2007
Potássio (K)	0,01	0,01	kg/kg	Grobbelaar 2004 apud Chisti 2007
Transporte dos Fertilizantes	0,02	0,02	t.km/kg	Estimativa, considerando 200 km de distância percorrido.
CO <sub>2</sub>	1,83	1,83	kg/kg	Chisti 2007
Água	2857,14	370,37	kg/kg	Jorquera <i>et al.</i> 2009
Eletricidade (energia)	1,05	1,94	kWh/kg	Jorquera <i>et al.</i> 2009
<b>Saída, meio de cultivo</b>	2858,14	371,37	kg/kg	Calculado, inverso da concentração.
<b>FLOCULAÇÃO</b>				
Sulfato de Alumínio Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub>	1,3	1,3	kg/kg	Razon e Tan 2011
Ácido Hidroclorídrico HCL (15%)	0,3	0,3	kg/kg	Razon e Tan 2011
<b>Saída, microalga concentrada</b>	8	1,04	kg/kg	
<b>CENTRIFUGAÇÃO</b>				
Eletricidade	0,06	0,001	kWh/kg água	Brentner <i>et al.</i> 2011

Em todos os cenários de avaliação, o CO<sub>2</sub> foi isento de carga ambiental na sua produção por ele ser considerado um resíduo que normalmente é emitido para a atmosfera sem tratamento. Nos cenários LA2 e FPP2, não houve a incorporação do impacto referente ao processo de produção e transporte dos fertilizantes (N, P e K), pois eles são provenientes de fluxos residuais sem posteriores tratamentos para o seu aproveitamento e considerando que estavam disponíveis nas fazendas de cultivo de microalgas. Em tais situações, alguns autores ainda considerariam o ganho ambiental relativo ao produto evitado, o que significa o não uso de uma fonte primária de insumos (ex. fertilizantes comerciais) (WARDENAAR *et al.*, 2012). A norma ISO 14040 considera esse tipo de alocação como extensão das fronteiras e o Software Simapro 7.3 ® como produto evitado. Nesse estudo de caso, esse ganho não foi contabilizado.

Na etapa de separação, analisou-se que, após os três processos de colheita (floculação, decantação e centrifugação) e um de secagem (estufa-solar), a biomassa estaria apta para ter um aproveitamento energético da combustão direta para geração de calor. Como a estufa-solar não precisade nenhum insumo direto além da luz solar, essa etapa não foi apreciada no inventário.

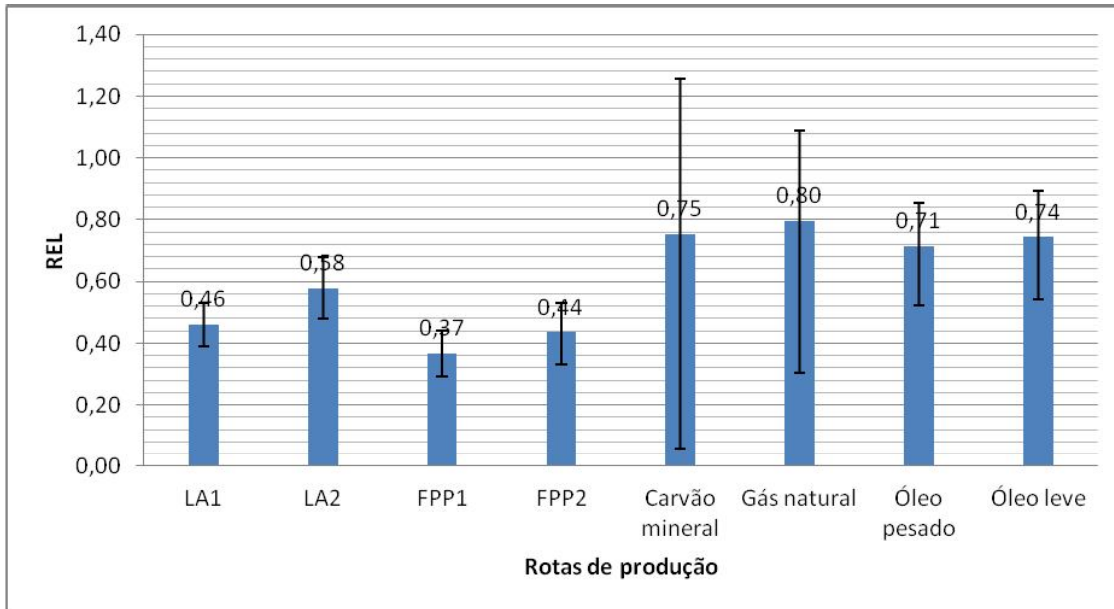
## 5.2. Balanço Energético

A Razão de Energia Líquida (REL) é calculada a partir da energia contida no produto final ou energia de saída (ES) dividido pelo somatório da demanda energética acumulada, - ou seja, toda energia de entrada (EE) do sistema.

$$REL = ES / \sum EE \quad (1)$$

A Figura 19 apresenta os resultados das RELs para os cenários das microalgas e de algumas fontes fósseis (Heat, at hard coal industrial furnace 1-10MW/RER U; Heat, natural gás, at industrial furnace >100kW/RER U; Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U; Heat, light fuel oil, at industrial

furnace 1MW/RER U) da base de dados EcoInvent v2.2 calculado no SimaPro 7.3™.



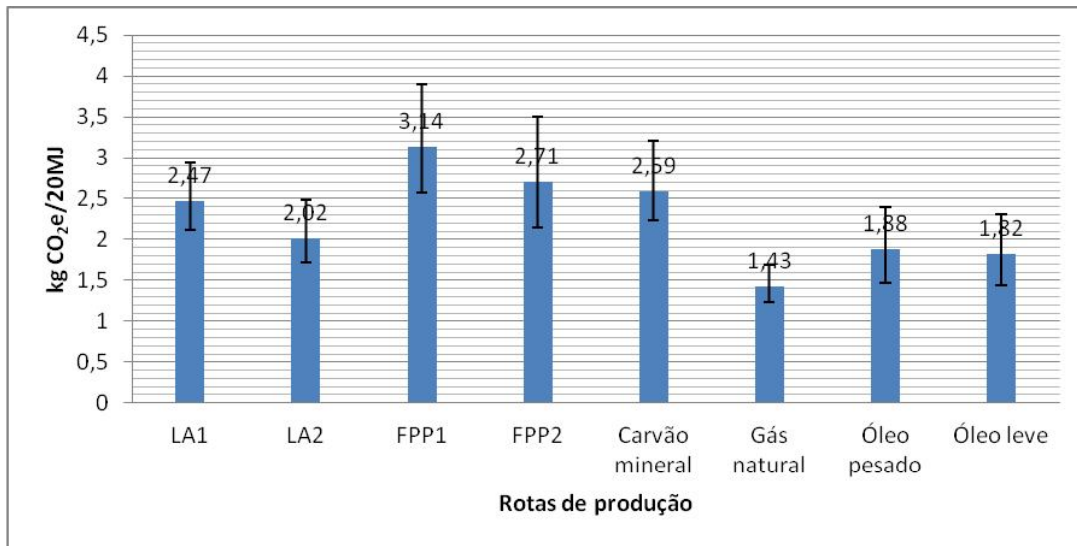
**Figura 19 – Balanço Energético da produção de 20 MJ (PCI) da *Nannochloropsis sp.* nos cenários LA1, LA2, LA3 e LA4 e das opções fósseis.**

**Fonte: Método Cumulative Energy Demand (CED) EcoInvent v2.2 (2012).**

Os cenários das microalgas demonstram uma REL menor do que 1, demonstrando um aspecto desfavorável. Não obstante, as opções fósseis também demonstraram RELs desfavoráveis, apesar da grande incerteza associada.

### 5.3. Emissões de GEE

As emissões absolutas de GEE das rotas LA1, LA2, FPP1 e FPP2 foram calculadas baseadas no método de avaliação de impacto IPCC (2007) 100 anos, usando os dados da Tabela 9 no Simapro 7.3 ® comparado com algumas opções fósseis (Heat, at hard coal industrial furnace 1-10MW/RER U; Heat, natural gas, at industrial furnace >100kW/RER U; Heat, heavy fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U; Heat, light fuel oil, at industrial furnace 1MW/RER U) do EcoInvent v2.2 calculado no SimaPro 7.3™, Figura 20.



**Figura 20 - Emissões de GEE das rotas LA1, LA2, FPP1, FPP2 e de algumas fontes fósseis<sup>1</sup> referente à produção de 20 MJ (PCI)<sup>2</sup> de energia térmica na termelétrica.**

**Fonte:** <sup>1</sup>Ecoinvent v2.2 (2012), <sup>2</sup>Calculado (Apêndice I).

As emissões de GEE das microalgas se mostram competitivas em relação às opções fósseis, com exceção do gás natural, que apresentou ser menos estufa do que todos os cenários das microalgas. Com o objetivo de melhor compreender as contribuições relativas (em percentuais) aos cenários das microalgas, seguem os fluxogramas dos seus respectivos ciclos de vida LA1, LA2, FPP1 e FPP2 (Figura 21, Figura 22, Figura 23, Figura 24). A largura dos fluxos ou o “terômetro” de cada caixinha (processo) representa o montante da contribuição do respectivo processo, de maneira que eles se somam até atingir o 100%.



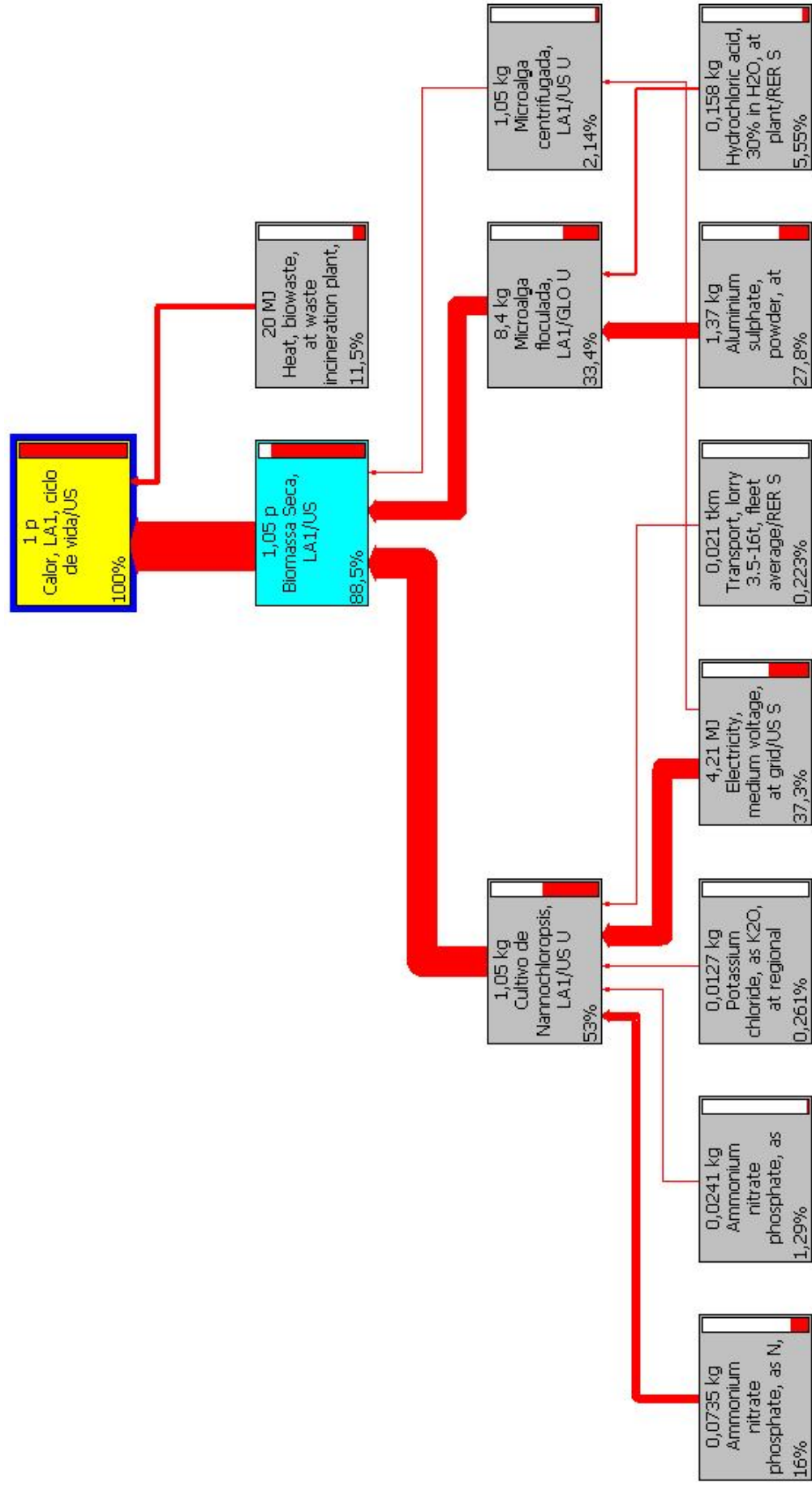
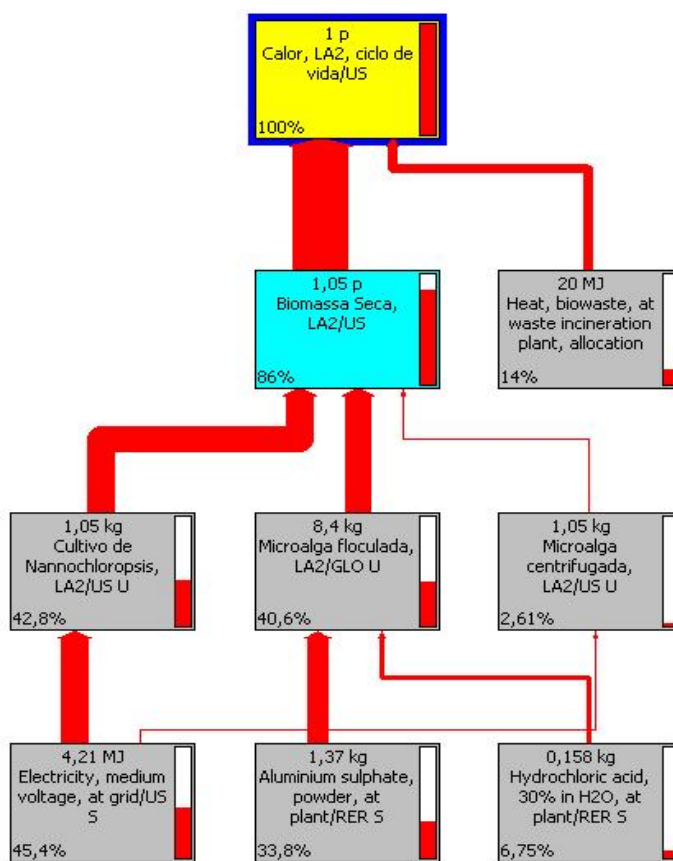


Figura 21 – Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário LA1.  
Fonte: SimaPro 7.3 ®.

A etapa de cultivo representa a maior contribuição das emissões totais com 53%, seguida dos processos de floculação com 33,4% e queima com 11%. No cultivo, os maiores contribuidores são a eletricidade com 37,3% e o fertilizante nitrogenado com 16%. Na floculação, o grande contribuidor é o floculante sulfato de alumínio com 27,8%, por ser muito intenso em energia elétrica para a sua produção. O processo de centrifugação tem baixo consumo de energia elétrica porque meio de cultivo já entra bem concentrado nesse processo. A queima representa 11% das emissões, desconsiderando o CO<sub>2</sub> emitido por ser biogênico, ou seja, de origem renovável (Figura 21).



**Figura 22 – Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário LA2.**

Fonte: SimaPro 7.3 ®.

Como foi visto na Figura 20, os cenários LA2 e FPP2 possuem uma menor emissão de GEE absoluta em relação aos cenários LA1 e FPP1, respectivamente, devido à eliminação dos fertilizantes comerciais. Essa modificação aproximou a contribuição da etapa de colheita à etapa de cultivo.

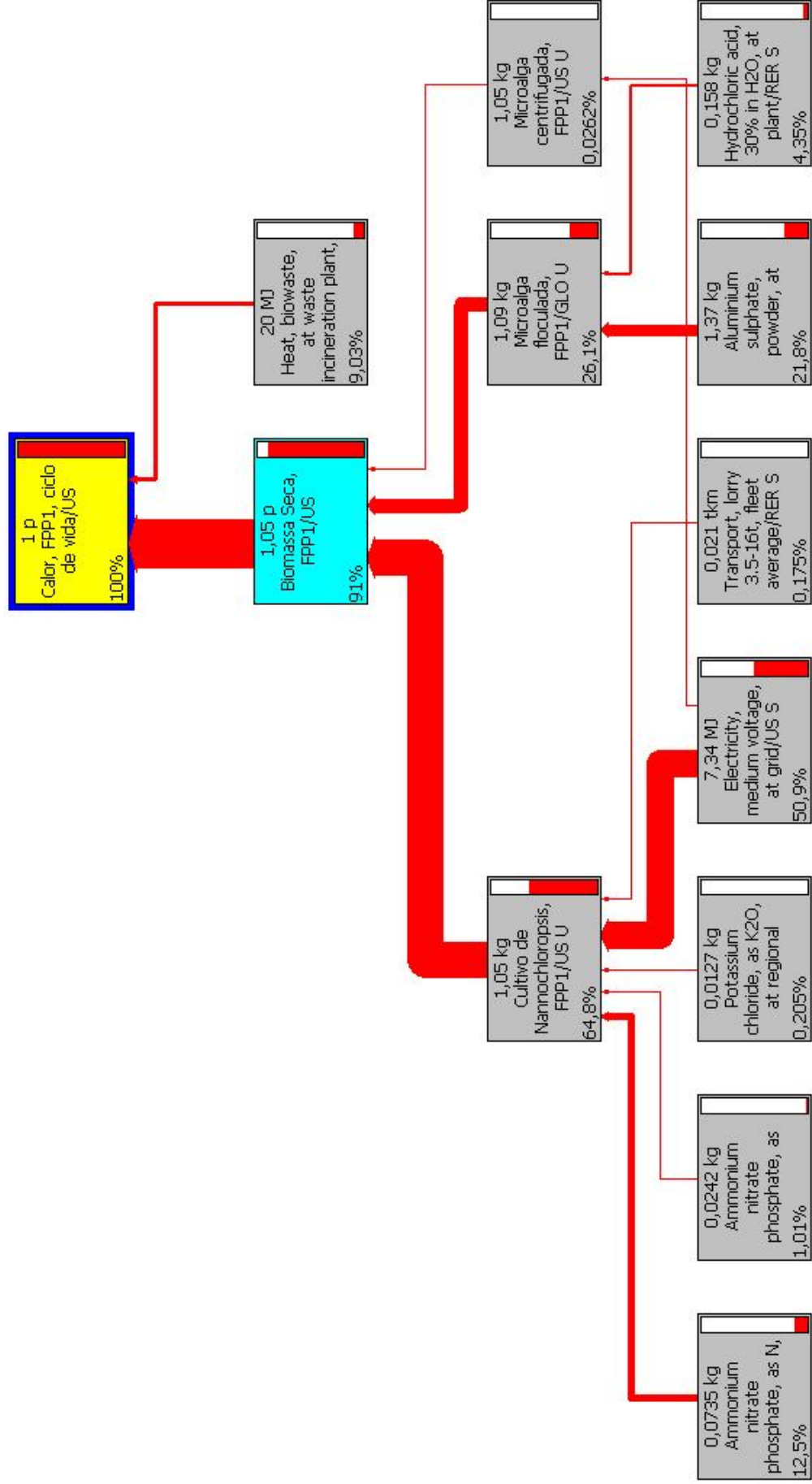
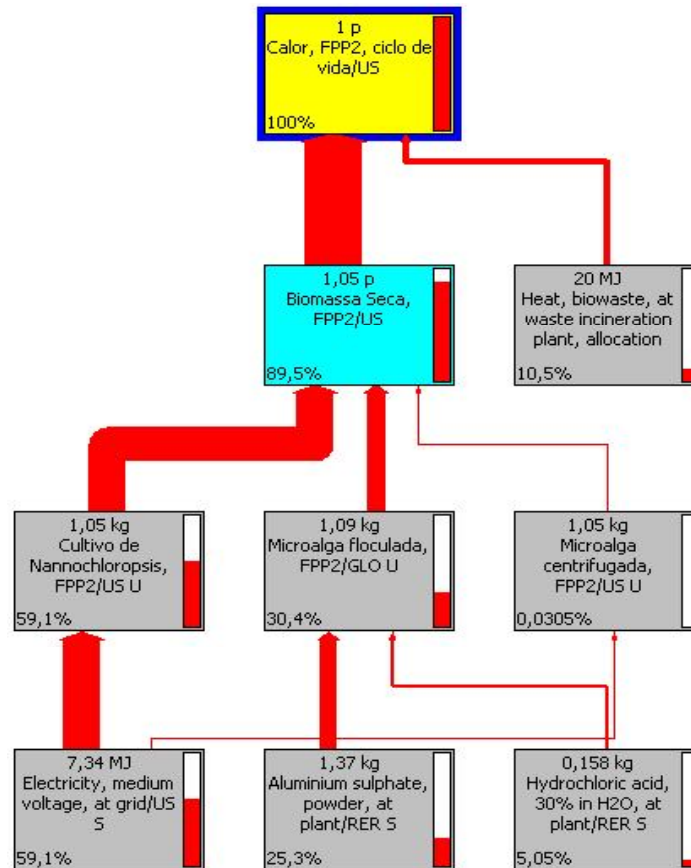


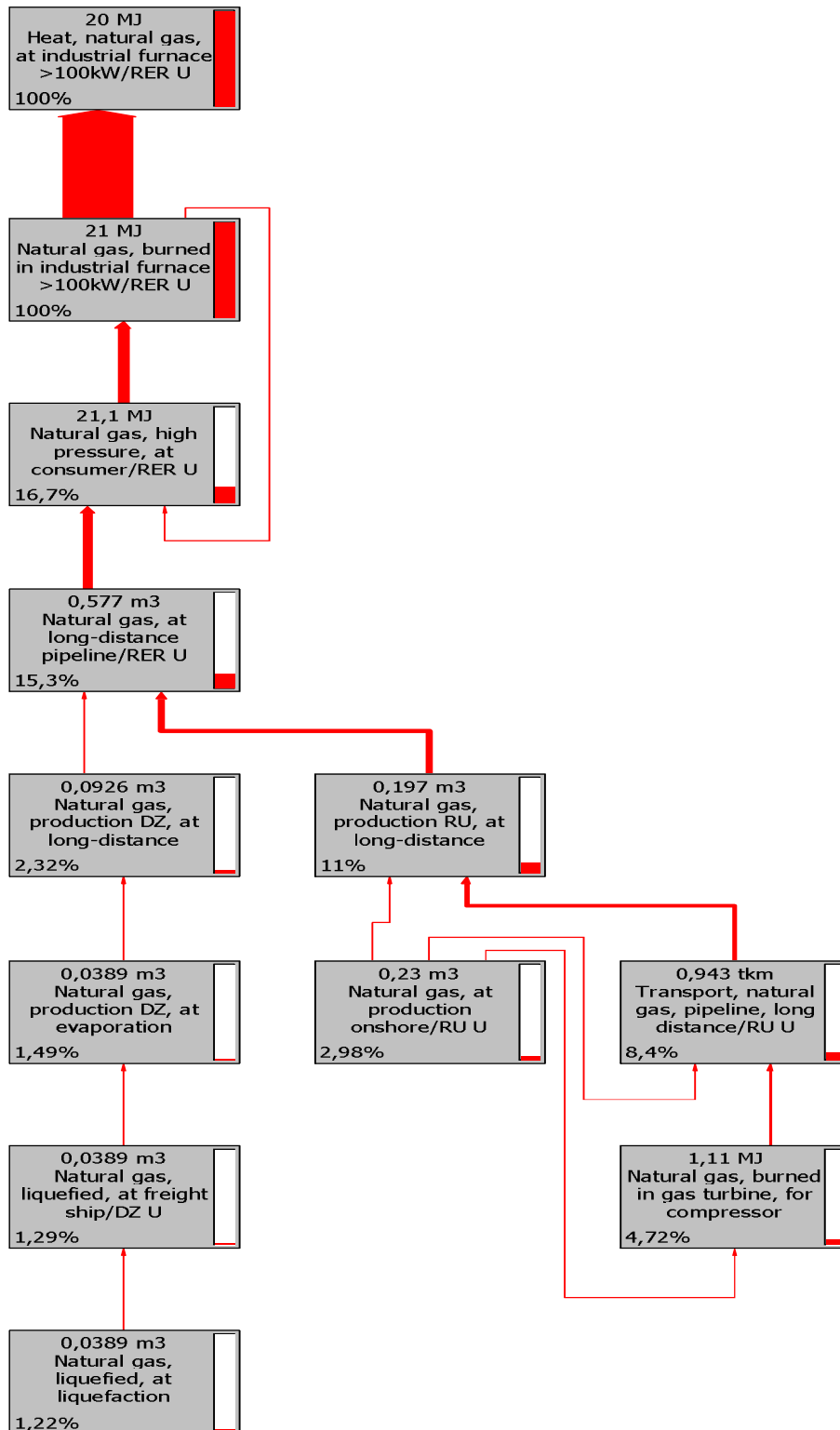
Figura 23 - Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário FPP1.  
 Fonte: SimaPro 7.3 ®.

A maior demanda por energia elétrica dos fotobiorreatores, na etapa de cultivo, aumentou a proporção da contribuição dessa fase no ciclo de vida do produto para ambos os cenários, Figura 23 e Figura 24.



**Figura 24 - Contribuição dos processos sobre as emissões de GEE da produção de energia térmica no cenário FPP2.**  
**Fonte: SimaPro 7.3 ®.**

Por ser o gás natural a melhor opção fóssil em relação às emissões de GEE, dentre as mostradas na Figura 20, decidiu-se ampliar o entendimento dessa opção e avaliar as suas diferenças e semelhanças em relação à cadeia das microalgas, Figura 25. Nota-se que apenas 16,7% das emissões são advindas da produção do gás natural e o restante, 83,3%, é gerada na queima.



**Figura 25 - Cadeia de processos em função das emissões de GEE da produção de energia térmica a partir do Gás natural.**  
**Fonte: Ecoinvent v2.2 (2012) no SimaPro 7.3 ®.**

## 6. DISCUSSÃO

De acordo com a crescente necessidade mundial e brasileira por fontes energéticas alternativas, as microalgas mostram-se uma fonte potencial pela diversidade de opções de cultivo, o número de espécies ricas em lipídeos, e a variedade de combustíveis e coprodutos não energéticos que podem ser extraídos e processados a partir da sua biomassa. Por outro lado, considerou-se e analisou-se, por modelagem, as dificuldades ainda enfrentadas para a produção de biocombustíveis a partir de microalgas com viabilidade econômica e a busca pelo desenvolvimento de tecnologias mais eficientes ao longo de toda a cadeia de produção.

Estudos de Avaliação do Ciclo de Vida de biocombustíveis de microalgas ainda estão divididos em relação à viabilidade energética desses combustíveis, mas nota-se que a maioria deles aponta para um cenário viável, Quadro 4. Mesmo assim, para uma produção em larga escala, é preciso iniciar uma planta piloto e aumentá-la gradativamente, pois as microalgas precisam se adaptar ao ambiente externo e conseguir suceder contra os organismos invasores (BENEMANN, 2010). Por isso, a viabilidade da produção de biocombustíveis a partir de microalgas depende do desenvolvimento científico e tecnológico do processo de cultivo numa perspectiva local e regional. Por outro lado, as etapas de processamento e produção de biocombustíveis a partir da biomassa de microalgas podem se beneficiar do desenvolvimento tecnológico mundial.

Os resultados deste trabalho confirmam o potencial das microalgas como uma fonte energética, contudo alerta para a necessidade imperativa da diminuição do consumo de energia, fertilizantes e outros insumos intensivos em energia (Figura 21, Figura 22, Figura 23 e Figura 24).

O cultivo de microalgas é bastante intensivo em eletricidade no bombeamento, recirculação e injeção de ar com altos teores de dióxido de carbono no meio de cultivo. Nesta dissertação, constatou-se que a produção de biomassa de microalgas para combustão e o aproveitamento térmico ainda não

é viável do ponto de vista energético. Surpreendentemente, as opções fósseis também não se mostraram viáveis, apesar da grande incerteza associada, fortalecendo a hipótese da dependência de subsídios governamentais para a viabilidade deste setor.

Segundo Scott *et al.* (2010), o maior desafio é assegurar que a produção de combustíveis de alga não seja feita com um gasto de energia maior do que a obtida no produto final. Existem várias oportunidades de otimização e aumento da ecoeficiência na produção de microalgas como as que foram apresentadas no Quadro 3. Mesmo que elas ainda não estejam consolidadas como uma fonte alternativa de produção energética, estudos como este são importantes para apontar tendências potenciais de aspectos tecnológicos e ambientais que direcionam a viabilidade econômica, de forma sustentável, das atividades de pesquisa e desenvolvimento das microalgas.

Em relação à fonte de dióxido de carbono, vários pesquisadores constataram que as microalgas podem utilizar, de maneira eficiente e sem perdas de produtividade, o CO<sub>2</sub> proveniente da combustão. O dióxido de carbono pode ser fornecido de fontes externas como: gases da combustão provenientes de caldeiras, fornos ou usinas de energia para nutrir o crescimento das microalgas (SANDER e MURTHY, 2010; CAMPBELL *et al.*, 2010). Outros autores detectaram que alguns produtos da combustão como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) ou óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>) podem ser efetivamente usados como nutrientes pelas microalgas (UM *et al.*, 2009; PACKER, 2009; YOO *et al.*, 2009).

Quanto à fonte de nutrientes, de acordo com Yang *et al.* (2010), pode se assumir que o efluente municipal, após tratamento secundário, possui todos os nutrientes necessários para o crescimento das algas, exceto o carbono. O U.S. DOE (2010) afirma que, em climas favoráveis, as microalgas representam uma alternativa tecnológica mais vantajosa em relação às tecnologias convencionais de tratamento terciário para a remoção de nutrientes em estações de tratamento de efluentes (ETEs). O uso desse efluente mostra-se como a única saída economicamente viável para a produção de biomassa de microalgas de

forma sustentável com o mínimo impacto ambiental (PARK *et al.* 2011; PITTMAN *et al.* 2011). Segundo Park *et al.* (2011) pesquisas básicas e testes pilotos em campo auxiliam a otimização do rendimento da colheita das microalgas e tendem melhorar a viabilidade econômica e em larga escala da implementação dos biocombustíveis de microalgas a partir dos efluentes. Por outro lado, Christenson e Sims (2011) afirmam que apenas alguns estudos preliminares foram conduzidos para a produção de biocombustíveis e bioprodutos começando das microalgas cultivadas com efluentes.

Muitas pesquisas relacionadas ao cultivo e a colheita de microalgas são confinadas no laboratório. Conquanto muitas empresas tenham saído do laboratório e da escala de bancada para pequenas escalas pilotos, os maiores desafios como: o fornecimento de nutrientes, a disponibilidade de terra e água, o suprimento de luz, as trocas gasosas, o controle ambiental e a integridade da cultura, têm limitado o aumento de escala, além do número de estudos e companhias, operando em escala demonstrativa e comercial, serem limitados (CHRISTENSON e SIMS, 2011).

De acordo com as matérias publicadas na revista eletrônica *Algae Industry Magazine* (AIM, 2012), a situação do desenvolvimento de biocombustíveis a partir de microalgas deve ser superada em breve, por conta do rápido desenvolvimento e dos investimentos injetados nesse campo. Contudo, no estudo de caso mostrado no capítulo 5 RESULTADOS interpreta-se que, do ponto de vista energético, as microalgas ainda têm Razões de Energia Líquidas (REL) menores do que 1. A substituição dos fertilizantes comerciais pelo efluente trouxe um ganho significativo na REL de 25 a 30%.

As rotas LA2 e FPP2 mostraram desempenhos mais favoráveis do que as rotas LA1 e FPP1 em ambos indicadores REL e GEE devido ao não uso de fertilizantes comerciais, visto que eles demandam um consumo energético significativo na sua produção e no seu transporte enquanto o efluente doméstico já contém esses fertilizantes “de graça”. O impacto da substituição dos fertilizantes por efluente doméstico, na categoria de GEEs, foi significativo. Mesmo assim, as emissões dos cenários das microalgas são consideradas



estatisticamente iguais à maioria dos fósseis, pela grande incerteza, exceto do gás natural que teve o melhor desempenho. Vale ressaltar que a fonte de energia elétrica usada em toda a cadeia dos cenários de microalgas foi de origem predominantemente fóssil (matriz elétrica americana).

No intuito de identificar o impacto da matriz elétrica no ciclo de vida das microalgas, decidiu-se testar o desempenho da dela na cadeia principal. Os insumos, como fertilizantes e floculantes, continuaram com suas matrizes originais, na grande maioria europeia. Os resultados encontram-se no Apêndice III. Os cenários LA1, LA2, FPP1 e FPP2 aumentaram 28, 36, 42 e 55% no REL e diminuíram 32, 38, 42 e 50% respectivamente. O fato da matriz elétrica brasileira ainda ser menos estufa do que o restante do mundo coloca-a numa posição mais favorável para o fomento dessas energias renováveis de terceira geração.

Na etapa de cultivo dos cenários LA1 e FPP1, o uso de eletricidade e fertilizantes somaram as maiores contribuições das emissões de GEE, e a maior contribuição dentre os fertilizantes foi proveniente do nitrogenado. Nos cenários LA2 e FPP2, com ausência de fertilizantes comerciais, o uso da energia elétrica predominou como o grande contribuidor das emissões de GEE. Na etapa de colheita, o grande contribuidor dos GEE foi o floculante sulfato de alumínio, decorrente igualmente do alto consumo de energia elétrica na sua produção e também dessa energia ser proveniente da matriz elétrica europeia, predominantemente fóssil.

Comparando-se o inventário utilizado no estudo de caso com os inventários da etapa de cultivo levantados na revisão da literatura, Tabela 6 e Tabela 7, notam-se algumas diferenças significativas nos parâmetros de entrada e saída. Por exemplo, o consumo de energia elétrica para a produção de 1 kg de biomassa de microalgas usado na rota de lagoas abertas (LA) do estudo de caso foi 1,05 kWh enquanto que os valores para o mesmo sistema de cultivo, apesar do uso de diferentes espécies de microalgas, da maioria dos autores (ver Tabela 6) variam entre 0,19 e 0,42 kWh, restrição de Stephenson *et al.* (2010) e Razon e Tan (2011). A mudança desse parâmetro representaria uma redução entre 60-80% no consumo de energia elétrica nessa etapa. Nos

reatores fechados, a diferença seria ainda maior, porque no estudo de caso observou-se um consumo de 1,94 kWh na produção de 1 kg de microalgas nos fotobiorreatores de placas planas (FPP) enquanto que para a maioria dos autores (ver Tabela 7) esses valores variam entre 0,3 e 0,94 kWh, novamente exceto Stephenson *et al.* (2010) e Razon e Tan (2011). Essa diferença representa um potencial de redução entre 52-85% no consumo de energia elétrica, que é o parâmetro com maior contribuição na REL e nas emissões de GEE.

Tomando-se como referência o melhor cenário das microalgas, o LA2, uma possível redução de 70% do consumo de energia elétrica na etapa de cultivo minimizaria as emissões de GEE da cadeia do produto analisado em, aproximadamente, 42%, resultando numa emissão de 0,85 kg CO<sub>2</sub>e, o que colocaria esse cenário numa posição mais favorável do que a melhor das opções fósseis. Em relação à REL, aplicando a mesma redução no consumo de energia elétrica seria um ponto de ruptura, *breaking point*, na viabilidade do cenário LA2, atingindo um balanço energético igual a um. Quando a REL das microalgas for maior do que 1, ela poderá produzir a própria energia que consome, reduzindo drasticamente as emissões de GEE pelo uso de uma matriz fóssil, vendendo o excedente de energia de baixa emissão de GEE para a rede elétrica. Esse diagnóstico evidencia a importância desse aspecto na busca pela otimização desses sistemas, a fim de viabilizá-los economicamente e ambientalmente.

A Figura 25 mostra que a maior parte das emissões de GEE do gás natural, analogamente similar ao caso das outras opções fósseis, é advinda da sua combustão. Essa condição aponta que há pouco campo para a diminuição das emissões de GEE da cadeia dos fósseis, uma vez que a tendência é o aumento dos custos de extração dessa matéria-prima. A alternativa biológica de sequestro do CO<sub>2</sub> emitido por termelétricas movidas a combustíveis fósseis com potencial de escala, demonstrada nesta dissertação, são as próprias microalgas. Nos cenários de microalgas, as menores contribuições das emissões de GEE são provenientes da combustão, porque CO<sub>2</sub> emitido nessa etapa é considerado biogênico (ou de origem renovável) e não contribui para o

aquecimento global. Portanto, a situação das microalgas propicia maiores chances de minimização das emissões de GEE, ao longo da cadeia, em sua trajetória de amadurecimento tecnológico e adequação as oportunidades locais.

O estudo de caso desta dissertação se deteve mais a avaliação tecnológica em si do que a aplicação dela em uma condição geoclimática específica. Uma análise mais abrangente, conhecida como ACV Consequencial, implicaria em considerar as condições e consequências locais do uso dessa tecnologia. Tais aplicações demandariam o uso de diferentes critérios de modelagem das fronteiras do sistema da ACV no qual poderia considerar o serviço de tratamento terciário dos efluentes domésticos e a diminuição na demanda por fertilizantes no mercado, ambos constituindo-se como produtos evitados do sistema, além das perdas e dos ganhos advindos da adicionalidade de tecnologias mais limpas, por exemplo, a substituição de um insumo fóssil pela biomassa de microalgas.

Mudanças voluntárias em escala para o uso de produtos menos estufa poderiam gerar créditos de carbono os quais seriam comercializados. Segundo Campbell *et al.* (2010) os créditos de carbono que podem ser gerados pelo uso dos gases da combustão no cultivo de microalgas não são devido à utilização desses gases residuais, entretanto pela possível substituição de combustíveis mais estufas pelos biocombustíveis de microalgas.

Um dos indicadores mais importantes na etapa de cultivo é a concentração de biomassa no meio de cultivo, que está diretamente ligado ao volume de meio de cultivo processado e a energia gasta para atingir uma mesma quantidade de biomassa seca. Geralmente, os sistemas de cultivo fechados são mais intensivos em energia elétrica do que os de lagoas abertas, pois eles proporcionam um maior controle no processo, Tabela 6 e Tabela 7. Essa desvantagem é compensada com o aumento da produtividade e concentração de microalgas no meio de cultivo. Nesse estudo de caso, a concentração de biomassa no meio de cultivo não interferiu muito no REL ou GEE, pois foi considerado que o processo de floculação demandava a mesma

quantidade de insumos, tanto na rota LA1 quanto na rota FPP1 e, após decantar a biomassa de microalgas, o processo de centrifugação foi requerido minimamente para ambos, não trazendo impactos significativos nessa etapa dentre as rotas avaliadas. Se a etapa de colheita fosse realizada usando exclusivamente o processo de centrifugação, a diferença no consumo energético entre as rotas LA1 e FPP1 seria mais acentuada.

O estudo de caso trabalhado nesta dissertação se ateve a um indicador energético e a uma categoria de impacto ambiental, à REL e às emissões de GEE. Vale lembrar que numa avaliação ambiental mais completa faz-se necessário incluir outras categorias de impactos ambientais que não foram consideradas nesse estudo, por exemplo, a pegada hídrica, o uso da terra para localidades específicas e a ecotoxicidade.

Acredita-se que a viabilidade do aproveitamento energético das microalgas será advinda da otimização dos processos, do uso de insumos de baixa intensidade energética e do aumento da produtividade das microalgas que serão desenvolvidas por profissionais nas áreas de engenharia de processos e genética. A abordagem de biorrefinaria é uma oportunidade para a minimização de resíduos e maximização do lucro econômico na indústria de microalgas desde que todas as frações da biomassa de microalgas possam ser convertidas em uma forma de biocombustível ou algum produto de maior valor agregado não necessariamente energético (JONES, STEPHEN e MAYFIELD, 2011; RAWAT *et al.*, 2011; SINGH e OLSEN, 2011).

Vale ressaltar que a aplicação da avaliação do ciclo de vida e dos princípios da ecologia industrial, pelos quais escoamentos residuais de um processo são utilizados como insumo em outros processos diferentes pode ser essencial para tornar os sistemas energéticos de microalgas uma realidade praticável (CLARENS *et al.*, 2010). Logo, é vital uma reestruturação do sistema produtivo, demonstrando a necessidade por inovações produtivas, inserindo-se aí a constituição de uma cadeia energética competitiva como resposta de desenvolvimento local ante ao desafio global (RATHMANN, 2005).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

Os aspectos importantes para cultivar microalgas são: escolha do lugar com água e terra disponíveis, boas condições climáticas e proximidade a uma fonte de CO<sub>2</sub> no sentido de tornar o cultivo de microalgas para combustíveis viáveis. Uma avaliação energética preliminar das prováveis rotas tecnológicas para o aumento de escala é importante para identificar possíveis fragilidades do projeto.

O ponto de partida para a viabilidade econômica e ambiental da produção energética de microalgas é alcançar um balanço energético favorável para os biocombustíveis produzidos. Este estudo demonstrou que o uso do CO<sub>2</sub> e de nutrientes residuais de outros processos possibilitam melhorias significativas no balanço energético e na redução da emissão de GEE, possibilitando maiores chances para a aplicação comercial dessa tecnologia de forma competitiva. Adicionalmente às medidas adotadas neste estudo, existem outras oportunidades de melhoramento do balanço energético da produção de biomassa de microalgas como, por exemplo, a seleção de espécies com taxas de crescimento mais elevadas e que atinjam altas concentrações de biomassa no meio de cultivo, aumentando, conseqüentemente, a eficiência dos processos de cultivo e de colheita respectivamente.

Em nível de tomada de decisão, vale salientar que as políticas ambientais devem atentar para soluções ambientalmente favoráveis tanto do lado da produção quanto do uso da energia. Isso significa que a sociedade deve olhar também para outras possibilidades de redução no uso da energia. Sistemas energéticos sustentáveis partirão de soluções complexas, nos âmbitos locais e globais, e possuirão alta sensibilidade no seu funcionamento devido à alta interação com diversos setores da indústria e com o meio ambiente. O governo é uma peça chave no estímulo e apoio a implementação de sistemas energéticos como o das microalgas, a exemplo do governo americano que, com enorme fomento à pesquisa, se tornou o pioneiro na comercialização de biocombustíveis de microalgas com a empresa Solazime®.

No campo das microalgas, a pesquisa e o desenvolvimento acontecem mais rapidamente comparados com as plantas superiores por conta da sua maior velocidade de crescimento. Com isso, à medida que dados em escala comercial surgirem, avaliações ambientais mais precisas poderão ser feitas. Contudo, mostrou-se nesta dissertação que resultados preliminares já apontam para o potencial de produção de combustíveis mais limpos a partir das microalgas. Não obstante, levantaram-se alguns pontos para melhorias e continuidade das pesquisas, tais como:

- Avaliar outras categorias de impacto ambiental;
- Atualizar o inventário à medida que dados de plantas comerciais sejam disponibilizados;
- Comparar o desempenho ambiental das microalgas para o aproveitamento energético com outras fontes renováveis;
- Avaliar diferentes rotas de aproveitamento energético da biomassa de microalgas (ex. produção de biodiesel, biometano, bioetanol, etc.);
- Considerar o serviço de tratamento terciário, remoção dos nutrientes, do efluente em relação às tecnologias convencionais;
- Avaliar a produtividade e o uso da terra no cultivo das microalgas em diferentes localidades.

## REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 14040:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. **International Organization for Standardization (ISO)**.

ABNT NBR ISO 14044:2009 – Gestão Ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. **International Organization for Standardization (ISO)**.

AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP) Biocombustíveis. **Publicações da ANP**. Disponível em <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/biocombustiveis.asp> Acessado em 19/10/2009.

ALGAE INDUSTRY MAGAZINE (AIM). Revista online sobre o crescimento e o desenvolvimento da indústria de biocombustíveis e co-produtos de algas. **Algae Industry Magazine**, Disponível em <http://www.algaeindustrymagazine.com/>, 2012.

ALGAE VENTURE SYSTEMS (AVS). **Algaeventure Systems company**, 2012. Disponível em <http://algaevs.com/algae-resources>. Acessado em 24/07/2012.

ALGAELINK. Solar Dryer. **Algaelink company**, 2010. Disponível em [http://www.algaelink.com/joomla/index.php?option=com\\_content&view=article&id=8&Itemid=10](http://www.algaelink.com/joomla/index.php?option=com_content&view=article&id=8&Itemid=10) Acessado em 13/08/2012.

ALGAEPRO. Algae farming to develop new water treatment concept. **Algae pro technology**, 2010. Disponível em <http://www.witteveenbos.com/en/news/soort/archief/bericht/190-algae-farming-to-develop-new-water-treatment-concept/newspage/3>. Acessado em 24/07/2012.

ALGAEVENTURE SYSTEMS (AVS). Developing Rapid Algae Farming (RAF) System, creating products from algae, biofuels & bioplastics. **Univenture, Inc. company**, 2009. Disponível em [www.algaevs.com](http://www.algaevs.com), Acessado em 04/12/2009.

ALISSON, E. Microalgas polivalentes, quarta, 09 novembro 2011. **Agência FAPESP**. Disponível em <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/microalgas-polivalentes-091111.htm>.

ARANDA, D. Soja: Vilão ou Solução? **Biodieselbr**, 2009. Disponível em [www.biodieselbr.com/blog/donato/2009/soja-vilao-ou-solucao/#more-242](http://www.biodieselbr.com/blog/donato/2009/soja-vilao-ou-solucao/#more-242) Acessado em: 10/11/2009

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2010 – ano base 2009. Elaborado pela **Empresa de Pesquisa Energética – EPE** e o Ministério de Minas e Energia – MME. Disponível em <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2010.aspx>

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN) 2012. Resultados Preliminares ano base 2011. **Empresa de Pesquisa Energética - EPE**, Rio de Janeiro, RJ - Junho de 2012. Disponível em

[https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados\\_Pre\\_BEN\\_2012.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Resultados_Pre_BEN_2012.pdf). Acessado em 24/07/2012.

BATAN, L.; JASON Q.; BRYAN W.; THOMAS B.; Net energy and greenhouse gas emission evaluation of biodiesel derived from microalgae. **Environmental Science & Technology** 44, no. 20 (October 2010): 7975-80. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20866061>.

BENEMANN, J. AIM Interview: Dr. John Benemann by David Schwartz. **Algae Industry Magazine** available at <http://www.algaeindustrymagazine.com/the-aim-interview-dr-john-benemann/>, 2010.

BERMANN, Célio. Crise ambiental e as energias renováveis. **Cienc. Cult.** [online]. v. 60, n. 3, pp. 20-29, 2008. ISSN 0009-6725.

BIODIESEL 2020. BIODIESEL 2020: Global Market Survey, Feedstock Trends and Forecasts. Multi-Client Study, 2nd Edition, 685 pages **Published by Emerging Markets Online**, 2008. Disponível em [www.biofuels-news.com/biodiesel2020](http://www.biofuels-news.com/biodiesel2020). Acessado em: 10/11/2009.

BIODIESELBR. Ciclo de Vida do diesel e do biodiesel. **Biodieselbr**, publicado por Décio Luiz Gazzoni, 2009a. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/colunistas/gazzoni/ciclo-vida-diesel-biodiesel-07-05-07.htm>, Acessado em 25/07/2012.

BIODIESELBR. Instituições estrangeiras já investem milhares em pesquisas com algas. **Biodieselbr**, segunda, 17 Janeiro 2011. O Estado de S. Paulo. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/instituicoes-estrangeiras-investem-milhoes-pesquisas-170111.htm>, Acessado em 25/07/2012.

BIODIESELBR. O que é Biodiesel? **Biodieselbr**, 2009. Disponível em <http://www.biodieselbr.com/biodiesel/definicao/o-que-e-biodiesel.htm>, Acessado em 25/07/2012.

BIODIESELBR. País estuda combustível de microalga. **Biodieselbr**, segunda, 17 de janeiro 2011a. O Estado de S. Paulo. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/pais-estuda-combustivel-microalga-170111.htm>, Acessado em 25/07/2012.

BODLUND, B. EPD requires specific data – and relies on generic databases. 2<sup>nd</sup> International **ecoinvent Meeting**, Lausanne, March 14, 2008.

BRENNAN L, OWENDE P. Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renew Sustain Energy Rev.**, 2009. doi:10.1016/j.rser.2009.10.009

BRENTNER, L. B. ECKELMAN, M. J.; ZIMMERMAN, J. B. Combinatorial life cycle assessment to inform process design of industrial production of algal biodiesel. **Environmental Science & Technology**, v. 45, n. 16, p. 7060-7. doi: 10.1021/es2006995, 2011.



- CAMPBELL, P. K.; BEER, T.; BATTEN, D. Life cycle assessment of biodiesel production from microalgae in ponds. **Bioresource technology**. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.048, 2010.
- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances** 25 294-306 2007.
- CHISTI, Y.; YAN, J. Energy from algae: Current status and future trends. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3277-3279. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.038, 2011.
- CHRISTENSON, L.; SIMS, R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. **Biotechnology Advances**, v. 29, n. 6, p. 686-702. Elsevier Inc. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.05.015, 2011.
- CLARENS A.F. et al.; Environmental Impacts of Algae-Derived Biodiesel and Bioelectricity for Transportation. **Environmental Science & Technology**. (45) 7554-7560 2011.
- CLARENS, A. F.; RESURRECCION, E. P.; WHITE, M. A; COLOSI, L. M. Environmental life cycle comparison of algae to other bioenergy feedstocks. **Environmental Science & Technology**, v. 44, n. 5, p. 1813-9. doi: 10.1021/es902838, 2010.
- CRIEPI. Successful Extraction of “Green Crude Oil” from Blue-Green Algae – High Yield Extraction at Room Temperature without Drying or Pulverizing Process. **Press Release**, 2010.3.17 New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI) [http://criepi.denken.or.jp/en/activities/pressrelease/2010/03\\_17.html](http://criepi.denken.or.jp/en/activities/pressrelease/2010/03_17.html)
- CRUTZEN, P. J.; MOSIER A. R.; SMITH, K. A.; AND WINIWARTER, W. N<sub>2</sub>O release from agro-biofuel production negates global warming reduction by replacing fossil fuels. **Atmospheric Chemistry and Physics**., 8, 389-395, 2008.
- DAVIS, R.; ADEN, A.; PIENKOS, P. T. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3524-3531. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.018, 2011.
- DUARTE, A. Transmissão ao Vivo (repórter). **III Congresso da Rede de Tecnologia de Biodiesel**. BiodieselBR, 09/11/2009 Disponível em <http://aovivo.biodieselbr.com/2009/>
- EARTHRISE. Produtora e comercializadora de fármacos e nutraceuticos a base de microalgas. **EarthRise website**, 2012. Disponível em [www.earthrise.com/products/](http://www.earthrise.com/products/). Acessado em 24/07/2012.
- ECOINVENT v2.2. Base de dados de suíça de Inventários de Ciclo de Vida. **Ecoinvent database v2.2**. Disponível em [www.ecoinvent.org](http://www.ecoinvent.org), 2012.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). International Energy Statistics database (as of November 2009). Projections: US EIA, World Energy Projection System Plus, **U.S. EIA website**, 2010. Disponível em [www.eia.gov/emeu/international](http://www.eia.gov/emeu/international) Acessado em 25/09/2010.

European Biodiesel Board (EBB). Why use biodiesel? **EBB press releases**, 2009. Disponível em <http://www.ebb-eu.org/biodiesel.php>, Acesso em 05/10/2009.

FERREIRA J. V. R. Análise do Ciclo de Vida dos Produtos. **Instituto Politécnico de Viseu (Publicação)** – Portugal, 2004.

FRISCHKNECHT, R. e JUNGBLUTH, N. (editores). Overview and Methodology. Data v2.0, **ecoinvent report No.1**, Duebendorf, Dezembro 2007.

GOEDKOOOP, M.; SCHRYVER, A.; OELE, M. Introduction to LCA with SimaPro 7. **Pré Consultants**, Netherlands, 2008.

GUINÉE, J. B.; HEIJUNGS, R; VAN DER VOET, E. A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications. **Int J Life Cycle Assess** 14:328-339. DOI 10.1007/s11367-009-0080-x, 2009.

HENRIKSON, R. Dream: Algae Landscape and Architecture Designs. **Algae Industry Magazine website**, 29 de Janeiro de 2012. Disponível em <http://www.algaeindustrymagazine.com/the-future-of-algae-pt-4/>, Acessado em 25/07/2012.

HOU, J.; ZHANG, P.; YUAN, X.; ZHENG, Y. Life cycle assessment of biodiesel from soybean, jatropha and microalgae in China conditions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 5081-5091. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.rser.2011.07.048, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). World Energy Statistics. Paris - France, **OECD/IEA**, 2012. Disponível em [www.iea.org](http://www.iea.org). Acessado em 28/11/2012.

INSTITUTO CARBONO BRASIL. Jornal ambiental com enfoque principal na temática de Mudanças climáticas, **Instituto Carbono Brasil website**, 2012. Disponível em [www.institutocarbonobrasil.org.br/](http://www.institutocarbonobrasil.org.br/) Acessado em 13/09/2012.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing. **IPCC Report**, Chapter 2, 2007 p. 212. Disponível em: <http://www.ipcc.ch> Acessado em 27 de maio de 2009.

JIANG, L.; LUO, S.; FAN, X.; YANG, Z.; GUO, R. Biomass and lipid production of marine microalgae using municipal wastewater and high concentration of CO<sub>2</sub>. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3336-3341. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.03.043, 2011.

JONES, C. S.; MAYFIELD, S. P. Algae biofuels: versatility for the future of bioenergy. Current opinion in **Biotechnology**, p. 1-6. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.copbio.2011.10.013, 2011.

JORQUERA, O.; KIPERSTOK, A.; SALES, E. A.; EMBIRUÇU, M.; GHIRARDI, M. L. Comparative energy life-cycle analyses of microalgal biomass production in open ponds and photobioreactors. **Bioresource technology**, v. 101, n. 4, p. 1406-13. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2009.09.038, 2010.

KAZAMIA, E.; ALDRIDGE, D. C.; SMITH, A. G. Synthetic ecology – A way forward for sustainable algal biofuel production? **Journal of Biotechnology**. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.jbiotec.2012.03.022, 2012.

KOLESNIKOV-JESSOP, SONYA. Na Malásia, algas se tornam biocombustível. Terça, 29 novembro 2011. Original do The New York Times/**Folha de S. Paulo**, Disponível em <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/malasia-algas-biocombustivel-291111.htm> Acessado em 12/12/2011.

LAM, M. K.; LEE, K. T. Microalgae biofuels: A critical review of issues, problems and the way forward. **Biotechnology Advances**. Elsevier B.V. doi: 10.1016/j.biotechadv.2011.11.008, 2011.

LARDON, L.; HÉLIAS, A.; SIALVE, B.; STEYER, J.-P.; BERNARD, O. Life-Cycle Assessment of Biodiesel Production from Microalgae. **Environmental Science Technology**, v. 43, n. 17, p. 6475-6481. American Chemical Society. doi: 10.1021/es900705j, 2009.

LARSDOTTER, K. WasteWater treatment With microalgae – a literature review avlopsrening med mikroalger – en litteraturstudie. **Solar Energy**, p. 31-38, 2006.

LIU, J.; MA, X. The analysis on energy and environmental impacts of microalgae-based fuel methanol in China. **Energy Policy** 37 (4) p. 1479-1488, 2009.

LIU, X.; CLARENS, A. F.; COLOSI, L. M. Algae biodiesel has potential despite inconclusive results to date. **Bioresource Technology**. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2011.10.077, 2011.

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

MELLO, F. O. T. de; PAULILLO, L. F.; VIAN, C. E. de F. O Biodiesel no Brasil: panorama, perspectivas e desafios. **Informações Econômicas**, SP, v.37, n.1, jan. 2007.

MENDONÇA, R.M.L. Avaliação do Ciclo de Vida do Carbono na Queima de Biodiesel à Base de Óleo de Soja, Publicação (dissertação) **UnB 110A/07**, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília - DF 111p, 2007.

MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO AGRÁRIO (MDA). Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel - inclusão social e desenvolvimento territorial. **MDA e-book**, 2011. [http://www.mda.gov.br/portal/saf/arquivos/view/biodiesel/arquivos-2011/Biodiesel\\_Book\\_final\\_Low\\_Completo.pdf](http://www.mda.gov.br/portal/saf/arquivos/view/biodiesel/arquivos-2011/Biodiesel_Book_final_Low_Completo.pdf) Acessado em 26/07/2012.

MITTELBAACH, M. Novas Tendências da Produção e Uso de Biodiesel. **III Congresso da Rede de Tecnologia de Biodiesel**, BiodieselBR, 09/11/2009. Disponível em <http://aovivo.biodieselbr.com/2009/>

MOLINARI, A. L. M. **Comunicação pessoal**. Consultor ambiental e biotecnologia. Mestre em Ecologia e Biomonitoramento, UFBA – 2012.

NORSKER, N.-H.; BARBOSA, M. J.; VERMUË, M. H.; WIJFFELS, R. H. Microalgal production--a close look at the economics. **Biotechnology advances**, v. 29, n. 1, p. 24-7. Elsevier Inc. doi: 10.1016/j.biotechadv.2010.08.005, 2011.

OILGAE. Algae Oil Extraction, **Oilgae webinfo**, 2011. <http://www.oilgae.com/algae/oil/extract/extract.html>.

PACKER, M. Algal capture of carbon dioxide; biomass generation as a tool for greenhouse gas mitigation with reference to New Zealand energy strategy and policy. **Energy Policy**, v. 37, n. 9, p. 3428-3437. Elsevier. doi: 10.1016/j.enpol.2008.12.025, 2009.

PALANI. Comentário no site da rede Oilgae no qual há vários pesquisadores e interessados no tema biocombustíveis de microalgas. Tópico "Best Medium for algae cultivation", **Oilgae blog**, Comentário de especialista, 2011. Disponível em <http://www.oilgae.com/club/topic/previous/18>, Acessado em 17/03/2011.

PANICHELLI, L.; DAURIAT, A.; GNANSOUNOU, E. Life cycle assessment of soybean-based biodiesel in Argentina for export. **Int J Life Cycle Assess** 14:144-159, 2009.

PARK, J. B. K.; CRAGGS, R. J.; SHILTON, A N. Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. **Bioresource technology**, v. 102, n. 1, p. 35-42. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.158, 2011.

PATE, R.; KLISE, G.; WU, B. Resource demand implications for US algae biofuels production scale-up. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3377-3388. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.04.023, 2011.

PE INTERNATIONAL. Handbook for Life Cycle Assessment (LCA) Using the GaBi Education Software Package. **Report**, September 2010, Apêndice A.

PE INTERNATIONAL. Methodology Report – Pilot Study Diesel, Contribution to the Brazilian National Life Cycle Inventory (LCI) Database. Comissioned by **IBICT**. 2008. Disponível em <http://acv.ibict.br/publicacoes/inventarios-brasileiros/datasets-da-replan-no-inventario-do-diesel-brasileiro>, Acessado no dia 29-07-2010.

PERELO, L.W.; SOUSA, L.L.; HORA, D.S. Crescimento da microalga *Nannochloropsis* sp em água salina do semi-árido com adição de esgoto doméstico como fonte de nutrientes. **II Congresso Baiano de Engenharia Sanitária e Ambiental** (COBESA), Feira de Santana – BA, 2012.

PITTMAN, J. K.; DEAN, A. P.; OSUNDEKO, O. The potential of sustainable algal biofuel production using wastewater resources. **Bioresource technology**, v. 102, n. 1, p. 17-25. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2010.06.035, 2011.

PLANO NACIONAL DE AGROENERGIA (PNA). Plano Nacional de Agroenergia 2006-2011. **Embrapa Informação Tecnológica** (2 Edição), Brasília, DF 2006. Disponível em: [www.agricultura.gov.br](http://www.agricultura.gov.br).

QUINN, J.; WINTER, L. DE; BRADLEY, T. Microalgae bulk growth model with application to industrial scale systems. **Bioresource technology**, v. 102, n. 8, p. 5083–92. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2011.01.019, 2011.

RATHMANN, R.; BENEDETTI, O.; PLÁ, J. A.; PADULA, A. D. Biodiesel: Uma alternativa estratégica na matriz energética brasileira? **Revista Biodieselbr**, 2005 Disponível em: <http://www.biodiesel.gov.br/docs/ArtigoBiodieselGINCOB-UFRGS.pdf>, Acessado em 16 de outubro de 2009.

RAWAT, I.; RANJITH KUMAR, R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3411-3424. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.11.025, 2011.

RAZON, L. F. and TAN, R. R.; Net energy analysis of the production of biodiesel and biogas from the microalgae: *Haematococcus pluvialis* and *Nannochloropsis*. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3507-3514, 2011.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature** 461, 24 September 2009.

SALUM, T. F. C. Catálise enzimática produz biodiesel mais verde. Embrapa Agroenergia. **Revista Biodieselbr**, Quarta, 02 março 2011. Acessado em 16 de março de 2011. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/noticias/em-foco/catalise-enzimatica-biodiesel-verde-020311.htm>

SAMORÌ, C.; TORRI, C.; SAMORÌ, G.; et al. Extraction of hydrocarbons from microalga *Botryococcus braunii* with switchable solvents. **Bioresource technology**, v. 101, n. 9, p. 3274-9. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2009.12.068, 2010.

SANDER, K.; MURTHY, G. S. Life cycle analysis of algae biodiesel. **International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, p. 704-714. doi: 10.1007/s11367-010-0194-1, 2010.

SANTOS, I. III Congresso da Rede de Tecnologia de Biodiesel. **BiodieselBR**, 10/11/2009. Transmitido em <http://aovivo.biodieselbr.com/2009/> (informação verbal).

SCOTT, S. A.; DAVEY, M. P.; DENNIS, J. S. et al. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current opinion in **Biotechnology***, v. 21, n. 3, p. 277-286. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.copbio.2010.03.005, 2010.

SEBRAE. BODIESEL. **Relatório**, 2007. Disponível em: [http://www.biodiesel.gov.br/docs/Carilha\\_Sebrae.pdf](http://www.biodiesel.gov.br/docs/Carilha_Sebrae.pdf). Acessado em 20/11/2009.

SFORZA, E.; BERTUCCO, A.; MOROSINOTTO, T.; GIACOMETTI, G. M. Photobioreactors for microalgal growth and oil production with *Nannochloropsis salina*: From lab-scale experiments to large-scale design. *Chemical Engineering Research and Design*, n. December, p. 1-8. Institution of Chemical Engineers. doi: 10.1016/j.cherd.2011.12.002, 2011.

SHEEHAN, J.; DUNAHAY, T.; BENEMANN, J.; ROESSLER, P. A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program—Biodiesel from Algae. **National Renewable Energy Laboratory (NREL) Report**, available at [http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biodiesel\\_from\\_algae.pdf](http://www1.eere.energy.gov/biomass/pdfs/biodiesel_from_algae.pdf), 1998.

SHEIDT, P. AIE alerta para custos da inércia na defesa do clima. **Carbono Brasil**, 2009. Disponível em <http://www.carbonobrasil.com/?id=723727>. Acessado em 11/11/2009.

SINGH, A.; OLSEN, S. I. A critical review of biochemical conversion, sustainability and life cycle assessment of algal biofuels. *Applied Energy*. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.12.012, 2011.

STEPHENSON, A. L.; KAZAMIA, E.; DENNIS, J. S. et al. Life-Cycle Assessment of Potential Algal Biodiesel Production in the United Kingdom: A Comparison of Raceways and Air-Lift Tubular Bioreactors. *Energy & Fuels*, v. 24, n. 7, p. 4062–4077. doi: 10.1021/ef1003123, 2010.

TECLIM e COELBA. Avaliação do Ciclo de Vida de Componentes do Sistema de Distribuição de Energia. **Projeto P&D 0047- 009/06**. Relatório - Salvador, 2009.

U.S. DOE. National Algal Biofuels Technology Roadmap. U.S. Department of Energy, Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, Biomass Program, **Overview** 2010. Disponível em <http://biomass.energy.gov>. Acessado em 27/08/2010

UNIÃO DOS PRODUTORES DE BIOENERGIA (UDOP). Biodiesel não pode depender da soja, diz Lula. Disponível em <http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=1060656> Acessado em 10/11/2009.

UDUMAN, NYOMI; QI, YING; DANQUAH, MICHAEL K.; FORDE, GARETH M.; AND HOADLEY, ANDREW (2010) Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *J. Renewable Sustainable Energy* 2, 012701; doi:10.1063/1.3294480, 2010.

UM, B. H.; KIM, Y. S. Review: A chance for Korea to advance algal-biodiesel technology. **Journal of Industrial and Engineering Chemistry**, v. 15, n. 1, p. 1-7. doi: 10.1016/j.jiec.2008.08.002, 2009.

UNICEF. Biofuel Production from Algae. **Our Energy**, 2009. Disponível em [http://www.our-energy.com/biofuel\\_production\\_from\\_algae.html](http://www.our-energy.com/biofuel_production_from_algae.html) Acessado em: 03/10/2009

US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Life Cycle Assessment: Principles and Practice. **EPA/600/R-06/060**. National Risk Management Research Laboratory, Systems Analysis Branch. Cincinnati, Ohio – USA, 2006.

WARDENAAR, T.; RUIJVEN, T.; BELTRAN, A. M.; VAD, K.; GUINÉE, J.; HEIJUNGS, R. Differences between LCA for analysis and LCA for policy: a case study on the consequences of allocation choices in bio-energy policies. **The International Journal of Life Cycle Assessment**. doi: 10.1007/s11367-012-0431-x, 2012.

WEIDEMA, B. P.; SCHMIDT, J. H. Avoiding Allocation in Life Cycle Assessment Revisited. **Journal of Industrial Ecology**, v. 14, n. 2, p. 192-195. doi: 10.1111/j.1530-9290.2010.00236.x, 2010.

WEIDEMA, B. P.; THRANE, M.; CHRISTENSEN, P.; SCHMIDT, J. AND LOKKE S. Carbon Footprint: A Catalyst for Life Cycle Assessment? **Journal of Industrial Ecology**, Volume 12, Number 1 2008. DOI: 10.1111/j.1530-9290.2008.00005.x, 2008.

YANG, J.; XU, M.; ZHANG, X. et al. Life Cycle Analysis on Biodiesel Production from Microalgae: Water Footprint and Nutrients Balance. **Bioresource Technology**. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2010.07.017, 2011.

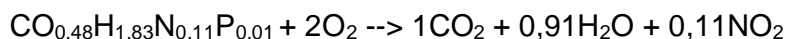
YOO, C.; JUN, S.-YOUNG; LEE, J.-YON; AHN, C.-YONG; OH, H.-MOCK. Bioresource Technology Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. S71-S74. Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.biortech.2009.03.030, 2010.

ZAH, R.; HISCHIER, R.; GAUCH, M.; LEHMANN, M.; BÖNI, H.; WÄGER P. Life Cycle Assessment of Energy Products : Environmental Impact Assessment of Biofuels. **Sumário executivo**, 2007. Disponível em <http://publicationslist.org/zah>. Acessado em 25/07/2012.

## APÊNDICE I

Cálculo do Poder Calorífico Inferior (PCI) baseado na composição celular da biomassa de microalgas, dado por Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007), de  $\text{CO}_{0,48}\text{H}_{1,83}\text{N}_{0,11}\text{P}_{0,01}$ .

Balanço estequiométrico da combustão:



Considerou-se a contribuição do P desprezível no balanço estequiométrico.

A entalpia de vaporização da água ( $\Delta H_{\text{vap}}\text{H}_2\text{O}$ ) a 20°C é 44,016 kJ/gmol.

Abaixo, a tabela de cálculo do PCI da *Nannochloropsis sp.*

C	O	H	N	Comments	Lines
12	16	1	14	Peso atômico	2
1	0,48	1,83	0,11	biomassa de microalgas (Grobbelaar)	3
12	7,68	1,83	1,54	Line 2 x Line 3	4
23,05	g/g.mol			Sum of Line 4	5
1000g is 1kg					6
n	43,38	g.mols		Line 6 divided by Line 5	7
High Heating Value (HHV)	20	MJ/kg		Sforza et al, 2011	8
1 gmol of biomass	0,91	gmol H <sub>2</sub> O			9
vaporization enthalpy of H <sub>2</sub> O	44,02	kJ/gmol			10
	40,05			Line 9 x Line 10	11
1 Kg of biomass	1737,72	kJ		Line 11 x Line 7	12
or	1,73	MJ			13
LHV	<b>18,26</b>	MJ		Line 8 - Line 13	14
LHV/HHV	0,9			Line 14 / Line 8	15
or 1 LHV equivalent to	1,1	HHV		1 / Line 15	16



## APÊNDICE II – caracterização da incerteza dos fluxos

### Lagoas Abertas

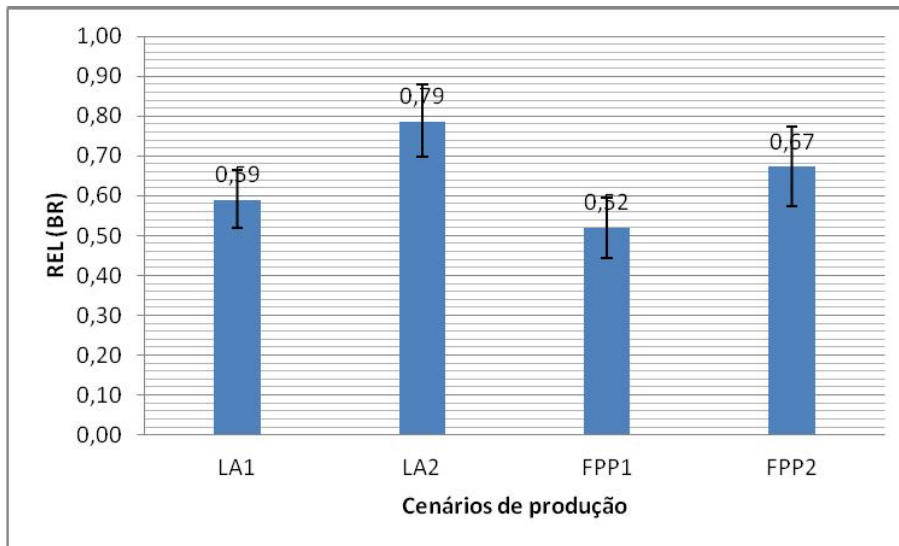
CULTIVO								
Entrada	Quantidade	unidade	fonte	Vetor Pedigree	Vetor Resultado	Incerteza Básica	Variância	
Nitrogênio (N)	0,07	kg/kg	Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007)	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Fósforo (P)	0,01	kg/kg	Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007)	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Potássio (K)	0,01	kg/kg	Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007)	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Transporte dos Fertilizantes	0,02	t.km	Percorre 200km	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	2,00	2,52	
CO2	1,83	kg/kg	Chisti 2007	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Água	2857,14	kg/kg	Jorquera et al. 2009	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Eletricidade	1,05	kWh/kg	Jorquera et al. 2009	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
FLOCULAÇÃO								
Entrada	Quantidade	unidade	fonte	Vetor Pedigree	Vetor Resultado	Incerteza Básica	Variância	
Sulfato de Alumínio Al2(SO4)3	1,3	kg/kg	Razon and Tan (2011)	( 1 , 4 , 1 , 1 , 1 , 4 )	[ 1,00   1,10   1,00   1,00   1,00   1,10 ]	1,05	1,12	
Ácido Hidroclorídrico HCL (15%)	0,3	kg/kg	Razon and Tan (2011)	( 1 , 4 , 1 , 1 , 1 , 4 )	[ 1,00   1,10   1,00   1,00   1,00   1,10 ]	1,05	1,12	
CENTRIFUGAÇÃO								
Entrada	Quantidade	unidade	fonte	Vetor Pedigree	Vetor Resultado	Incerteza Básica	Variância	
Eletricidade	0,06	kWh/kg água	Brentner et al. 2011	( 1 , 4 , 1 , 1 , 1 , 4 )	[ 1,00   1,10   1,00   1,00   1,00   1,10 ]	1,05	1,12	

### Fotobiorreatores placas planas

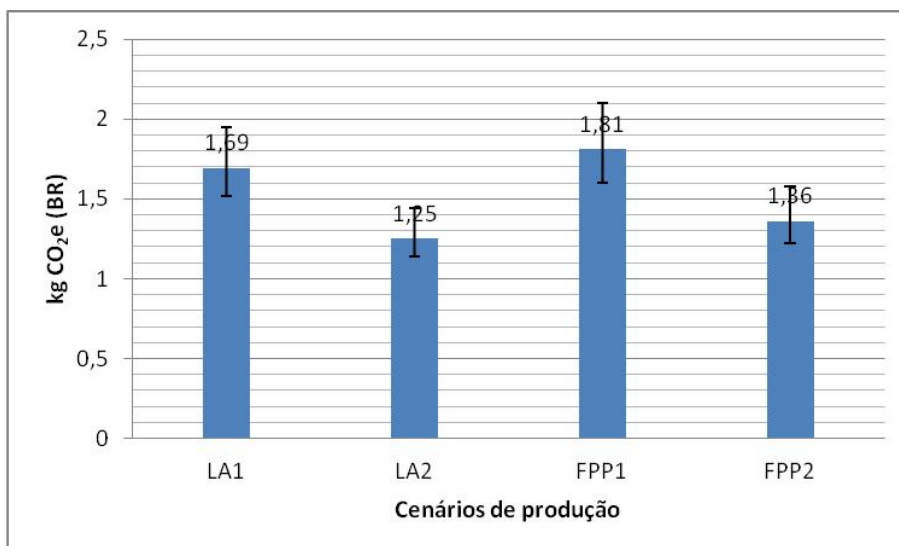
CULTIVO								
Entrada	Quantidade	unidade	fonte	Vetor Pedigree	Vetor Resultado	Incerteza Básica	Variância	
Nitrogênio (N)	0,07	kg/kg	Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007)	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Fósforo (P)	0,01	kg/kg	Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007)	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Potássio (K)	0,01	kg/kg	Grobbelaar (2004 apud Chisti, 2007)	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Transporte dos Fertilizantes	0,02	t.km	Percorre 200km	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	2,00	2,52	
CO2	1,83	kg/kg	Chisti 2007	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Água	370,37	kg/kg	Jorquera et al. 2009	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
Eletricidade	1,94	kWh/kg	Jorquera et al. 2009	( 4 , 4 , 1 , 3 , 4 , 5 )	[ 1,20   1,10   1,00   1,02   1,50   1,20 ]	1,05	1,49	
FLOCULAÇÃO								
Entrada	Quantidade	unidade	fonte	Vetor Pedigree	Vetor Resultado	Incerteza Básica	Variância	
Sulfato de Alumínio Al2(SO4)3	1,3	kg/kg	Razon and Tan (2011)	( 1 , 4 , 1 , 1 , 1 , 4 )	[ 1,00   1,10   1,00   1,00   1,00   1,10 ]	1,05	1,12	
Ácido Hidroclorídrico HCL (15%)	0,3	kg/kg	Razon and Tan (2011)	( 1 , 4 , 1 , 1 , 1 , 4 )	[ 1,00   1,10   1,00   1,00   1,00   1,10 ]	1,05	1,12	
CENTRIFUGAÇÃO								
Entrada	Quantidade	unidade	fonte	Vetor Pedigree	Vetor Resultado	Incerteza Básica	Variância	
Eletricidade	0,001	kWh/kg água	Brentner et al. 2011	( 1 , 4 , 1 , 1 , 1 , 4 )	[ 1,00   1,10   1,00   1,00   1,00   1,10 ]	1,05	1,12	

### APÊNDICE III – Análise do REL e GEE das microalgas com a matriz elétrica brasileira

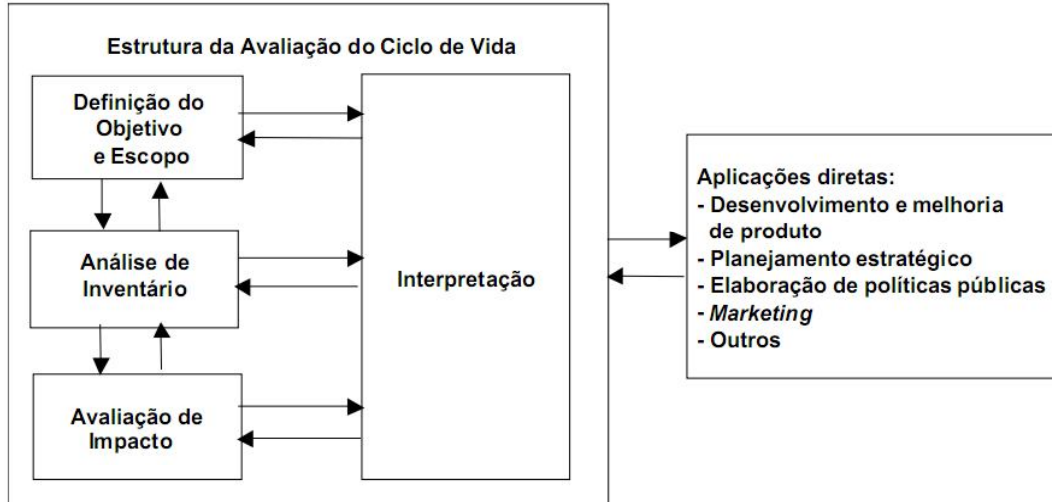
#### REL BR



#### GEE BR



## ANEXO 1 - Fases de um estudo de ACV



Fonte: ABNT NBR ISO 14040, 2009.

## ANEXO 2 – Matriz Pedigree

Pedigree matrix used to assess the quality of data sources, derived from (Pedersen Weidema & Wesnaes 1996)

Indicator score	1	2	3	4	5	Remarks
Reliability	Verified data based on measurements	Verified data partly based on assumptions OR non-verified data based on measurements	Non-verified data partly based on qualified estimates	Qualified estimate (e.g. by industrial expert); data derived from theoretical information (stoichiometry, enthalpy, etc.)	Non-qualified estimate	verified means: published in public environmental reports of companies, official statistics, etc unverified means: personal information by letter, fax or e-mail
Completeness	Representative data from all sites relevant for the market considered over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from >50% of the sites relevant for the market considered over an adequate period to even out normal fluctuations	Representative data from only some sites (<=50%) relevant for the market considered OR >50% of sites but from shorter periods	Representative data from only one site relevant for the market considered OR some sites but from shorter periods	Representativeness unknown or data from a small number of sites AND from shorter periods	Length of adequate period depends on process/technology
Temporal correlation	Less than 3 years of difference to our reference year (2000)	Less than 6 years of difference to our reference year (2000)	Less than 10 years of difference to our reference year (2000)	Less than 15 years of difference to our reference year (2000)	Age of data unknown or more than 15 years of difference to our reference year (2000)	less than 3 years means: data measured in 1997 or later; score for processes with investment cycles of <10 years; for other cases, scoring adjustments can be made accordingly
Geographical correlation	Data from area under study	Average data from larger area in which the area under study is included	Data from smaller area than area under study, or from similar area		Data from unknown OR distinctly different area (north america instead of middle east, OECD-Europe instead of Russia)	Similarity expressed in terms of environmental legislation. Suggestion for grouping: North America, Australia; European Union, Japan, South Africa; South America, North and Central Africa and Middle East; Russia, China, Far East Asia
Further technological correlation	Data from enterprises, processes and materials under study (i.e. identical technology)		Data on related processes or materials but same technology, OR Data from processes and materials under study but from different technology	Data on related processes or materials but different technology, OR data on laboratory scale processes and same technology	Data on related processes or materials but on laboratory scale of different technology	Examples for different technology: - steam turbine instead of motor propulsion in ships - emission factor B(a)P for diesel train based on lorry motor data Examples for related processes or materials: - data for tyles instead of bricks production - data of refinery infrastructure for chemical plants infrastructure
Sample size	>100, continous measurement, balance of purchased products	>20	> 10, aggregated figure in env. report	>=3	unknown	sample size behind a figure reported in the information source

Fonte: FRISCHKNECHT, 2007.

## ANEXO 3 – Incerteza básica

Basic uncertainty factors (dimensionless) applied for technosphere inputs and outputs and for elementary flows; c: combustion emissions; p: process emissions; a: agricultural emissions

input / output group	c	p	a	input / output group	c	p	a
<b>demand of:</b>				<b>pollutants emitted to air:</b>			
thermal energy, electricity, semi-finished products, working material, waste treatment services	1.05	1.05	1.05	CO <sub>2</sub>	1.05	1.05	
transport services (tkm)	2.00	2.00	2.00	SO <sub>2</sub>	1.05		
Infrastructure	3.00	3.00	3.00	NMVOC total	1.50		
<b>resources:</b>				NO <sub>x</sub> , N <sub>2</sub> O	1.50		1.40
primary energy carriers, metals, salts	1.05	1.05	1.05	CH <sub>4</sub> , NH <sub>3</sub>	1.50		1.20
land use, occupation	1.50	1.50	1.10	individual hydrocarbons	1.50	2.00	
land use, transformation	2.00	2.00	1.20	PM>10	1.50	1.50	
<b>pollutants emitted to water:</b>				PM10	2.00	2.00	
BOD, COD, DOC, TOC, inorganic compounds (NH <sub>4</sub> , PO <sub>4</sub> , NO <sub>3</sub> , Cl, Na etc.)		1.50		PM2.5	3.00	3.00	
individual hydrocarbons, PAH		3.00		polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH)	3.00		
heavy metals		5.00	1.80	CO, heavy metals	5.00		
pesticides			1.50	inorganic emissions, others		1.50	
NO <sub>3</sub> , PO <sub>4</sub>			1.50	radionuclides (e.g., Radon-222)		3.00	
<b>pollutants emitted to soil:</b>							
oil, hydrocarbon total		1.50					
heavy metals		1.50	1.50				
pesticides			1.20				

O quadrado do desvio padrão geométrico (intervalo de confiança de 95%) é calculado com a seguinte fórmula:

$$SD_{g95} := \sigma_g^2 = \exp^{\sqrt{[\ln(U_1)]^2 + [\ln(U_2)]^2 + [\ln(U_3)]^2 + [\ln(U_4)]^2 + [\ln(U_5)]^2 + [\ln(U_6)]^2 + [\ln(U_b)]^2}}$$

with :

U<sub>1</sub> : uncertainty factor of reliability

U<sub>2</sub> : uncertainty factor of completeness

U<sub>3</sub> : uncertainty factor of temporal correlation

U<sub>4</sub> : uncertainty factor of geographic correlation

U<sub>5</sub> : uncertainty factor of other technological correlation

U<sub>6</sub> : uncertainty factor of sample size

U<sub>b</sub> : basic uncertainty factor

Fonte: FRISCHKNECHT, 2007.

**UFBA**  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA**  
**ESCOLA POLITÉCNICA**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA INDUSTRIAL - PEI**

Rua Aristides Novis, 02, 6º andar, Federação, Salvador BA  
CEP: 40.210-630  
Telefone: (71) 3283-9800  
E-mail: [pei@ufba.br](mailto:pei@ufba.br)  
Home page: <http://www.pei.ufba.br>

