

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL
SUCROENERGÉTICA**

**AVALIAÇÃO DO USO DO CO₂ DO PROCESSO INDUSTRIAL DO SETOR
SUCROENERGÉTICO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE ALGAS**

CARLA CARRARA FRACASSI

**Piracicaba
2012**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DE PRODUÇÃO INDUSTRIAL
SUCROENERGÉTICA**

**AVALIAÇÃO DO USO DO CO₂ DO PROCESSO INDUSTRIAL DO SETOR
SUCROENERGÉTICO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE ALGAS**

CARLA CARRARA FRACASSI

Monografia apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Gestão de
Produção Industrial Sucoenergética.

Aluna: Carla Carrara Fracassi

Orientador: Prof. Dr. Reinaldo Gaspar
Bastos

**Piracicaba
2012**

Dedico ...

aos meus queridos pais, Nair e Antonio.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao professor Reinaldo pela orientação.

Aos meus pais, Nair e Antonio, pela dedicação incondicional, educação e amor.

A minha irmã, Priscila, pela paciência, sabedoria, carinho, compreensão, amor e todo auxílio.

Ao Eduardo, pelo carinho, amor, paciência e compreensão.

A Simone pela amizade, artigos e dicas.

Aos colegas e professores do MTA.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	3
3. REVISÃO DA LITERATURA	4
3.1 Processo industrial do setor sucroenergético	4
3.1.1 Fabricação do açúcar	5
3.1.2 Fabricação do etanol	6
3.2 Geração de dióxido de carbono no setor sucroenergético	8
3.2.1 Cogeração de energia	8
3.2.2 Fermentação alcoólica	10
3.3 Algas	12
3.3.1 Algas como matéria-prima para produção de biocombustíveis	14
3.4 Sistemas de produção de algas	17
3.5 Produção de biodiesel de algas	22
3.6 Biodiesel de algas	27
3.6.1 Qualidade do biodiesel	28
4. MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Caracterização do objeto de trabalho	29
4.2 Metodologia para quantificar as emissões do dióxido de carbono da combustão de biomassa	29
4.3 Metodologia para quantificar as emissões do dióxido de carbono da fermentação alcoólica	32
4.4 Metodologia para quantificar a produção de biodiesel de alga a partir do dióxido de carbono emitido no processo industrial	33
4.5 Metodologia para estimar as emissões de dióxido de carbono evitadas	35
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
5.1 Cálculo das emissões do dióxido de carbono da combustão de biomassa	36

5.1.1 Usina	36
5.1.2 Estado de São Paulo	39
5.2 Cálculo das emissões do dióxido de carbono da fermentação alcoólica	40
5.2.1 Usina	40
5.2.2 Estado de São Paulo	44
5.3 Cálculo da produção de biodiesel de alga a partir do CO ₂ emitido no processo industrial	46
5.3.1 Usina	46
5.3.2 Estado de São Paulo	47
5.4 Emissões de dióxido de carbono evitadas	48
5.4.1 Usina	48
5.4.1.1 Emissões evitadas de origem de biomassa	48
5.4.1.2 Emissões evitadas de origem não biomassa	50
5.4.2 Estado de São Paulo	51
5.4.2.1 Emissões evitadas de origem de biomassa	51
5.4.2.2 Emissões evitadas de origem não biomassa	53
6. CONCLUSÃO	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

RESUMO

O setor sucroenergético vem apresentando um aumento na oferta interna dos produtos derivados da cana-de-açúcar, chegando a 71% no período de 2002 para 2011, e com isso a liberação de dióxido de carbono (CO₂) provinda da fermentação alcoólica e da cogeração de energia a partir do bagaço da cana-de-açúcar também se intensificou. Diante desse cenário, as algas se destacam por apresentar a capacidade de capturar o CO₂ dos processos industriais, utilizando pequenas áreas e com um grande potencial de rendimento quando comparados com outras culturas, como soja, girassol, pinhão manso, entre outros. Neste sentido, este trabalho tem como objetivo avaliar o potencial do uso do CO₂ do setor sucroenergético no cultivo de algas para produção de biodiesel, contribuindo assim com a redução das emissões de CO₂, principal gás de efeito estufa. Essas reduções incluem as emissões de CO₂ de origem de biomassa, emitidas na fermentação alcoólica e na combustão do bagaço, assim como a redução das emissões de origem não biomassa, provindas da substituição do diesel pelo biodiesel de alga. Para tanto, utilizou-se de dados levantados em uma usina do setor sucroenergético no interior do estado de São Paulo, da Secretária de Energia do estado de São Paulo, da União da Indústria de Cana-de-Açúcar e em diversas referências bibliográficas para o cálculo das emissões de CO₂ dos processos industriais e para a produção do biodiesel de alga a partir do CO₂ liberado nos processos. Os resultados demonstraram que as emissões de origem de biomassa evitadas nos processos de combustão do bagaço e da fermentação alcoólica pelo cultivo das algas são da ordem de 0,7% e 56,7% das emissões de CO₂ da Usina na safra de 2011/2012 e para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008, respectivamente, no estado de São Paulo. Já para as emissões de CO₂ de origem não biomassa, provindas da substituição do diesel pelo biodiesel de alga derivadas do CO₂ da cogeração de energia e a fermentação alcoólica contribuíram com uma redução 1,1% e 74,1% para a Usina na safra de 2011/2012 e para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008, respectivamente, no estado de São Paulo.

Palavras-chave: setor sucroenergético, dióxido de carbono, algas e biodiesel.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas induzidas pelo aumento da concentração de gases de efeito estufa (GEE) tem sido destaque em diversos estudos e políticas públicas, fundamentais na mitigação dos GEE e no desenvolvimento de novas tecnologias.

Meira e Macedo, (20--) destaca a importância do uso de fontes de energia renovável, como o etanol, no contexto nacional e internacional como uma estratégia para a mitigação da emissão de GEE. O etanol da cana-de-açúcar já apresenta o melhor balanço energético, emissões muito favoráveis (e poderá melhorar ainda mais), disponível comercialmente e pode expandir rapidamente com novas aplicações e em muitos países.

O Balanço Energético Nacional (Brasil, 2011) apresentou um aumento de 71% na oferta interna dos produtos derivados da cana-de-açúcar em Tonelada Equivalente de Petróleo (Tep) do período de 2002 para 2011. E em consequência desse acréscimo, destaca-se o aumento da liberação de dióxido de carbono (CO_2) provinda da fermentação alcoólica e das plantas de energia (cogeração) a partir do bagaço da cana-de-açúcar.

Matsudo, (2010); Maeda et al., (1995) e Richmond (1983) citado por Matsudo, (2010) concluem em seus trabalhos que o uso do CO_2 do processo de fermentação alcoólica para cultivo de microalgas pode ser uma boa alternativa como fonte de carbono, promovendo assim a redução nos custos de produção das microalgas e a redução do CO_2 na atmosfera, principal GEE.

Hundt e Reddy, (2011) cita a captura do CO_2 liberado pelas plantas de energia para produzir biodiesel de alga como uma forma de reduzir as emissões de GEE. Contribuindo assim com a redução das emissões de origem de biomassa emitidas na combustão do bagaço da cana-de-açúcar, assim como a redução das emissões de origem não biomassa, provindas da substituição do diesel pelo biodiesel de alga.

O biodiesel de alga tem surgido como a melhor promessa de biodiesel, devido a vários fatores, dentre eles, o cultivo das algas sem necessidade de terras férteis, maior rendimento por hectare de biodiesel entre oleaginosas, assim como o aproveitamento de efluentes e gases industriais. O biodiesel proveniente de algas

também pode ser visto como um agente para reduzir o consumo de energia de fonte fóssil e a minimização das concentrações atmosféricas de CO₂, no caso de fotobiorreatores (VALDERRAMA et al., 2002; DE-BASHAN et al., 2004; SHEEHAN et al., 1998; CHISTI, 2007b; ZEPKA et al, 2007 citado por FRANCISCO, 2010).

Considerando a preocupação com a redução dos gases de efeito estufa, substituição de combustíveis fósseis por biocombustíveis, e o iminente crescimento na produção de etanol ainda nos próximos anos, esse trabalho propõe o uso do CO₂ liberado pela cogeração de energia e fermentação alcóolica como substrato para produção de algas e estas para a produção de biodiesel, contribuindo assim para o desenvolvimento sustentável.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o potencial do uso do dióxido de carbono (CO₂) do setor sucroenergético no cultivo de algas para produção de biodiesel.

Como objetivos específicos para avaliar o uso do CO₂ no cultivo de algas, têm-se:

- estimar as emissões de CO₂ de uma Usina de Açúcar, Etanol e Energia e do setor sucroenergético do estado de São Paulo, provenientes dos processos de cogeração de energia e fermentação alcoólica;
- estimar a geração de biodiesel produzido a partir das algas cultivadas com o CO₂ industrial;
- estimar as emissões evitadas de CO₂ no processo industrial (biomassa) e em substituição do combustível fóssil (não biomassa).

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Processo industrial do setor sucroenergético

O processo industrial do setor sucroenergético se configura com uma importante flexibilidade de utilizar os açúcares da cana total ou parcialmente para produção de etanol ou açúcar, dependendo das condições de preço, demanda existente e perspectivas de mercado, pode arbitrar, dentro de limites, um programa de produção de mínimo custo e máximo benefício econômico (BNDES, CGEE, 2008).

O fluxograma do processo de produção de açúcar e etanol são apresentados na Figura 1 e detalhado nos tópicos a seguir.



Figura 1. Fluxograma do sistema de produção do setor sucroenergético.

Fonte: Seabra, (2008) citado por BNDES, CGEE, (2008) adaptado pela autora.

3.1.1 Fabricação do açúcar

Uma vez transportada até a usina, a cana é estocada ou diretamente enviada para moagem. Prevendo-se eventuais paradas no sistema de transporte, costuma-se manter uma certa quantidade de cana em estoque (sobre rodas), que deve ser renovado em curtos espaços de tempo para evitar a perda da sacarose (SEABRA, 2008).

De acordo com BNDES, CGEE, (2008) a cana segue para a moagem passando pela lavagem (somente para cana inteira) e posteriormente para o sistema de preparo e extração, que no Brasil é baseado em moendas, isto é, a extração do caldo se realiza sob pressão de rolos, montados em conjuntos com quatro a sete sucessivos ternos de moenda. No conjunto de rolos da moenda, o caldo, que contém a sacarose, é separado da fibra da cana-de-açúcar (bagaço), que segue para a planta de energia da usina, na qual é usada como combustível.

Com o objetivo de aumentar o rendimento da extração, utiliza-se a embebição, que consiste na adição de água ao bagaço para diluir seu caldo remanescente. O processo mais utilizado é a embebição composta, na qual a água é adicionada entre os dois últimos ternos da moenda, com retorno do caldo extraído do último terno para o anterior e, assim sucessivamente até o segundo terno (SEABRA, 2008).

Em algumas novas unidades implantadas no Brasil, tem sido adotada a extração por difusão, com expectativas de vantagens do ponto de vista energético. Nos difusores, a cana picada e desfibrada passa por sucessivas lavagens com água quente, cedendo por lixiviação seus açúcares, e, ao final, passa por um rolo de secagem, de onde sai o bagaço a ser utilizado nas caldeiras. Produzido na moenda ou no difusor, o caldo contendo os açúcares da cana pode, então, ser destinado à produção de açúcar ou etanol (BNDES, CGEE, 2008).

O caldo, ao sair da moenda, passa pelo tratamento primário, para a eliminação das impurezas insolúveis (areia, argila, bagacilho, etc), e pelo tratamento químico (sulfitação e calagem). Com a sulfitação (adição de sulfito para baixar o pH do caldo), busca-se inibir as reações que causam formação de cor, coagular os colóides solúveis, precipitar o sulfito de cálcio e diminuir a viscosidade do caldo. Já a calagem (neutralização do caldo pela adição de cal) tem como objetivos a

eliminação de corantes, a neutralização de ácidos orgânicos e a formação de sulfito e fosfato de cálcio, produtos que, ao sedimentar, arrastam consigo impurezas presentes no líquido (SEABRA, 2008).

Após o tratamento químico, o caldo é aquecido e segue para a filtração/decantador, onde serão separadas as impurezas floculadas (lodo). O lodo retirado é adicionado de bagacilho e filtrado para a recuperação de açúcar, e a torta residual (torta de filtro) é encaminhada à lavoura. O caldo clarificado (com 14 - 16°Brix) segue para a concentração em evaporadores de múltiplos-efeitos, dando origem ao xarope, com aproximadamente 60°Brix (SEABRA, 2008).

De acordo com Seabra, (2008), o xarope, ao sair dos evaporadores, é enviado para os cozedores, onde será formada a massa cozida: uma mistura com 91-93°Brix de 50% de cristais envolvidos em mel (solução açucarada). Dependendo da conveniência, pode-se trabalhar com sistemas de uma, duas ou três massas cozidas. Dos cozedores a massa cozida segue para os cristalizadores, para recuperar parte da sacarose que ainda se acha dissolvida no mel, e, então, é descarregada nas centrífugas.

Na centrífuga, os cristais de sacarose ficam retidos no cesto, onde são lavados com água e vapor. O mel removido é coletado e enviado, de volta, aos cozedores para a recuperação do açúcar dissolvido ainda presente, até que se atinja um maior esgotamento. A partir desse ponto, o mel passa a ser denominado mel final, ou melaço, e é enviado para a fabricação de álcool. O açúcar descarregado das centrífugas é encaminhado para a secagem para, finalmente, ser ensacado (SEABRA, 2008).

3.1.2 Fabricação do etanol

A produção de etanol de cana-de-açúcar pode se basear na fermentação tanto do caldo da cana quanto de misturas de caldo e melaço, como é mais frequentemente praticada no Brasil. No caso de etanol de caldo direto, as primeiras etapas do processo de fabricação, da recepção da cana ao tratamento inicial do caldo, são semelhantes ao processo de fabricação do açúcar. Em um tratamento mais completo, o caldo passa pela calagem, aquecimento e decantação, assim como no processo do açúcar. Uma vez tratado, o caldo é evaporado para

ajustar sua concentração de açúcares e, eventualmente, é misturado com o melão, dando origem ao mosto (BNDES, CGEE, 2008).

Conforme Seabra, (2008) o mosto segue para as dornas de fermentação, onde é adicionado de leveduras (ex. *Saccharomyces cerevisiae*) e fermentado por um período de 6 a 12 horas, seguindo para a destilação.

Na destilação, o álcool é recuperado com auxílio de sete colunas distribuídas em quatro troncos: destilação propriamente dita, retificação, desidratação e debenzolagem. Na primeira etapa, o etanol é separado do vinho e sai com a flegma (vapores com 40 a 50°GL), que é enviada à retificação. Os voláteis dão origem ao álcool de 2ª, e o produto de fundo (vinhaça), constituído principalmente de água, sais, sólidos em suspensão e solúveis, é enviado à lavoura, para a fertirrigação da cana. A proporção média de vinhaça é de 13 litros por litro de álcool produzido (SEABRA, 2008).

Na retificação, a flegma é concentrada a uma graduação de aproximadamente 96°GL e purificada, dando origem ao álcool hidratado. O álcool produzido pode ser diretamente armazenado, ou enviado para a desidratação, para a produção do álcool anidro. Os voláteis retirados no topo da coluna são condensados e uma fração é reciclada, enquanto outra é retirada como álcool de 2ª. Do fundo, retira-se uma solução aquosa chamada flegmaça, que pode ser reciclada ou eliminada. Os álcoois homólogos superiores (óleo fúsel e alto) são retirados de bandejas próximas à entrada da flegma; o óleo alto retorna à dorna volante, e o óleo fúsel é resfriado, lavado, decantado e armazenado para posterior comercialização (SEABRA, 2008).

Como o álcool hidratado é uma mistura azeotrópica, seus componentes não podem ser separados por uma simples destilação. A tecnologia mais utilizada no Brasil é a desidratação através da adição do ciclohexano, formando uma mistura azeotrópica ternária, com ponto de ebulição inferior ao do álcool anidro. Na coluna de desidratação, o ciclohexano é adicionado no topo, e o álcool anidro é retirado no fundo, com aproximadamente 99,7°GL. A mistura ternária retirada do topo é condensada e decantada, e a parte rica em água é enviada à coluna de recuperação de ciclohexano (SEABRA, 2008).

Segundo BNDES, CGEE, (2008) a desidratação do etanol ainda pode ser feita por adsorção com peneiras moleculares ou pela destilação extrativa com

monoetilenoglicol (MEG), que se destacam pelo menor consumo de energia e também pelos custos mais elevados.

Por conta das crescentes exigências do mercado externo, diversos produtores de etanol no Brasil e em outros países estão optando pelas peneiras moleculares, já que são capazes de produzir um etanol anidro livre de contaminantes (BNDES, CGEE, 2008). E por conta disso Seabra, (2008) afirma que espera-se uma grande disseminação do seu uso nos próximos anos, na busca por atender os padrões de exigência do mercado internacional.

3.2 Geração de dióxido de carbono no setor sucroenergético

A geração do dióxido de carbono no setor industrial sucroenergético ocorre principalmente no processo de cogeração de energia através da combustão do bagaço de cana-de-açúcar e no processo de fermentação alcoólica, que estão descritos a seguir.

3.2.1 Cogeração de energia

A Cogeração de energia no setor sucroenergético é extremamente importante, tendo em vista o uso intensivo da energia, principalmente com relação à parcela térmica. Em média, o consumo das usinas é de aproximadamente 330 kWh/tc de energia térmica (equivalente a 500 kg de vapor por tonelada de cana), além dos 16 kWh/tc de energia mecânica (sistema de preparo, moenda e motobombas) e dos 12 kWh/tc de energia elétrica (SEABRA, 2008).

Conforme Seabra, (2008) o sistema energético das usinas de açúcar e etanol é constituído de caldeiras a bagaço e turbinas de contrapressão, que acionam geradores e os equipamentos mais pesados (facas, desfibradores, moendas, exaustores, bombas de água de alimentação de caldeiras); o vapor exausto das turbinas é direcionado para o processo, em um esquema de cogeração pura, onde é utilizado principalmente na concentração do caldo e destilação do álcool, conforme Figura 2.

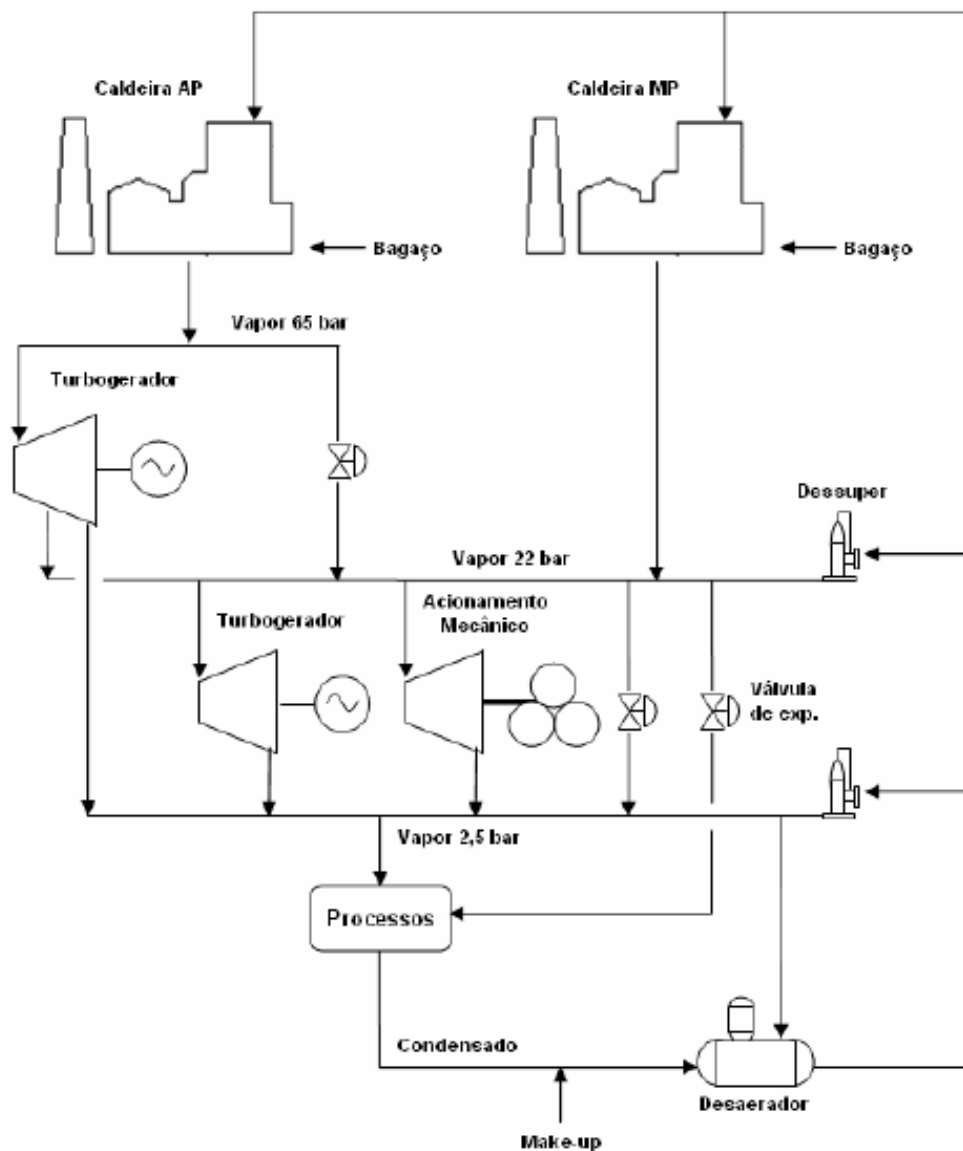


Figura 2. Fluxograma simplificado do sistema energético de uma usina que opera com vapor de alta pressão.

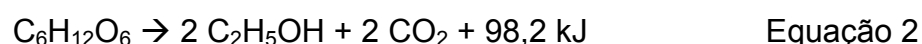
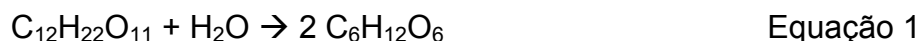
Fonte: Seabra, (2008)

Através do sistema energético apresentado anteriormente ocorre a combustão do bagaço de cana-de-açúcar nas usinas. A combustão é definida pelo *GHG Protocol Guidance*, (2005) como um processo de rápida oxidação das substâncias (ex. bagaço) com a liberação de energia térmica (calor). Durante o processo de combustão os gases de efeito estufa, principalmente o CO₂, são formados e emitidos, a menos que capturado ou controlado.

3.2.2 Fermentação alcoólica

A via fermentativa é a maneira mais importante e utilizada para a obtenção do álcool etílico, ou etanol, no Brasil. Mesmo que haja disponibilidade de derivados de petróleo que permitam a produção de álcool via sintética, a via fermentativa apresenta grandes vantagens ambientais e econômicas, já que há um grande número de matérias-primas naturais (renováveis) existente em todo o país (LIMA et al, 2001 citado por MATSUDO, 2010).

A fermentação do caldo de cana-de-açúcar ou da mistura de melão e caldo de cana ocorre através de um processo bioquímico, onde a sacarose ($C_{12}H_{22}O_{11}$) se converte em a glicose ($C_6H_{12}O_6$) e está em álcool (C_2H_5OH), de acordo com a reação simplificada de Gay-Lussac:



Durante a reação, ocorre uma intensa liberação de CO_2 e de calor e são formados alguns produtos secundários, como álcoois superiores, ésteres, glicerol e aldeídos (MACEDO e CORTEZ, 2005 citado por MATSUDO, 2010).

A Tabela 1 apresenta os rendimentos dos produtos e subprodutos da fermentação alcoólica em g/100g de glicose metabolizada para diferentes eficiências.

Tabela 1. Produtos e subprodutos da fermentação alcoólica

Produtos da Fermentação	Pauster 95%	Jackman, 1987 90 – 95%	Basso et.al.1996 85 – 92%
Etanol	48,5	45,0 – 49,0	43,0 – 47,0
Dióxido de carbônico	46,4	43,0 – 47,0	41,0 – 45,0
Glicerol	3,3	2,0 – 5,0	3,0 – 6,0
Ácido succínico	0,6	0,5 – 1,5	0,3 – 1,2
Ácido acético	–	0,0 – 1,4	0,1 – 0,7
Oleo fúsel	–	0,2 – 0,6	–
Butilenoglicol	–	0,2 – 0,6	–
Biomassa (massa seca)	1,2	0,7 – 1,7	1,0 – 2,0

Fonte: Jackman, E.A., (1987); Basso et al, (1996) citado na aula MTA – Bioprocessos no setor sucroenergético.

De acordo com Carbogás, (2008) citado por BNDES, CGEE, (2008) o CO₂ produzido nas dornas de fermentação é, geralmente, lavado para recuperar o etanol arrastado e liberado na atmosfera, mas pode ser purificado, desodorizado, liquefeito e armazenado sob pressão para outros fins, como na produção de refrigerantes, gelo seco, na fabricação de bicarbonato de sódio e no tratamento de efluentes.

Outro exemplo é o beneficiamento do dióxido de carbono da Usina JB Açúcar e Álcool, em Vitória de Santo Antão (PE) que produz 0,76 Kg CO₂/l etanol anidro, ou seja, durante a safra produz 528 toneladas mensais de CO₂ de grau alimentar provindos da fermentação alcoólica. [CARBOGÁS, (2008) citado por BNDES, CGEE, (2008)].

Conforme Matsudo, (2010) analisando a reação da fermentação alcoólica as formações de etanol e CO₂ em termos de massa são praticamente iguais (0,96 g CO₂/ g etanol). Portanto com o aumento da produção de etanol, há como consequência, o aumento da produção de CO₂, que poderá ser empregado diretamente no cultivo de *Arthrospira platensis* (cianobactérias). O acoplamento da produção industrial de *Arthrospira platensis* à indústria sucroenergética, aproveitando o CO₂ da fermentação alcoólica, pode ser promissor. Isso porque a produção da cianobactéria poderá ser executada durante todo o ano, inclusive no período de entressafra da cana-de-açúcar, período de maior irradiação solar, utilizando o CO₂ armazenado, o que também permitirá a fixação do homem na indústria.

Matsudo, (2010) conclui em seu trabalho que o emprego do CO₂ da fermentação alcoólica obteve resultados satisfatórios no cultivo contínuo da cianobactéria *Arthrospira platensis*, promovendo assim a redução nos custos de produção e a redução do CO₂ na atmosfera, principal gás de efeito estufa. Resultados similares foram obtidos nos trabalhos de Ferraz *et al.* (1985), Richmond (1983) citado por Matsudo, (2010).

3.3 Algas

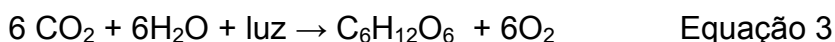
As algas pertencem, principalmente, a um grande grupo organismos fotossintetizantes, sendo eles subdivididos em duas principais categorias baseados fundamentalmente no seu tamanho. As macroalgas que são definidas como uma estrutura anatômica semelhante a folhas, talos e a raízes de altas plantas e as microalgas que são pequenos microrganismos que podem ser encontrados em uma variedade de habitats aquáticos (IEA BIOENERGY, 2011).

O termo microalgas inclui tanto organismos eucarióticos, como as algas verdes, quanto procarióticos como as diatomáceas, as clorofíceas e as cianobactérias (ANAND, 1998 citado por JACOB-LOPES, 2007).

As microalgas são encontradas no ambiente marinho, em água doce e no solo, sendo consideradas responsáveis por pelo menos 60% da produção de matéria orgânica da biosfera. O número das espécies destes organismos não é conhecido exatamente, no entanto, são encontradas citações que relatam a existência de 200.000 até alguns milhões de representantes deste grupo (NORTON et al., 1996; PULZ & GROSS, 2004 citado por FRANCISCO, 2010).

As microalgas são altamente produtivas em uma escala global, com células dobrando de uma a quatro vezes por dia (FIELD et al., 1998 citado por IEA BIOENERGY, 2011).

Segundo IEA Bioenergy, (2011) a maioria das microalgas, como plantas terrestres, cresce e multiplica-se através da fotossíntese, um processo onde a energia da luz é convertida em energia química por meio da fixação do CO₂ atmosférico, conforme descrito na Equação 3 simplificada.



Os açúcares, como a glicose (C₆H₁₂O₆), formados pela fotossíntese são convertidos para todos os outros componentes celulares (lipídios, carboidratos e proteínas) que constituem a massa da célula das microalgas, chamada biomassa (IEA BIOENERGY, 2011).

Devido, principalmente, a sua simples estrutura reprodutiva, as microalgas podem gastar mais energia na apreensão e conversão da energia da luz

e CO₂ em biomassa, portanto as microalgas se destacam por serem eficientes conversores de energia solar (IEA BIOENERGY, 2011).

De acordo com Maeda et al., (1995) citado por Matsudo, (2010) a fixação de CO₂ por cianobactérias tem sido proposta como método de remover CO₂ liberado para a atmosfera, e então pode ser usada para reduzir a emissão dos gases causadores do efeito estufa.

As microalgas além de terem um crescimento extremamente rápido, comparando-se com outras oleaginosas, ainda são ricas em óleos. Nem todas as espécies podem ser consideradas como satisfatórias para a produção de biodiesel, mas os óleos adequados para essa finalidade parecem comumente em suas células. O uso das microalgas ainda oferece a vantagem de não comprometer a produção de alimentos (CHISTI, 2007b citado por FRANCISCO, 2010).

Hundt e Reddy, (2011) destaca que além da alga não requerer solo fértil, estas podem crescer em uma grande variedade de áreas incluindo tanques de efluentes, água contaminada, oceano ou em especial reatores. A produção de algas em sistemas fechados tem potencial de consumir muito menos água que as culturas de plantas, concluindo que a energia da alga é potencialmente disponível a maioria das nações e que o uso de alga como fonte de combustível não afeta o fornecimento de comida e água como os grãos, oleaginosas e outras culturas.

Além das algas não demandarem de um determinado tipo de área para seu crescimento, dependendo da espécie elas demonstraram um grande potencial de rendimento quando comparados com outras culturas, conforme Tabela 2.

Tabela 2. Comparação dos rendimentos de óleo das matérias-primas de biomassa

Safra	Rendimento do Óleo (litros/ha/ano)
Soja	450
Camomila	560
Girassol	955
Pinhão Manso	1.890
Óleo de palma	5.940
Algas	3.800 – 50.800

Fonte: Darzins *et al* (2010) citado por IEA Bioenergy, (2011).

Baseado nessas razões o estudo de microalgas tem tido sua importância intensificada para utilização nas mais diversas áreas, além do seu potencial para o uso em produção de biocombustíveis e fixação de CO₂, também há a possibilidade de obtenção de produtos químicos, alimentos e aplicação na purificação de água (BENEMANN et al., 2003 citado por FRANCISCO, 2010).

3.3.1 Algas como matéria-prima para produção de biocombustíveis

IEA Bioenergy, (2010) destaca que mais de 50 anos de pesquisa tem demonstrado o potencial de várias espécies de microalgas para produzir diversos químicos intermediários e hidrocarbonetos que podem ser convertidos em biocombustíveis. A Figura 3 apresenta um resumo dos químicos intermediários provindos das microalgas e os combustíveis que podem ser produzidos destes importantes componentes. As três maiores macromoléculas que podem ser extraídas da biomassa de microalgas são lipídios (maior quantidade), carboidratos e proteínas. Os lipídios, que aparecem como triglicerídios do óleo da alga, pode ser convertido em biodiesel e sintético diesel “verde”. Os carboidratos podem ser convertidos em etanol e alcanos. As proteínas podem ser convertidas em metano e hidrogênio. A biomassa residual pode ser convertida em metano e hidrogênio.

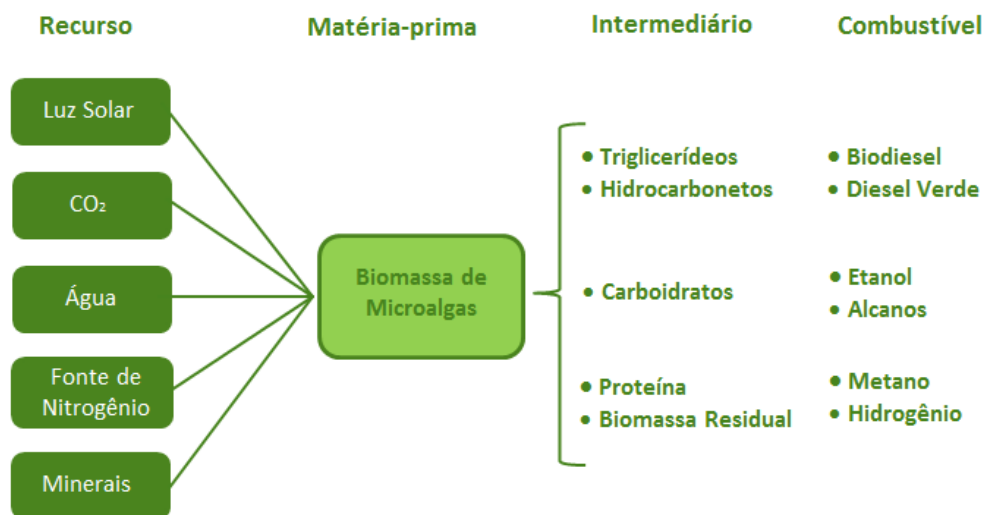


Figura 3. Oportunidades de produção de combustíveis a partir dos componentes das células de microalgas.

Fonte: IEA Bioenergy, (2010).

Hundt e Reddy, (2011) cita que a ampla variedade de espécies de algas oferece aos pesquisadores muitas opções de cultura e uma grande variedade de ambientes. A simples estrutura das algas que fazem elas relativamente fáceis de estudar, testar e até mesmo modifica-las geneticamente, contribui para que a alga

seja a mais promissora fonte de combustível futura. Adicionalmente, o biodiesel de alga pode melhorar a segurança nacional de energia pela redução da dependência de combustíveis fósseis e contribuir com a redução dos gases de efeito estufa.

O uso de lipídeos microbianos, organismos unicelulares, tem atraído grande atenção no mundo inteiro para a produção de biodiesel. Embora exista a presença de óleos em microrganismos, como microalgas, bacilos, fungos e leveduras, nem todos podem ser utilizados para a produção de biodiesel (RATLEDGE & COHEN, 2008 citado por FRANCISCO, 2010).

Os óleos provenientes de microalgas se diferem da maioria dos óleos vegetais por serem ricos em ácidos graxos poliinsaturados com quatro ou mais duplas ligações. Os triglicerídeos são os lipídeos mais comumente acumulados e podem constituir acima de 80% da fração total dos lipídeos nas cianobactérias (KLYACHKO-GEVAVICH, 1974; TORNABENE et al., 1983 BELARB et al., 2000 citado por FRANCISCO, 2010).

Chisti, (2007b) citado por Francisco, (2010) destaca que nem todas as espécies de microalgas podem ser consideradas como satisfatórias para a produção de biodiesel, mas os óleos adequados para essa finalidade parecem comumente em suas células. A Tabela 3 apresenta algumas espécies produtoras de lipídeos e suas respectivas quantidades em massa seca.

Tabela 3. Porcentagem lipídica em microalgas.

Espécies	Conteúdo de óleo (% em massa seca)
<i>Botryococcus braunii</i>	25 – 75
<i>Chlorella sp.</i>	28 – 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca sp.</i>	16 – 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochysis sp.</i>	25 – 33
<i>Monallanthus salina</i>	>20
<i>Nannochloris sp.</i>	20 – 35
<i>Nannochloropsis sp.</i>	31 – 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 – 54
<i>Nitzschia sp.</i>	45 – 47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 – 30
<i>Schizochytrium sp.</i>	50 – 77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15 – 23

Fonte: Chisti, (2007b) citado por Francisco, (2010).

As microalgas tendem a alojar sua fonte de energia na forma de lipídeos conforme a idade da cultura. O armazenamento de lipídeos pelas microalgas pode ser bem elevado em relação a quantidade total dos demais compostos, os lipídeos são principalmente estocados nos vacúolos como material de reserva (YONGMANTCHAI & WARD, 1989; BOROWITZKA, 1994 citado por FRANCISCO, 2010).

De acordo com Vermaas, (1998) citado por Francisco, (2010) as cianobactérias acumulam lipídeos em suas membranas tilacoides, que são associadas com altos níveis de fotossíntese e altas taxas de crescimento. Deste modo, bactérias fotossintetizantes possuem a vantagem natural para a produção de altas taxas de lipídeos. Além disso, cianobactérias são procariontes, podendo ser aperfeiçoadas através de manipulações genéticas muito mais facilmente que microalgas eucarióticas.

Algumas espécies apresentam maior porcentagem de ácidos graxos na fase estacionária enquanto outras, na fase exponencial. Geralmente a porcentagem total aumenta na fase estacionária tanto para ácidos graxos saturados, monoinsaturados quanto para poliinsaturados. No cultivo das microalgas, a taxa de

crescimento e a concentração de ácidos graxos poliinsaturados podem ser potencializados pelo uso de fontes de carbono suplementares (PRATOOMYOT et al., 2005; CERON GARCIA et al., 2005 citado por FRANCISCO, 2010).

Na dissertação de Francisco, (2010) analisa-se a melhor produtividade de biodiesel, sequestro de CO₂ e qualidade do biodiesel de alga para seis espécies, sendo duas cianobactérias *Aphanothece microscopica Nagéli* e a *Phormidium sp.* e quatro microalgas verdes, *Chlorophyceae* stricto sensu, a *Chlorella vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* e a *Dunaliella tertiolecta*. Concluindo a melhor produtividade de biodiesel para *Chlorella vulgaris*, melhor produção de biomassa e sequestro de CO₂ para a *Aphanothece microscopica Nagéli* e a qualidade do biodiesel para as seis espécies atendem as legislações internacionais.

3.4 Sistemas de produção de algas

Existem diferentes métodos de cultivos de microalgas, como o autotrófico, que consiste no emprego de luz como fonte energética para a fixação de CO₂ pela oxidação de substratos; o heterotrófico, que é o emprego de compostos orgânicos sem a utilização de luz, onde o carbono orgânico é utilizado como fonte energética e construção de biomassa; e o mixotrófico, utiliza tanto de uma fonte luminosa quanto de substrato orgânico como fonte de energia, sendo a fotossíntese a principal fonte energética (CHOJNACKA & MARQUEZ-ROCHA, 2004 citado por FRANCISCO, 2010).

O cultivo mixotrófico apresentar-se como o processo mais eficiente para a produção de biomassa, já que o uso simultâneo do dióxido de carbono e do carbono orgânico implica em uma economia na energia gasta para a síntese de todo o aparato fotossintético e para a fixação de carbono (LEE, 2004 citado por FRANCISCO, 2010).

Para uma escolha correta do meio de cultivo a ser utilizado, é necessário levar em consideração o tipo de cepa utilizada e o produto desejado, como biomassa, ácido graxo, pigmentos, entre outros (JIANG et al., 1999 citado por FRANCISCO, 2010). Entretanto, atualmente, o método mais comum para o cultivo de microalgas é o crescimento autotrófico, uma vez que microalgas são seres fotossintetizantes, com algumas espécies especialmente eficientes em converter a energia solar (PEREZ-GARCIA ET AL., 2011 citado por BONINI, 2012).

Para o crescimento da alga requer-se luz, água, dióxido de carbono, e nutrientes inorgânicos como os nitratos, fosfatos, ferro e traços de elementos. A temperatura ótima para o crescimento das algas tende ser na faixa de 20 a 30° C (DEMIRBAS, Da, 2010 citado por HUNDT e REDDY, 2011).

Segundo Hundt e Reddy, (2011) o cultivo de microalgas pode ser realizado em diversos sistemas. Primeiramente, o mais básico e simples é uma lagoa rasa e aberta, onde resíduos com água e outras substâncias ricas em nutrientes são adicionados e essas filtradas pela alga. Um dos benefícios desse sistema é a remoção de nitrogênio e fósforo das lagoas de efluentes, permitindo assim a purificação da água e o rápido crescimento das algas devido aos altos níveis de nutrientes. Esse sistema é barato, entretanto apresenta dificuldade no controle da eficiência de crescimento e cultivo das algas.

Outro sistema usado é o chamado de *Raceway*. Este sistema também é uma lagoa rasa e aberta, mas com um design de circuito, onde os nutrientes são continuamente adicionados em um local e as algas produzidas em outro, conforme Figura 4. A água se mantém circulando na lagoa, ajudando assim a mistura dos nutrientes e a prevenção da sedimentação dos sólidos (DEMIRBAS, 2010 citado por HUNDT E REDDY, 2011).

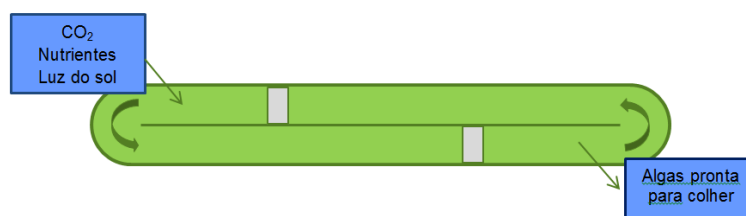


Figura 4. *Raceway* para produção de algas com dois sistemas motorizados para circular a água.

Fonte: IEA Bioenergy, (2011).

De acordo com IEA Bioenergy, (2011) frequentemente as *Raceway* são alinhadas lado a lado para criar extensas fazendas de algas como a lagoa ao ar livre da empresa Cyanotech Corporation que é apresentada na Figura 5.



Figura 5. Visão aérea da lagoa de alga da empresa Cyanotech Corporation em Kailua Kona, Hawaii.

Fonte: IEA Bioenergy, (2011).

Em escala comercial as lagoas abertas tipicamente produzem aproximadamente 20 toneladas de biomassa por hectare por ano (Wageningen, 2010 citado por IEA Bioenergy, 2010).

Para Hundt e Reddy, (2011) o sistema mais caro e que vem se tornando muito popular é chamado de fotobiorreator. O fotobiorreator é um sistema fechado podendo ser de tubos, placas, sacos ou cúpulas transparentes, conforme ilustrado na Figura 6 (WAGENINGEN, 2010 citado por IEA BIOENERGY, 2010).



Figura 6. Vários designs de Fotobiorreatores (FBR) usado na indústria. Da esquerda para direita: FBR Caixa Brite (Fonte: Natural Resources Canada); FBR Tubular (Fonte da Imagem: Bioprodukte Prof. Steinberg); FBR Embrulhado (Fonte: The University of Georgia); FBR de Alta Densidade Vertical (Fonte: Vertigro Products, Inc.).

Fonte: IEA Bioenergy, (2011).

Individualmente os tubos geralmente variam de 3 a 10 cm de diâmetros, permitindo que suficiente luz alcance o centro dos tubos, e frequentemente variam 25-100 metros de comprimento (WAGENINGEN, 2010 citado por IEA BIOENERGY, 2010).

Conforme Hundt e Reddy, (2011) a água e alga são circuladas através do tubo limpo exposto a luz do sol ou artificial, onde os nutrientes e uma fonte concentrada de CO₂ são adicionados continuamente para o crescimento das algas.

Calcula-se que o carbono representa um dos principais componentes dos custos de operação para o cultivo de *Arthrospira*, considerando o capital, mão-de-obra, água, nutrientes e energia (BOROWITZKA, 1992 citado por MATSUDO, 2010).

A fim de minimizar os custos de operação de um fotobiorreator, considera-se as plantas de energia como uma fonte ideal de CO₂ exaurido, contribuindo na circulação, mistura e a reduzir as incrustações do tubo. Ao mesmo tempo, o consumo das algas reduz a emissão dos gases de efeito estufa da planta de energia. Por outro lado, o oxigênio e a biomassa de alga são constantemente removidas do sistema (HUNDT e REDDY, 2011).

O carbono constitui em torno de 50% da biomassa microalgal, e em cultivos, pode ser considerado como o macronutriente mais importante, podendo ser o componente limitante no cultivo. A fonte de carbono mais utilizada pelas microalgas é o CO₂, provavelmente por ter uma difusão rápida da água para o interior das células, sendo usado diretamente em processos de fixação (ABALDE et al., 1995, RAVEN, 1998 citado por FRANCISCO, 2010).

Jacob-Lopes, (2007) também enfatizou a importância da disponibilidade do CO₂ para o desempenho de fotobiorreator, já que o CO₂ é usualmente a principal fonte de carbono em cultivos fotossintéticos.

A concentração de CO₂ na corrente de ar do fotobiorreator é um parâmetro determinante, já que a concentração deste composto não deverá ser excessivamente baixa, de modo a limitar a disponibilidade de carbono às células, e também não deverá exceder um limite superior, evitando perdas de CO₂ que não são utilizadas pelo microrganismo e são liberadas para a atmosfera, resultando em uma poluição ambiental desnecessária (CHENG et al., 2006 citado por JACOB-LOPES, 2007). Além disso, Kitaya et al., (2005) citado por Jacob-Lopes, (2007), demonstram o efeito adverso causado por elevadas concentração de CO₂ no desenvolvimento celular.

De acordo com Hundt e Reddy, (2011) os sistemas fechados tem a adicional vantagem de evitar a contaminação, um comum problema nos sistemas

abertos, permitindo maior produtividade das espécies de alga (no qual o óleo pode ultrapassar 50% do peso).

As algas diatomáceas quando em crescimento em um fotobiorreator podem produzir 46 toneladas de óleo em 1 ano em um hectare de terra (DEMIRBAS, 2009 citado por HUNDT e REDDY, 2011).

Algas cultivadas em fotobiorreator produzem taxas estimadas de 20-60 toneladas de biomassa por hectare por ano (WAGENINGEN, 2010 citado por IEA BIOENERGY, 2010).

A Tabela 4. apresenta um comparativo entre os sistemas abertos, como as lagoas e os *Raceway*, e os sistemas fechados, como os fotobiorreatores, para o cultivo de microalgas.

Tabela 4. Comparação entre os sistemas abertos e fechados para o cultivo microalgas

	Sistemas abertos	Sistemas fechados
Risco de contaminação	Alto	Baixo
Perda de CO ₂	Alta	Baixa
Perdas por evaporação	Altas	Baixas
Eficiência do uso da luz	Pobre	Excelente
Razão área/volume	Baixa	Alta
Área requerida	Grande	Pequena
Controle de processo	Difícil	Fácil
Produtividade da biomassa	Baixa	Alta
Custo de investimento	Baixo	Alto
Custo de operação	Baixo	Alto
Custo de cultivo	Alto	Relativamente baixa
Scale-up	Fácil	Difícil

Fonte: XU et al., (2009) citado por Redaelli et al, (2010).

Para Hundt e Reddy, (2011) a tecnologia de produção de alga ainda é um pouco nova e cara. Portanto o crescimento da eficiência, cultivo e processamento deve ser melhorado antes que a tecnologia possa ser comercializada. Para isso muitos pesquisadores e empresas estão desenvolvendo maneiras para fazer está tecnologia mais econômica e viável, com previsão do biodiesel de alga se tornar competitivo com diesel (origem fóssil) até 2020.

3.5 Produção de biodiesel de algas

Para IEA Bioenergy, (2011) a indústria de alga é ainda considerada em sua infância e os biocombustíveis de alga não são produzidos, atualmente, em escala industrial. Considerável quantidade de P&D estão a caminho, plantas pilotos estão em alta e correndo mundialmente, promissores testes com novas metodologias para melhorar a eficiência do sistema com custos competitivos com a tradicional indústria de combustível. Com a maturidade da indústria e aumento da produção, o portfólio das tecnologias é esperado naturalmente para consolidar o escalável lugar, custos e as questões requeridas. A Tabela 5 faz um comparativo com a atual e a futura indústria, em projeto.

Tabela 5. Comparativo entre a atual e a projetada indústria para produção de biocombustível de alga.

	Indústria Atual	Indústria Projetada
Tamanho	Em meados de 2010, cerca de 200 empresas estavam participando diretamente na produção de biocombustíveis de algas, em plantas pilotos.	Instalações pilotos que demonstram soluções sustentáveis e econômicas são esperas para a transição em escala comercial nas próximas uma ou duas décadas.
Valor	Em um período de aproximadamente dez anos, a indústria de biocombustíveis de algas cresceu de minúsculo valor para aproximadamente 271 milhões de dólares em 2010.	A empresa SBI Energia estima um valor de mercado para os biocombustíveis de algas de 1,6 bilhões de dólares em 2015, com uma previsão de crescimento anual de 43% entre 2010 e 2015.
Nível de Produção	Muitas empresas criaram demonstração e plantas em escala piloto, que produzem uma variedade de combustíveis em quantidades relativamente pequenas para uso por empresas limitadas.	A empresa Emerging Markets Online projem produção de 380 a 3.800 milhões de litros de biocombustíveis de algas até 2015, entretanto a Pike Research projeta, apenas, 230 milhões de litros em 2020.
Custos de produção	Recentes estimativas de custo para os biocombustíveis a partir de algas estão entre 1,2 - 7,9 USD/litro.	Recentes estimativas de custo para a produção futura de biocombustível de algas são baixo de 0,26 USD/L.

Fonte: IEA Bioenergy, (2010).

Conforme Scott, et al. (2010) a produção de biodiesel de alga tem sido uma área de considerável interesse, tendo em vista que:

- a alga apresenta maior produtividade que as outras culturas, com algumas espécies podendo dobrar de tamanho em algumas horas;
- algumas espécies podem acumular uma grande quantidade de triglicerídios, o principal estoque para produção de biodiesel;
- o crescimento da alga não requer um solo fértil para agricultura.

A implantação de um sistema de produção de biodiesel de alga inicia com o levantamento da espécie a ser cultivada, entradas necessárias para o cultivo, sistema de cultivo, colheita, extração e conversão do óleo em biocombustíveis e co - produtos, conforme ilustrado pela Figura 7.

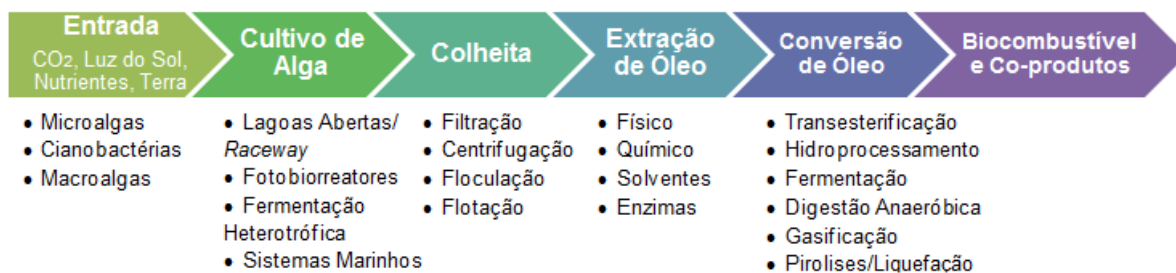


Figura 7. Diagrama dos principais estágios da alga a produção de biocombustíveis líquidos.

Fonte: IEA bioenergy, (2011).

No item 3.4 apresentaram-se as entradas necessárias e os principais tipos de cultivos de algas; a seguir expõem-se os sistemas de colheita, extração e conversão do óleo em biocombustíveis.

Para IEA Bioenergy, (2011) em sistemas de produção contínuos, a concentração da alga em lagoas ou em fotobiorreator é provavelmente menor que 0,1% de massa em base seca. Teoricamente após a colheita e concentração, a alga estará na forma de pasta úmida com 10 a 20% de sólidos. Conseqüentemente, a colheita e o processo de concentração requerem a remoção de 100 a 200 toneladas de água para cada tonelada de pasta de alga úmida e estas devem ser removidas com baixo custo e com mínimo de energia de entrada.

IEA Bioenergy, (2011) cita que o método de captura depende das espécies de algas, condições de cultura e a utilização do produto (no caso da produção de biocombustíveis, a utilização prevista para os co-produtos).

Há uma series de propostas e praticas de colheitas e métodos de concentração de alga, estas dependem, principalmente, das propriedades da espécie da alga escolhida (método de colheita específica) ou são geralmente aplicáveis para a maioria, se não todas as espécies de algas (métodos gerais de colheita) (IEA BIOENERGY, 2011).

Os exemplos de métodos de colheita específicas, citados por IEA Bioenergy, (2011), incluem:

- Filtração com abertura de telas maior que 25 microns, usado por algas filamentosas, como a spirulina;
- Sedimentação simples (por gravidade sem flocculantes) utilizado para *H. pluvialis* após ele atingir o estágio de cisto vermelho;

- Absorção de um material hidrofóbico (poliestireno), acoplado a um filamento de ferro, no qual é capturado em um alto gradiente magnético, este método de colheita é usado para *Dunaliella* na Austrália.

Os métodos gerais de colheita, apresentados por Benemann e Oswald, 1996 citado por IEA Bioenergy, (2011) incluem:

- Sedimentação (por gravidade) com ajuda de flocculantes (cal, alumínio, cloreto férrico, ou polímeros iônicos);
- Flotação de ar dissolvido (DAF) com ajuda de flocculantes;
- Desidratação por centrifuga;
- Filtração em membrana.

Os custos com flocculantes para ajudar a sedimentação e a DAF é considerado demasiado elevado para a produção de biocombustíveis de algas. Assim como o uso das centrifugas, que pode chegar a várias vezes mais que o custo do próprio sistema (IEA BIOENERGY, 2011).

A filtração por membrana de microalgas tem sido sugerida como uma forma econômica de colher grandes quantidades de algas, entretanto isso ainda não foi demonstrado em qualquer escala significativa. Portanto o processo de colheita ainda precisa ser mais bem desenvolvido e projetado para demonstrar a viabilidade técnica e econômica (IEA BIOENERGY, 2011).

Posteriormente a colheita e a concentração da alga ocorrem à extração do óleo, onde os componentes celulares específicos, como os lipídios, devem ser isolados. A separação desses componentes celulares pode ser alcançada através de processos físico, químico, enzimático ou outros métodos de extração (IEA BIOENERGY, 2011).

De acordo com IEA Bioenergy, (2011) a extração mecânica ou física, tais como a ultra sonicação (ruptura com as ondas de som de alta frequência) e homogeneização (realizada por quedas de pressão rápida), podem ser utilizados para romper as paredes das células e conduzir o aumento da recuperação do óleo. Os sistemas baseados no processo de sonicação e centrifugação podem fornecer soluções econômicas para a recuperação de lipídios das algas.

Para Schneider citado por Hundt e Reddy, (2011) o método envolvendo a extração por solventes, tem o hexano como a escolha mais popular e barata. Alguns pesquisadores estão explorando o uso do ultrassom para gerar pequenas

bolhas com o objetivo de estourar e quebrar a parede das células para liberar o óleo contido.

O método que constitui atualmente o óleo mais puro e concentrado é a extração com fluido supercrítico. Neste processo, um gás (em geral o CO₂) é liquefeito e aquecido, atuando como um solvente, pode extrair praticamente 100% dos óleos a partir da biomassa de algas. A parte restante da biomassa pode ser usada como fertilizante ou ração de alta proteína (DEMIRBAS, 2010 citado por HUNDT e REDDY, 2011).

A literatura descreve extração bem sucedida de lipídios das algas com CO₂ supercrítico, embora em pequena escala (COUTO et al., 2010 citado por IEA BIOENERGY, 2011), resulta na conversão de biodiesel. A capacidade do CO₂ supercrítico em operar em baixas temperaturas preserva a qualidade de lípidos de algas durante o processo de extração, minimizando assim a necessidade de processamento adicional de solvente (IEA BIOENERGY, 2011).

Segundo IEA Bioenergy, (2011) após a extração, o óleo de alga está na forma de triglicerídios que tem uma densidade de energia muito alta. Portanto a viscosidade do óleo é muito alta para ser usado diretamente em um motor diesel, necessitando converter o óleo em biodiesel com menor viscosidade através, principalmente, de um processo químico chamado transesterificação.

Neste processo, os triglicéridos (óleos de algas) são combinado com um álcool, como metanol ou etanol, e um sódio- ou potássio-base catalisador. Os produtos são ésteres de ácidos graxos (biodiesel) e glicerol. Após esta reação, os produtos são separados e o excesso de álcool é recuperado. Os ésteres são enxaguados e secos, resultando em biodiesel (DEMIRBAS, 2010 citado por HUNDT e REDDY, 2011).

Apesar de transesterificação ser o método mais comum de reduzir a viscosidade do óleo de algas, existe outras opções incluindo diluição, microemulsificação, fermentação e pirólise (DEMIRBAS, 2010 citado por HUNDT e REDDY, 2011).

3.6 Biodiesel de algas

O biodiesel de algas apresenta algumas características que o difere do biodiesel convencional. A primeira consiste na existência de oxigênio na molécula do combustível, resultando em uma densidade de energia um pouco menor. O biodiesel tem inferior emissão de hidrocarboneto não queimado, 100% de redução da emissão de óxido enxofre e dependendo das condições o biodiesel, geralmente, tem altas emissões de óxido de nitrogênio (HUNDT E REDDY, 2011).

De acordo com Hundt e Reddy, (2011) o biodiesel apresenta menor toxicidade e melhor biodegradabilidade, que devido a existência de óleos poli-insaturados estes podem ser degradados prematuramente. O biodiesel de alga mostra-se com baixa viscosidade e portanto melhor performance em climas frios quando comparado com os biodiesel de outras fontes.

Qualitativamente, o biodiesel extraído de microalgas é similar ao produzido a partir de plantas oleaginosas, entretanto, as principais diferenças estão relacionadas a composição predominantemente poliinsaturada dos ácidos graxos, que podem reduzir a estabilidade do biodiesel. Por outro lado estes compostos por terem pontos de congelamento inferiores quando comparado aos ácidos graxos monoinsaturados, representam um benefício adicional para o biodiesel usado em climas frios. Outro fator a ser considerado nesta comparação, esta relacionado as questões de rendimento, que de acordo com estimativas de escala laboratorial podem ser ate 200 vezes maior quando comparado as oleaginosas vegetais (SCRAGG et al., 2003; MIAO & WU, 2006 citado por FRANCISCO, 2010).

McCormick & Alleman (2005) citado por Francisco, (2010) citam que uma propriedade significativa do biodiesel e a de reduzir emissões de particulados totais no motor, aumentando o seu rendimento. A exploração de vias para a redução do alto custo do biodiesel e o maior fator a ser desenvolvido, principalmente em métodos para a minimização do uso de materiais caros (MIAO & WU, 2006 citado por FRANCISCO, 2010).

3.6.1 Qualidade do biodiesel

A qualidade do biodiesel e na maioria dos casos influenciada por diversos fatores, como o processo empregado na produção, o uso de materiais adicionais, composição dos ácidos graxos da matéria prima utilizada e a qualidade dessa matéria-prima. A qualidade deve atender a padrões apropriados, como as normas de padronização do biodiesel, como a ASTM D6751 dos Estados Unidos, a norma europeia EN14214, a norma australiana de biodiesel aprovada em 2000 e a norma da Agencia Nacional de Petróleo ANP255, divulgada em setembro de 2003. Estas especificações devem ser atendidas inclusive no caso do uso de biodiesel em misturas com diesel de petróleo (GERPEN & KNOTHE, 2005 citado por FRANCISCO, 2010).

O biodiesel tendo as especificações atendidas pode ser utilizado na maioria dos motores, sem qualquer modificação no motor em questão (GERPEN & KNOTHE, 2005 citado por FRANCISCO, 2010).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização do objeto de trabalho

Este trabalho foi desenvolvido com base nos dados de uma Usina produtora de açúcar, etanol e energia na região de Ribeirão Preto, e com a finalidade de manter as informações sigilosas, optou-se por não divulgar o nome da usina.

O trabalho foi realizado entre os meses de Julho a Novembro de 2012, onde foram utilizadas as informações do ano-safra de 2011/2012 de uma Usina com moagem de 4,3 milhões de toneladas de cana e produção de 101 milhões de litros de etanol, 7 mil sacas de açúcar e 254 MWh de energia exportada.

Adicionalmente consideraram-se os dados do setor sucroenergético do estado de São Paulo obtidos no site da União da Indústria de Cana-de-açúcar (Única) para a safra de 2007/2008 com produção de 13 bilhões de litros de etanol, enquanto que para o consumo de bagaço de cana-de-açúcar utilizou as informações do site da Secretaria de Energia do estado de São Paulo.

4.2 Metodologia para quantificar as emissões do dióxido de carbono da combustão de biomassa

As emissões do CO₂ provindas da queima do bagaço da cana-de-açúcar nas caldeiras de geração de energia foram definidas pelo *GHG Protocol* como fonte de combustão estacionária.

A metodologia do GHG Protocol, apresentada a seguir, é compatível com as normas da International Organization for Standardization (ISO) e com as metodologias de quantificação do Painel Intergovernamental sobre Mudança Climática (IPCC).

O *GHG Protocol Guidance*, (2005) apresenta duas metodologias para estimar as emissões diretas de CO₂ da combustão de fontes estacionária: 1) medição direta da massa de CO₂ do gás exaurido e 2) calculo da emissão de CO₂ baseado no dado da atividade.

O método de medição direta geralmente utiliza o sistema de monitoramento contínuo de emissão (CEM) que registra a taxa do fluxo total e a

concentração do CO₂ do gás exaurido na chaminé ou duto (*GHG PROTOCOL GUIDANCE, 2005*).

De acordo com o *GHG Protocol Guidance, (2005)* o método de cálculo geralmente envolve um monitoramento do consumo do combustível e a fração de carbono que não oxidou, ou seja, o conteúdo do carbono que não queimou ou queimou parcialmente.

Devido aos altos custos de implantação, operação e as rigorosas necessidades de calibração e verificação de procedimentos do sistema CEM, tanto o IPPC, (2000) quanto o *GHG Protocol Guidance, (2005)* recomenda o uso do método de cálculo que apresenta baixo custo de implantação e precisão nos cálculos de emissões de CO₂ quando os dados forem coletados com rigor e com qualidade no controle das medições.

Segundo o *GHG Protocol Guidance, (2005)* o método baseado no cálculo implica na coleta do a) dado da atividade, na forma de quantificar o consumo do combustível e b) fator de emissão do dado, na forma de informar as características da combustão do combustível e a eficiência do processo de oxidação. A Equação 4 ilustra o cálculo das emissões de CO₂ com as terminologias adaptadas para o português.

$$E_{CO_2} = DA * FE_{CO_2} * FO \qquad \text{Equação 4}$$

Onde:

E_{CO_2} : emissão de dióxido de carbono, em massa;

DA: consumo do dado da atividade do combustível;

FE_{CO_2} : fator de emissão do dióxido de carbono contido no combustível;

FO: fração de carbono oxidada do combustível que sobrou como fuligem ou cinza.

Para aplicar a Equação 4, o *GHG Protocol Guidance, (2005)* estabelece 5 passos, apresentados a seguir:

- 1° Passo

O dado da atividade (DA) ou consumo do combustível pode ser quantificado em massa (e.x. t), volume (e.x. m³) ou em unidade energia (e.x. TJ). Estes dados podem ser obtidos através de fatura do combustível, registro de compras ou pela medição da quantidade de combustível na entrada do dispositivo da combustão.

- 2° Passo

Caso necessário, coleta-se os dados de densidade e poder calorífico inferior (PCI) do combustível para converter o dado da atividade do combustível em massa, volume, ou energia, dependendo do fator de emissão disponível na literatura.

- 3° Passo

O fator de emissão do dióxido de carbono contido no combustível pode estar em base de massa (e.x. t), volume (e.x. m³) ou energia (e.x. TJ). A estimativa do teor de dióxido de carbono de cada combustível pode ser baseada em análise de laboratório, dado do fornecedor ou fatores alternativos confiáveis.

Destaca se que o dado da atividade do 1° passo e o teor de dióxido de carbono do 3° passo deve estar na mesma base antes de calcular as emissões.

- 4° Passo

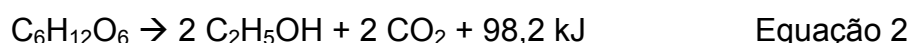
Os dados para determinar o fator de oxidação podem ser baseados em qualquer combinação de análises de carbono conteúdo resíduos sólidos (e.x., cinzas e fuligem) e fatores alternativos confiáveis.

- 5° Passo

Verificar que todas as unidades são consideradas e convertidas corretamente pelos parâmetros e recursos.

4.3 Metodologia para quantificar as emissões do dióxido de carbono da fermentação alcoólica

As emissões do CO₂ provindas da fermentação do caldo da cana-de-açúcar ou da mistura de melaço e caldo de cana foram calculadas através da reação simplificada de Gay-Lussac, onde a glicose (C₆H₁₂O₆) é transformada em etanol (C₂H₅OH) mais dióxido de carbono (CO₂), de acordo com a Equação 2.



A partir da reação anterior, se deduz que a quantidade de CO₂ emitida tem relação direta com a quantidade total bruta produzida de etanol no processo, sendo assim, as emissões de CO₂ geradas no processo de fermentação alcoólica são calculadas pela Equação 5:

$$E_{\text{CO}_2} = \text{DA} * \text{FE}_{\text{CO}_2} * \text{R} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

E_{CO₂}: emissão de dióxido de carbono, em massa;

DA: dado da atividade produzida pela fermentação;

FE_{CO₂}: fator de emissão do dióxido de carbono emitido pela fermentação;

R: rendimento da fermentação.

Para aplicar a Equação 5, estabelece-se 5 passos, apresentados a seguir:

- 1° Passo

O dado da atividade (DA) ou quantidade do etanol produzido, geralmente quantificado em volume (e.x. L ou m³).

- 2° Passo

Caso necessário, coleta-se os dados de densidade e massa molar dos produtos da fermentação, com o objetivo de calcular e converter o fator de emissão do CO₂.

- 3° Passo

O fator de emissão do dióxido de carbono emitido na fermentação pode estar em base de massa (e.x. t), volume (e.x. L) ou energia (e.x. TJ). A estimativa do teor de CO₂ emitida na fermentação pode ser baseada em cálculos estequiométricos.

Destaca se que o dado da atividade do 1° passo e o teor de dióxido de carbono do 3° passo deve estar na mesma base antes de calcular as emissões.

- 4° Passo

Os dados para determinar o rendimento da fermentação alcoólica podem ser baseados em cálculos estequiométricos, cinéticos, determinação de massa de etanol produzido, massa residual de açúcares e metabólicos secundários como o CO₂, glicerol, massa celular, açúcar residual e acidez.

- 5° Passo

Verificar que todas as unidades são consideradas e convertidas corretamente pelos parâmetros e recursos.

4.4 Metodologia para quantificar a produção de biodiesel de alga a partir do dióxido de carbono emitido no processo industrial

A metodologia adotada neste trabalho para quantificar a produção de biodiesel de alga a partir do CO₂ do processo industrial do setor sucroenergético foi baseada no artigo "*Algal biodiesel production from power plant exhaust and its potential to replace petrodiesel and reduce greenhouse gas emissions*" dos autores K.Hundt e B.V. Reddy, (2011).

Para determinar a quantidade de biodiesel de alga que pode ser produzida usando o dióxido de carbono emitido em um processo industrial, adotou-se a Equação 6 com as terminologias adaptadas para o português.

$$V = E * F_{CO_2} * FC_{alga} * FC_{\text{óleo}} * FC_{\text{biodiesel}} * v_{\text{biodiesel}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

V: volume de biodiesel de alga produzido (l);

E: emissão de CO₂ (Kg CO₂);

F CO₂: fração de CO₂ utilizado pela alga;

FC alga: fator de conversão de CO₂ em biomassa de alga (kg alga/kg CO₂);

FC óleo: fator de conversão da biomassa de alga em óleo (kg óleo/kg alga);

FC biodiesel: fator de conversão de óleo em biodiesel de alga (kg biodiesel/kg óleo);

v: volume específico do biodiesel (l/kg).

De acordo Hundt e Reddy, (2011) para aplicar a Equação 6, faz-se necessário algumas suposições com respeito as características da alga, atual produção e o processo tecnológico. Todos os valores assumidos são listados e referenciados a seguir:

- alga utiliza 66% do CO₂ liberado pelo processo (baseado na média de 50% de dias nublados e 82% de dias ensolarados);¹
- 1,83 Kg do CO₂ utilizado pelas algas produz 1 kg de biomassa de alga;²
- das espécies de alga cultivadas 50% do peso é extraído em óleo;³
- 60% da massa de óleo de alga é convertido em ácido graxo (biodiesel). Os 40% restantes consiste em glicerídeos e impurezas;⁴
- a densidade do biodiesel e diesel são 0,88 e 0,83 Kg/l, respectivamente.

1 Stauffer NW. MIT Energy Initiative, 2010. <http://web.mit.edu/erc/spotlights/alg-all.html>.

2 Chisti Y. Biodiesel from Microalgae. *Biotechnol Adv* 2007;25:294–306.

3 Demirbas Da. *Algae Energy: Algae as a New Source of Biodiesel*. Springer-Verlag London Limited, 2010.

4 Levine RB, Pinnarat T, Savage PE. Biodiesel production from wet algal biomass through in situ lipid hydrolysis and supercritical transesterification. *ACS Energy Fuels* 2010;24:5235–43.

4.5 Metodologia para estimar as emissões de dióxido de carbono evitadas

A metodologia adotada para estimar as emissões de dióxido de carbono evitadas foi realizada através de um levantamento bibliográfico com uma posterior compilação e comparação dos resultados com os calculados neste trabalho, como o consumo de dióxido de carbono do processo industrial pela produção das algas e a produção de biodiesel de alga.

Destaca-se o 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do estado de São Paulo (CETESB, 2011) e o consumo de óleo diesel no estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2012) como principais referências bibliográficas utilizadas para a comparação do trabalho e estimar as emissões evitadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O trabalho teve como proposta o uso do dióxido de carbono do processo industrial do setor sucroenergético no cultivo de algas para a produção de biodiesel, contribuindo assim com a redução do CO₂, principal gás de efeito estufa.

O fluxograma do processo proposto neste trabalho é apresentado na Figura 8, onde os resultados dos cálculos do CO₂ emitidos pelo processo industrial, a produção de biodiesel de algas, assim como as emissões evitadas foram detalhados a seguir.

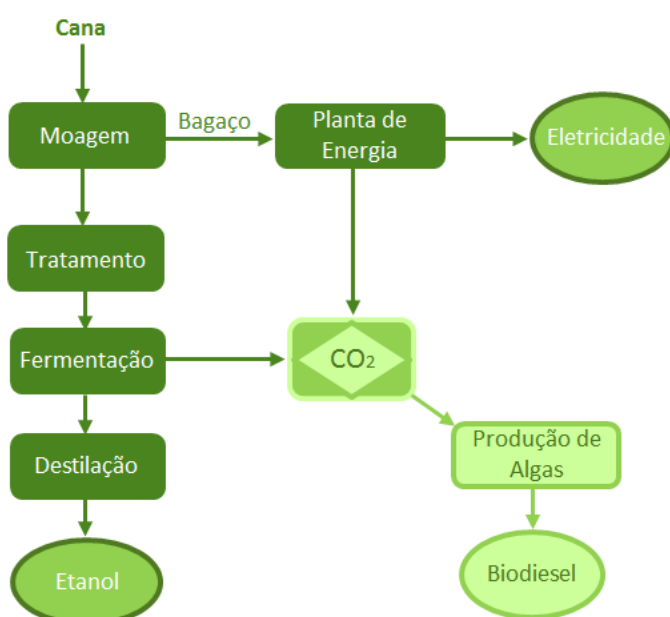


Figura 8. Fluxograma do sistema proposto para uso do CO₂ do processo industrial do setor sucroenergético.

Fonte: Seabra, (2008) adaptado pela autora.

5.1 Cálculo das emissões do dióxido de carbono da combustão de biomassa

5.1.1 Usina

Para os cálculos das emissões de CO₂ provenientes da combustão de biomassa da Usina, adotou-se a Equação 4 apresentada no *GHG Protocol Guidance*, (2005).

$$E_{CO_2} = DA * FE_{CO_2} * FO$$

Equação 4

Para a realização do cálculo das emissões de CO₂, considerou-se os dados de atividades do consumo de bagaço da cana, em unidade de massa. Onde o bagaço consumido é calculado pelo Departamento da Cogeração, em virtude da eficiência da caldeira, utilizando-se os valores de vapor produzido/dia (toneladas) e produção de vapor/tonelada de bagaço.

A produção de vapor é calculada por medidor de vazão instalado na tubulação de saída das caldeiras e os dados de fibra da cana e do bagaço são obtidos pelo laboratório, em análises realizadas diariamente nos três turnos de trabalho.

A Tabela 6 apresenta o consumo de bagaço (DA) de cana referente a safra da Usina em 2011/2012.

Tabela 6. Consumo de bagaço de cana-de-açúcar, referente a safra de 2011/2012.

Mês	DA (t)
Jan	-
Fev	-
Mar	36.892,59
Abr	118.124,31
Mai	212.714,67
Jun	199.212,66
Jul	221.831,19
Ago	206.828,87
Set	189.524,83
Out	76.095,82
Nov	-
Dez	-
Total	1.261.224,94

Fonte: Usina, (2012).

Conforme o Inventário Estadual de Fontes Fixas da Cetesb, (2008) o fator de emissão (FE_{CO2}) da combustão do bagaço de cana-de-açúcar proposto pelo IPCC, (2006) foi calculado com as devidas correções com base no poder calorífico inferior normalmente observado no estado de São Paulo e teor de umidade do bagaço da cana igual a 50%.

A Tabela 7 apresenta o fator de emissão da combustão do bagaço com devidas correções de unidades e de poder calorífico.

Tabela 7. Fator de emissão de CO₂ do bagaço da cana-de-açúcar.

	Fator de Emissão (t CO ₂ /t)
Bagaço de cana	0,88795

Fonte: Cetesb, (2008).

A fração de oxidação (FO) do combustível representa o carbono oxidado, uma vez que, na prática, a combustão nunca ocorre de forma completa, deixando inoxidada uma pequena quantidade de carbono contida nas cinzas, fuligem e outros subprodutos (MCT, 2006).

De acordo com MCT, (2006) a metodologia do IPCC, leva em conta a fração de oxidação nos cálculos das emissões reais, multiplicando-se o carbono disponível pela emissão e fração de carbono oxidada na combustão.

A Tabela 8 apresenta o valor adotado pelo MCT, (2006) para a fração de carbono oxidada na combustão.

Tabela 8. Fração de oxidação de combustão do bagaço de cana-de-açúcar.

	Fator de Oxidação
Bagaço de cana	0,88

Fonte: MCT, (2006).

Aplicando as informações do consumo de bagaço (DA), fator de emissão (FE) e fração de oxidação (FO) na Equação 4, obteremos os resultados da Tabela 9, com uma emissão total de 985.516,12 t CO₂ referente a safra de 2011/2012 de uma Usina.

Tabela 9. Emissões de CO₂ do processo de combustão do bagaço, referente a safra de 2011/2012.

Mês	Emissão de CO ₂ (t)
Jan	-
Fev	-
Mar	28.827,72
Abr	92.301,86
Mai	166.214,39
Jun	155.663,98
Jul	173.338,00
Ago	161.615,25
Set	148.093,94
Out	59.460,97
Nov	-
Dez	-
Total	985.516,12

Fonte: Autor.

5.1.2 Estado de São Paulo

As emissões de CO₂ provenientes da combustão de biomassa do setor sucroenergético do estado de São Paulo foi calculada através da Equação 4.

Para a realização do cálculo das emissões de CO₂, considerou-se os dados de atividades (DA) do consumo de bagaço da cana, em unidade de massa, obtido no site da Secretária de Energia do estado de São Paulo para o ano de 2007, sendo este o dado mais atual disponível no site.

A Tabela 10 apresenta o consumo de bagaço de cana referente ao ano de 2007/2008.

Tabela 10. Consumo de bagaço de cana-de açúcar, referente ao ano de 2007.

Ano	DA (t)
2007	64.027.000

Fonte: Secretária de Energia, (2012).

Conforme Tabela 7 o fator de emissão (FE) do bagaço de cana com devidas correções de unidades é de 0,88795 tCO₂/t (CETESB, 2008).

De acordo com MCT, (2006) a metodologia do IPCC, leva em conta a fração de oxidação nos cálculos das emissões reais, multiplicando-se o carbono disponível pela emissão e fração de carbono oxidada na combustão. Que segundo a Tabela 8 o valor adotado para a fração de carbono oxidada (FO) na combustão é de 0,88.

Aplicando as informações do consumo de bagaço (DA), fator de emissão (FE) e fração de oxidação (FO) na Equação 4, obteremos os resultados da Tabela 11 referente ao ano de 2007 no estado de São Paulo .

Tabela 11. Emissões de CO₂ referente ao processo de combustão do bagaço de cana consumido no estado de São Paulo no ano de 2007.

Ano	Emissão de CO ₂ (t)
2007	50.030.441,69

Fonte: Autor.

5.2 Cálculo das emissões do dióxido de carbono da fermentação alcoólica

5.2.1 Usina

Para os cálculos das emissões de CO₂ provenientes do processo de fermentação alcoólica, adotou-se a Equação 5.

$$E_{CO_2} = DA * FE_{CO_2} * R \quad \text{Equação 5}$$

Para a realização do cálculo das emissões de CO₂, considerou-se os dados de atividades da produção de etanol hidratado e anidro, em unidade de volume. O volume de etanol foi obtido pelo medidor de vazão na saída da destilação ou desidratação.

A Tabela 12 apresenta o volume de etanol hidratado e anidro produzido durante a safra 2011/2012 da Usina.

Tabela 12. Produção de etanol hidratado e anidro, referente a safra de 2011/2012.

Mês	DA	
	Álcool Hidratado (l)	Álcool Anidro (l)
Jan	-	-
Fev	-	-
Mar	2.672.830,00	16.410,00
Abr	7.247.630,00	4.186.650,00
Mai	17.861.200,00	2.072.510,00
Jun	16.378.310,00	-
Jul	17.554.140,00	1.412.800,00
Ago	9.485.720,00	4.537.640,00
Set	8.770.770,00	3.705.340,00
Out	4.802.050,00	667.750,00
Nov	-	-
Dez	-	-
Total	84.772.650,00	16.599.100,00

Fonte: Usina, (2012).

Com a finalidade de obter o fator de emissão da fermentação alcoólica, levantou-se a densidade do etanol hidratado e anidro (Tabela 13), no boletim gerencial, da Usina de acordo com o grau de INPM (Instituto Nacional de Pesos e Medidas) do produto final.

Tabela 13. Densidade média de etanol hidratado e anidro, referente a safra de 2011/2012.

Mês	Densidade	
	Etanol Hidratado (Kg/l)	Etanol Anidro (Kg/l)
Jan	-	-
Fev	-	-
Mar	0,809	0,791
Abr	0,809	0,791
Mai	0,810	0,791
Jun	0,810	-
Jul	0,810	0,790
Ago	0,809	0,790
Set	0,809	0,790
Out	0,809	0,790
Nov	-	-
Dez	-	-

Fonte: Usina, (2012).

Através da reação simplificada de Gay-Lussac (Equação 2), conclui-se que para cada molécula de etanol produzida emite-se uma molécula de CO_2 , já em termos molares 1 mol de glicose geram 2 mols de etanol e 2 mols de CO_2 , ou seja, para cada 46 g de etanol tem-se 44 g de CO_2 . Por relação encontra-se 0,957 grama de CO_2 por grama de etanol produzido na fermentação alcoólica.

Conforme multiplicação da relação molar de 0,957 g CO_2 /g etanol pela densidade do etanol em Kg/l, obtêm-se o fator de emissão (FE) do dióxido de carbono da fermentação alcoólica com devidas correções de unidades para KgCO_2 /l etanol, detalhado na Tabela 14.

Tabela 14. Fator de Emissão (FE) de CO₂ na fermentação alcoólica

Mês	FE (kg CO ₂ /l etanol hidratado)	FE (kg CO ₂ /l etanol anidro)
Jan	-	-
Fev	-	-
Mar	0,773	0,757
Abr	0,774	0,756
Mai	0,775	0,756
Jun	0,775	-
Jul	0,775	0,756
Ago	0,774	0,756
Set	0,774	0,756
Out	0,774	0,756
Nov	-	-
Dez	-	-

Fonte: Autor.

O rendimento do processo de fermentação alcoólica foi obtido pelo boletim gerencial da Usina, onde se adotou a média da safra de 2011/2012, conforme Tabela 15.

Tabela 15. Rendimento da Fermentação Alcoólica

	Rendimento
Fermentação Alcoólica	0,881

Fonte: Usina, (2012).

Aplicando as informações da produção de etanol hidratado e anidro (DA), fator de emissão (FE) e rendimento da fermentação (R) na Equação 5, obteremos os resultados da Tabela 16, com uma emissão total de 68.862,02 t CO₂ referente a safra de 2011/2012 na Usina em estudo.

Tabela 16. Emissões de CO₂ referente ao processo de fermentação alcoólica, referente a safra de 2011/2012 da Usina.

Mês	Emissão de CO ₂ (t)
Jan	-
Fev	-
Mar	1.831,05
Abr	7.726,00
Mai	13.565,43
Jun	11.173,85
Jul	12.919,80
Ago	9.484,79
Set	8.443,68
Out	3.717,41
Nov	-
Dez	-
Total	68.862,02

Fonte: Autor.

5.2.2 Estado de São Paulo

As emissões de CO₂ provenientes do processo de fermentação alcoólica do estado de São Paulo, foram calculadas através da Equação 5.

Para a realização do calculo das emissões de CO₂, considerou-se os dados de atividades (DA) da produção de etanol hidratado e anidro, em unidade de volume, para o estado de São Paulo, conforme apresentado na Tabela 17.

Tabela 17. Produção de etanol hidratado e anidro, referente a safra de 2007/2008.

Ano	DA	
	Álcool Hidratado (l)	Álcool Anidro (l)
2007	8.408.728.200	4.926.069.000

Fonte: Unica, (2012).

Com a finalidade de obter o fator de emissão da fermentação alcoólica, considerou-se a densidade média do etanol hidratado e anidro (Tabela 18), do boletim gerencial, da Usina de acordo com o grau de INPM do produto final.

Tabela 18. Densidade média de etanol hidratado e anidro, referente a safra de 2011/2012 da Usina.

	Densidade	
	Etanol Hidratado (Kg/l)	Etanol Anidro (Kg/l)
Média	0,81	0,79

Fonte: Usina, (2012).

Conforme multiplicação da relação molar de 0,957 g CO₂/g etanol pela densidade do etanol em Kg/l, obtêm-se o fator de emissão do dióxido de carbono da fermentação alcoólica com devidas correções de unidades para KgCO₂/l etanol, detalhado na Tabela 19.

Tabela 19. Fator de emissão de CO₂ na fermentação alcoólica

	FE (kg CO ₂ /l etanol hidratado)	FE (kg CO ₂ /l etanol anidro)
Média	0,77	0,76

Fonte: Autor.

O rendimento do processo de fermentação alcoólica foi obtido pelo boletim gerencial da Usina, onde se adotou a média da safra de 2011/2012 de 0,881 para o estado de São Paulo.

Aplicando as informações da produção de etanol hidratado e anidro (DA), fator de emissão (FE) e rendimento da fermentação (R) na Equação 5, obteremos os resultados na Tabela 20.

Tabela 20. Emissões de CO₂ referente ao processo de fermentação alcoólica, do estado de São Paulo referente a safra de 2007/2008

Safra	Emissão de CO ₂ (t)
2007/2008	9.006.054,74

Fonte: Autor.

5.3 Cálculo da produção de biodiesel de alga a partir do CO₂ emitido no processo industrial

5.3.1 Usina

Para quantificar o volume de biodiesel de alga produzidos a partir do CO₂ emitido na produção industrial, adotou-se a Equação 6.

$$V = E * F_{CO_2} * FC_{alga} * FC_{\text{óleo}} * FC_{\text{biodiesel}} * v_{\text{biodiesel}} \quad \text{Equação 6}$$

Conforme suposições de Hundt e Reddy, (2011) 66% do CO₂ emitido é utilizado pela alga (F CO₂), 50% da biomassa de alga é convertida em óleo (FC óleo) e 60% do óleo de alga é convertido em biodiesel (FC biodiesel).

Adaptou-se as suposições de Hundt e Reddy, (2011) para as unidades necessárias, encontrando 0,546 Kg alga/Kg CO₂ para o fator de conversão do CO₂ em biomassa de alga (FC alga) e 1,136 l/Kg biodiesel como volume específico (v).

Aplicando a emissões (E) de 1Kg CO₂ e as informações da fração de CO₂ utilizado pela alga (F CO₂), o fator de conversão de CO₂ em biomassa de alga (FC alga), fator de conversão da biomassa de alga em óleo (FC óleo), fator de conversão de óleo em biodiesel de alga (FC biodiesel) e volume específico do biodiesel (v) na Equação 6, obtém-se o fator de produção de biodiesel de alga apresentado na Tabela 21.

Tabela 21. Fator de produção de biodiesel de alga

	Fator de Produção (l/Kg CO ₂)
Biodiesel de Alga	0,123

Fonte: Hundt e Reddy, (2011).

Para calcular o volume de biodiesel produzido nos processos da Usina estudada considerou-se as emissões (E) de CO₂ da combustão de biomassa e da fermentação alcoólica apresentadas, anteriormente, nas Tabelas 9 e 16 e consolidadas na Tabela 22.

Tabela 22. Emissões de CO₂ referente ao processo industrial de uma Usina, referente a safra de 2011/2012.

Safra 2011	Emissão de CO ₂ (t) da Combustão de Biomassa	Emissão de CO ₂ (t) da Fermentação Alcoólica	Total (E) (t de CO ₂)
	985.516,12	68.862,02	1.054.378,14

Fonte: Autor.

Multiplicando as informações das emissões (E) dos processos industriais da Usina com o fator de produção de biodiesel de alga (Tabela 21), obteremos os resultados da Tabela 23, com uma produção total de 129 milhões de litros de biodiesel de alga referente a safra de 2011/2012.

Tabela 23. Produção de biodiesel de alga da Usina em estudo, referente a safra de 2011/2012.

Safra 2011	Produção de Biodiesel (l) a partir do CO ₂ da Combustão	Produção de Biodiesel (l) a partir do CO ₂ da Fermentação	Total (V) (l/ano)
	121.170.015,15	8.466.641,81	129.636.656,96

Fonte: Autor.

5.3.2 Estado de São Paulo

Para quantificar o volume de biodiesel de alga produzidos a partir do CO₂ emitido na produção industrial do setor sucroenergético do estado de São Paulo, adotou-se a Equação 6.

Conforme suposições de Hundt e Reddy, (2011) e adaptações detalhadas no item 5.3.1 obteve-se o fator de produção de biodiesel de alga de 0,123 l/ Kg CO₂, conforme apresentado na Tabela 21.

Para calcular o volume de biodiesel produzido nos processos do setor sucroenergético do estado de São Paulo considerou-se as emissões (E) de CO₂ da combustão de biomassa e da fermentação alcoólica, apresentadas anteriormente, nas Tabelas 11 e 20 e consolidadas na Tabela 24.

Tabela 24. Emissões de CO₂ referente ao processo industrial do setor sucroenergético do estado de São Paulo, referente a safra de 2007/2008.

Safra 2007-2008	Emissão de CO ₂ (t) da Combustão de Biomassa	Emissão de CO ₂ (t) da Fermentação Alcoólica	Total (E) (t de CO ₂)
	50.030.441,69	9.006.054,74	59.036.496,43

Fonte: Autor.

Multiplicando as informações das emissões (E) dos processos industriais do setor sucroenergético do estado de São Paulo, obteremos os resultados da Tabela 25, com uma produção total de 7 bilhões de litros de biodiesel de alga referente a safra de 2007/2008.

Tabela 25. Produção de biodiesel de alga para o estado de São Paulo, referente a safra de 2007/2008.

Safra 2007/2008	Produção de Biodiesel (l) a partir do CO ₂ da Combustão	Produção de Biodiesel (l) a partir do CO ₂ da Fermentação	Total (V) (l/ano)
	6.151.283.814,59	1.107.301.812,21	7.258.585.626,80

Fonte: Autor.

5.4 Emissões de dióxido de carbono evitadas

No presente estudo pode-se estimar as emissões de dióxido de carbono evitadas tanto de origem de biomassa, que provem da combustão do bagaço da cana-de-açúcar e da fermentação alcoólica, quanto de origem não biomassa, que provem da substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga.

5.4.1 Usina

5.4.1.1 Emissões evitadas de origem de biomassa

As emissões de dióxido de carbono evitadas no processo industrial da combustão de biomassa e da fermentação alcoólica da usina, são aquelas consumidas na produção de biomassa de alga.

De acordo com Stauffet, (2010) citado por Hundt e Reddy, (2011) 66% do CO₂ emitido pelo processo industrial é utilizado pela alga, ou seja, na usina estudada pode-se evitar as emissões apresentadas na Tabela 26.

Tabela 26. Emissões de CO₂ (Biomassa) evitadas do processo industrial da Usina com a produção de alga.

Safra 2011/2012	Emissão de CO ₂ (t) evitadas da combustão	Emissão de CO ₂ (t) evitadas da Fermentação	Total evitado (t de CO ₂)
	- 650.440,64	- 45.448,93	- 695.889,57

Fonte: Autor.

Baseado no 1° Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do estado de São Paulo (CETESB, 2011) as emissões de combustíveis de biomassa para o ano de 2011 foram estimadas em 99.815.000 toneladas de CO₂, conforme Tabela 27.

Tabela 27. Emissões de CO₂ de Combustíveis de Biomassa

Fonte	Ano	Emissão de CO ₂ em Biomassa (ton/ano)
Cetesb	1990	33.786.000
Cetesb	1994	37.528.000
Cetesb	2000	36.094.000
Cetesb	2005	53.195.000
Estimativa ⁽¹⁾	2006	60.965.000
Estimativa ⁽¹⁾	2007	68.735.000
Cetesb	2008	76.505.000
Estimativa ⁽¹⁾	2009	84.275.000
Estimativa ⁽¹⁾	2010	92.045.000
Estimativa ⁽¹⁾	2011	99.815.000

Fonte: Cetesb, (2011) adaptado pela autora.

Nota: (1) considerou-se a diferença dos anos de 2008 e 2005 dividido por 3 anos, adotando como estimativa um aumento de 7.770.000 ton de CO₂/ano.

Portanto podemos concluir que a produção de alga a partir do CO₂ da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e da fermentação alcoólica da usina estudada evita uma emissão de 0,7 % de CO₂, enquanto que a combustão de bagaço evita 0,65% e a fermentação 0,05% do CO₂ emitido pelos combustíveis de biomassa no estado de São Paulo no ano de 2011.

5.4.1.2 Emissões evitadas de origem não biomassa

As emissões de CO₂ evitadas de origem de fonte fóssil (não biomassa) provem da substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga produzido na Usina na safra de 2011/2012.

A produção de biodiesel de alga foi apresentada, anteriormente, na Tabela 23, com uma produção de 121.170.015 litros considerando o CO₂ da combustão de bagaço, 8.466.642 litros utilizando, apenas, o CO₂ da fermentação, o que totaliza em uma produção 129.636.657 litros de biodiesel de alga, aproveitando o CO₂ da combustão do bagaço e da fermentação alcóolica.

Para obter as emissões evitadas considerou-se o consumo de óleo diesel de acordo com a Secretária de Energia do estado de São Paulo, (SÃO PAULO, 2012), conforme Tabela 28 e o fator de emissão da combustão do óleo diesel de acordo com a Tabela 29.

Tabela 28. Consumo de óleo diesel no estado de São Paulo no ano de 2011.

	Consumo (l/ano)
Óleo Diesel	11.902.173.000

Fonte: São Paulo, (2012).

Tabela 29. Fator de emissão da combustão do óleo diesel.

	FE (Kg CO ₂ /l)
Óleo Diesel	2,67

Fonte: U.S. EPA, (2005) citado por Hundt e Reddy, (2011).

As emissões de CO₂ provindas da combustão do óleo diesel durante o ano de 2011 foi obtida através da multiplicação do consumo de óleo diesel (Tabela 28) pelo fator de emissão da combustão do óleo diesel (Tabela 29), obtendo as emissões de CO₂ apresentada na Tabela 30.

Tabela 30. Emissão da combustão do óleo diesel (Não Biomassa) para o ano de 2011 no estado de São Paulo.

	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
Óleo Diesel	31.778.801,9

Fonte: Autor.

Portanto a substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga gerado a partir do CO₂ da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e da fermentação alcoólica da usina estudada evita uma emissão de 1,09 % de CO₂, enquanto que o biodiesel produzido a partir da combustão de bagaço evita 1,02% do CO₂ e a fermentação 0,07% do CO₂ emitido pelo óleo diesel consumindo no estado de São Paulo no ano de 2011. As emissões evitadas pela substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga produzidos na Usina são apresentadas na Tabela 31.

Tabela 31. Emissões de CO₂ (Não Biomassa) evitadas do processo industrial da Usina com a substituição de óleo diesel por biodiesel de alga.

Safra 2011/2012	Emissão de CO ₂ (t) evitadas pelo biodiesel - Combustão	Emissão de CO ₂ (t) evitadas pelo biodiesel - Fermentação	Total evitado (t de CO ₂)
	-323.523,94	- 22.605,93	- 346.129,87

Fonte: Autor.

5.4.2 Estado de São Paulo

5.4.2.1 Emissões evitadas de origem de biomassa

As emissões de dióxido de carbono evitadas no processo industrial da combustão de biomassa e da fermentação alcoólica do setor sucroenergético do estado de São Paulo, são aquelas consumidas na produção de biomassa de alga.

De acordo com Stauffet, (2010) citado por Hundt e Reddy, (2011) 66% do CO₂ emitido pelo processo industrial é utilizado pela alga, ou seja, no setor sucroenergético do estado de São Paulo pode-se evitar as emissões apresentadas na Tabela 32.

Tabela 32. Emissões de CO₂ (Biomassa) evitadas no processo industrial do setor sucroenergético do estado de São Paulo com a produção de alga

Ano 2007	Emissão de CO ₂ (t) evitadas da combustão	Emissão de CO ₂ (t) evitadas da Fermentação	Total evitado (t de CO ₂)
	- 33.020.091,52	- 5.943.996,13	- 38.964.087,64

Fonte: Autor.

Baseado no 1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do estado de São Paulo (CETESB, 2011) as emissões de combustível de biomassa para o ano de 2007 foram estimadas em 68.735.000 toneladas de CO₂, conforme Tabela 27.

A Figura 9 ilustra as emissões dos combustíveis de biomassa para o ano de 2007, assim como as emissões de CO₂ que podem ser evitadas através da produção de alga.

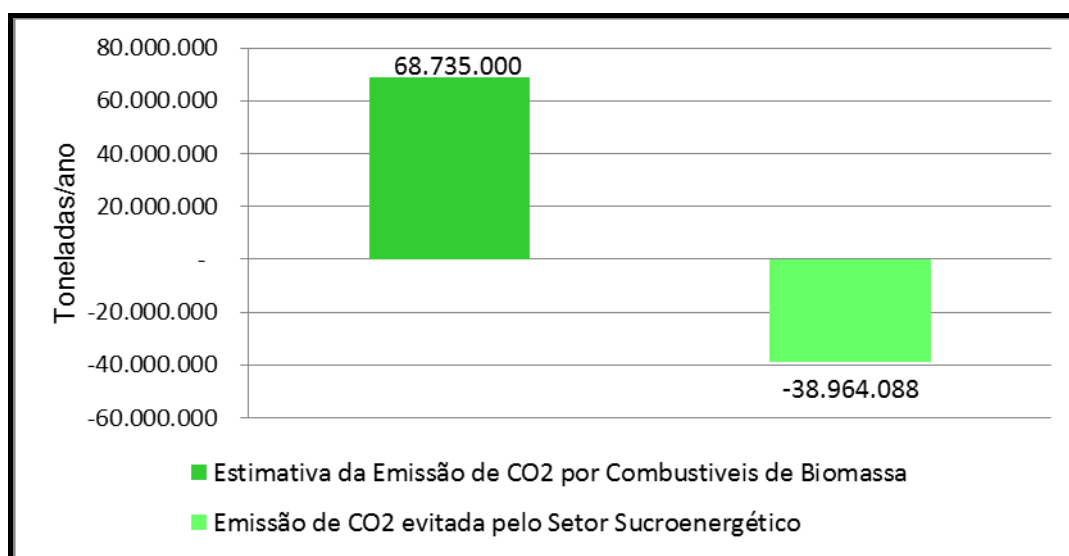


Figura 9. Emissões de CO₂ (biomassa) produzidas pelo estado de São Paulo e evitadas pelo setor sucroenergético do estado de São Paulo no ano de 2007.

Fonte: Autor.

Portanto podemos concluir que a produção de alga a partir do CO₂ da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e da fermentação alcoólica do setor sucroenergético do estado de São Paulo evitaria uma emissão de 56,7 % de CO₂, enquanto que a combustão de bagaço evita 48,1% e a fermentação evita 8,6% do

CO₂ emitido pelos combustíveis de biomassa no estado de São Paulo no ano de 2007.

5.4.2.2 Emissões evitadas de origem não biomassa

As emissões de CO₂ evitadas de origem de fonte fóssil (não biomassa) provem da substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga produzido no setor sucroenergético do estado de São Paulo durante o ano de 2007.

A produção de biodiesel de alga foi apresentada, anteriormente, na Tabela 25, com uma produção de 6.151.283.815 litros considerando o CO₂ da combustão de bagaço, 1.107.301.812 litros utilizando, apenas, o CO₂ da fermentação, o que totaliza em uma produção 7.258.585.627 litros de biodiesel de alga, aproveitando o CO₂ da combustão do bagaço e da fermentação alcoólica no setor sucroenergético do estado de São Paulo.

Para obter as emissões evitadas considerou-se o consumo de óleo diesel de acordo com a Secretária de Energia do estado de São Paulo, (SÃO PAULO, 2012), conforme Tabela 33 e o fator de emissão da combustão do óleo diesel de 2,67 Kg CO₂ por litro (Tabela 29).

Tabela 33. Consumo de óleo diesel no estado de São Paulo no ano de 2007.

	Consumo (l/ano)
Óleo Diesel	9.790.390.000

Fonte: São Paulo, (2012).

As emissões de CO₂ provindas da combustão do óleo diesel durante o ano de 2007 foi obtida através da multiplicação do consumo de óleo diesel (Tabela 33) pelo fator de emissão da combustão do óleo diesel (Tabela 29), obtendo as emissões de CO₂ apresentada na Tabela 34.

Tabela 34. Emissão da combustão do óleo diesel (Não Biomassa) para o ano de 2007 no estado de São Paulo.

	Emissão de CO ₂ (ton/ano)
Óleo Diesel	26.140.341,3

Fonte: Autor.

Portanto a substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga gerado a partir do CO₂ da combustão de bagaço de cana-de-açúcar e da fermentação alcoólica do estado de São Paulo evita uma emissão de 74,14 % de CO₂, enquanto que o biodiesel produzido a partir da combustão de bagaço evita 62,83% do CO₂ e a fermentação 11,31 % do CO₂ emitido pelo óleo diesel consumindo no estado de São Paulo no ano de 2007. As emissões evitadas pela substituição do óleo diesel pelo biodiesel de alga produzidos no setor sucroenergético do estado de São Paulo são apresentadas na Tabela 35.

Tabela 35. Emissões de CO₂ (Não Biomassa) evitadas no processo industrial do setor sucroenergético do estado de São Paulo com a substituição de óleo diesel por biodiesel de alga.

Ano 2007	Emissão de CO ₂ (t) evitadas pelo biodiesel - Combustão	Emissão de CO ₂ (t) evitadas pelo biodiesel - Fermentação	Total evitado (t de CO ₂)
	-16.423.927,78	-2.956.495,84	- 19.380.423,62

Fonte: Autor.

A Figura 10 ilustra as emissões do consumo de óleo diesel do estado de São Paulo para o ano de 2007, assim como as emissões de CO₂ que podem ser evitadas com a substituição do diesel pelo biocombustível de alga.

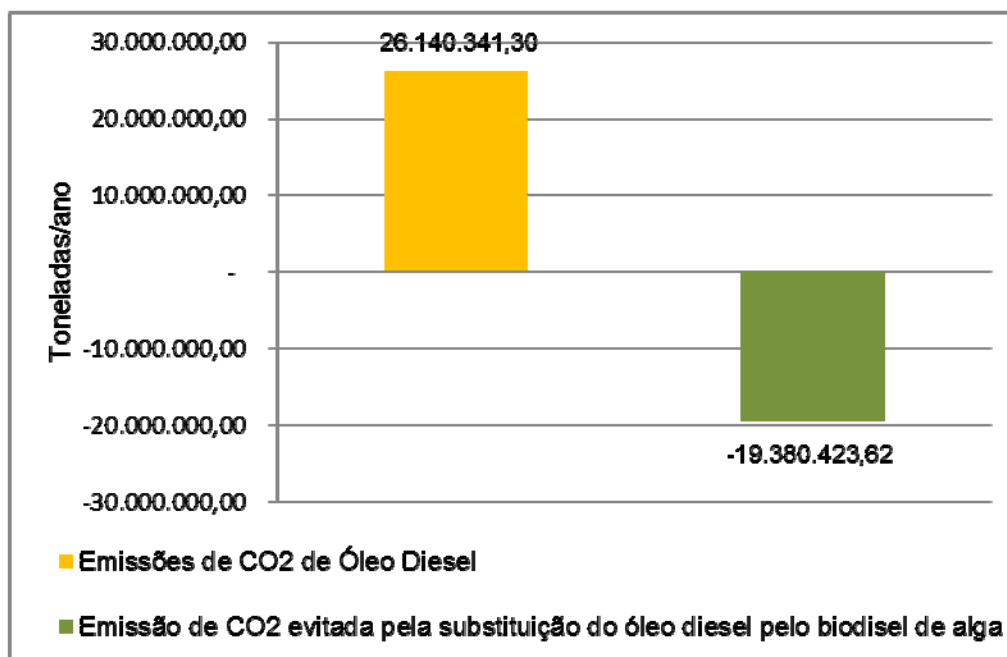


Figura 10. Emissões de CO₂ (não biomassa) produzidas pelo consumo de óleo diesel no estado de São Paulo e evitadas pelo setor sucroenergético do estado de São Paulo no ano de 2007.

Fonte: Autor.

6. CONCLUSÃO

A avaliação do uso do CO₂ do setor sucroenergético no cultivo de algas para a produção de biodiesel demonstrou, através da revisão bibliográfica e dos resultados do trabalho, que a produção de biodiesel de alga tem um grande potencial de reduzir as emissões de CO₂ tanto de origem de biomassa como não biomassa, e que além de ser uma fonte de combustível renovável, contribui com um melhor balanço energético e redução das emissões de GEE.

O biodiesel de alga além de apresentar grande potencial de reduzir as emissões GEE demonstra um ótimo potencial como fonte de combustível com maiores vantagens que outras fontes, sendo elas: baixo impacto no uso de terra, no fornecimento de água e comida, capacidade de utilizar efluentes e gases como nutrientes, rápida taxa de crescimento e alto conteúdo de óleo.

Entretanto de acordo com Hundt e Reddy, (2011) a tecnologia de produção de alga ainda é um pouco nova e cara. Para isso muitos pesquisadores e empresas estão desenvolvendo maneiras para fazer está tecnologia mais econômica e viável, com previsão do biodiesel de alga se tornar competitivo com diesel (origem fóssil) até 2020.

Se todo CO₂ liberado pelas plantas de cogeração de energia e fermentação alcoólica do setor sucroenergético do estado de São Paulo fossem utilizados por fotobiorreatores, 7 bilhões de litros de biodiesel de alga poderiam ser produzidos anualmente. E com isso deixariam de ser emitidos 38 milhões de toneladas de CO₂ de origem de biomassa e 19 milhões de toneladas de CO₂ de origem não biomassa, contribuindo assim com uma redução de 56,7% e 74,1%, respectivamente, no estado de São Paulo.

Destacam-se os principais resultados encontrados neste trabalho:

- As emissões em toneladas de CO₂ provenientes da combustão de bagaço de cana-de-açúcar foram: 985.516,1 para a Usina na safra de 2011/2012 e 50.030.441,7 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007.
- As emissões em toneladas de CO₂ provenientes da fermentação alcoólica foram: 68.862,0 para a Usina na safra de 2011/2012 e 9.006.054,7 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008.

- As emissões em toneladas de CO₂ provenientes da cogeração de energia e fermentação alcoólica foram: 1.054.378,1 para a Usina na safra de 2011/2012 e 59.036.496,4 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008.
- A produção de biodiesel de alga, a partir do CO₂ da combustão do bagaço de cana-de-açúcar, em litros foram: 121.170.015,1 para a Usina na safra de 2011/2012 e 6.151.283.814,6 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007.
- A produção de biodiesel de alga, a partir do CO₂ da fermentação alcoólica, em litros foram: 8.466.641,8 para a Usina na safra de 2011/2012 e 1.107.301.812,2 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008.
- A produção de biodiesel de alga, a partir do CO₂ da combustão do bagaço e da fermentação alcoólica, em litros foram: 129.636.656,7 para a Usina na safra de 2011/2012 e 7.258.585.626,8 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008.
- As emissões de origem de biomassa, em toneladas de CO₂ evitadas com o CO₂ da combustão do bagaço, foram: 650.440,6 para a Usina na safra de 2011/2012 e 33.020.091,5 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007, contribuindo assim com uma redução de 0,6% e 48,1 % das emissões de CO₂, respectivamente, no estado de São Paulo.
- As emissões de origem de biomassa, em toneladas de CO₂ evitadas com a fermentação alcóolica, foram: 45.448,9 para a Usina na safra de 2011/2012 e 5.943.996,1 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008, contribuindo assim com uma redução de 0,1% e 8,6% das emissões de CO₂, respectivamente, no estado de São Paulo.
- As emissões de origem de biomassa, em toneladas de CO₂ evitadas com o CO₂ da combustão do bagaço e da fermentação alcóolica, foram: 695.889,6 para a Usina na safra de 2011/2012 e 38.964.087,6 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008, contribuindo assim com uma redução de 0,7% e 56,7% das emissões de CO₂, respectivamente, no estado de São Paulo.

- As emissões de origem não biomassa, em toneladas de CO₂ evitadas com a substituição do diesel pelo biodiesel de alga proveniente do CO₂ da cogeração de energia foram: 323.523,9 para a Usina na safra de 2011/2012 e de 16.423.927,8 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007, contribuindo assim com uma redução de 1,0% e 62,8% das emissões de CO₂, respectivamente, no estado de São Paulo.
- As emissões de origem não biomassa, em toneladas de CO₂ evitadas com a substituição do diesel pelo biodiesel de alga proveniente do CO₂ da fermentação alcoólica foram: 22.605,9 para a Usina na safra de 2011/2012 e de 2.956.495,8 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008, contribuindo assim com uma redução de 0,1% e 11,3% das emissões de CO₂, respectivamente, no estado de São Paulo.
- As emissões de origem não biomassa, em toneladas de CO₂ evitadas com a substituição do diesel pelo biodiesel de alga proveniente do CO₂ da cogeração de energia e a fermentação alcoólica foram: 346.129,9 para a Usina na safra de 2011/2012 e de 19.380.423,6 para o setor sucroenergético do estado de São Paulo para o ano de 2007/2008, contribuindo assim com uma redução de 1,1% e 74,1 % das emissões de CO₂, respectivamente, no estado de São Paulo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BNDES; CGEE. **Bioetanol de Cana-de-Açúcar**: Energia para o desenvolvimento sustentável. Disponível em: < <http://www.bioetanoldecana.org/>>. Acesso em: 10 set. 2012. Rio de Janeiro, 2008. 316 p.

BONINI, M. A. **Cultivo Heterotrófico de *Aphanothece microscópica Nagali* e *Chlorella vulgaris* em diferentes fontes de carbono e vinhaça**. 112p. Dissertação de Mestrado. Araras, 2012.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional 2011**: Ano base 2010 / Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2011. Disponível em: < <https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2011.aspx>> Acesso em: 02 jul. 2012.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional**: Matrizes Consolidadas em (tep) 2002 a 2011. Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro : EPE, 2011.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. **Relatório do Inventário Estadual de Fontes Fixas**. São Paulo, 2008. 21 p. Disponível em: < <https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>> Acesso em: 02 jul. 2012.

FRANCISCO, E. C. **Biofixação de dióxido de carbono por microalgas acumuladoras de materiais graxos**. 90p. Dissertação de Mestrado. Campinas, 2010.

GHG PROTOCOL GUIDANCE. **Calculation Tool for Direct Emissions from Stationary Combustion**. Version 3.0, July 2005. 94 p.

HUNDT, K; REDDY,B.V. International Journal of Low-Carbon Technologies. **Algal biodiesel production from power plant exhaust and its potential to replace petrodiesel and reduce greenhouse gas emissions**. Oshawa, ON, Canada, . p. 294 -298, 2011.

IEA Bioenergy, **Algae as a Feedstock for Biofuels: An Assessment of the Current Status and Potential for Algal Biofuels Production**. Commercializing 1st and 2st – Generation Liquid Fuel from Biomass. IEA Energy Technology Network A Bioenergy Task 39. 2011.

IEA Bioenergy, **Current Status and Potential for Algal Biofuels Production**. . Commercializing 1st and 2st – Generation Liquid Fuel from Biomass. IEA Energy Technology Network A Bioenergy Task 39. 2010.

JACOB-LOPES E. et al. **Rates of CO₂ removal by *Aphanothece microscópica Nageli* in tubular photobioreactors**. Chem. Eng. Process. (2007), doi:10.1016/j.cep.2007.06.004

JACOB-LOPES, E. **Sequestro de Dióxido de Carbono em Fotobiorreatores**.163 p. Tese de Doutorado. São Paulo, 2007.

MATSUDO M. C. **Cultivo contínuo de *Arthrospira (Spirulina) platensis* em fotobiorreator tubular utilizando uréia como fonte de nitrogênio e CO₂ puro ou**

proveniente de fermentação alcoólica. 145 p. Tese de Doutorado. São Paulo, 2010.

MCT. Ministério da Ciência e Tecnologia. Primeiro Inventário Brasileiro De Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. **Emissões de Dióxido de Carbono por Queima de Combustíveis: Abordagem Top-Down.** Brasília, 2006. 115 p.

MEIRA; L.G.F.; MACEDO; I.C. **Etanol e mudança do clima: A contribuição para o PNMC e as metas para o pós-Kyoto.**(20--). Versão Preliminar, 19 p. Disponível em: <http://www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica/pdf/Matriz_Clima_Mac edo3.pdf>. Acesso em: 02 jul. 2012.

REDAELLI, C.; MARCILIO, N.R.; RECH, R. **Absorção de Gás Carbonico por Microalgas em Fotobiorreatores.** In: Seminário do Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. 2010. Porto Alegre- RS. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/31969/000784030.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 jul. 2012.

São Paulo. **Consumo de Bagaço de Cana-de-Açúcar 1980 a 2007.** Secretária de Energia do estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/bagaco-cana?tipo=Consumo>> Acesso em: 20 out. 2012.

São Paulo. **Consumo de Óleo Diesel de 2000 a 2012.** Secretária de Energia do estado de São Paulo. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/petroleo-oleo-diesel?tipo=consumo>>. Acesso em: 20 out. 2012.

SCOTT S. A, et al. **Biodiesel from algae:** challenges and prospects. Current Opinion in Biotechnology 2010, 21: 277–286. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 10 jul de 1012.

SEABRA, J.E.A. **Avaliação técnico-econômica de opções para o aproveitamento integral da biomassa de cana no brasil.** 274 p. Tese de Doutorado. Unicamp, FEM. Campinas, 2008.

UNICA. União da Indústria de Cana-de-Açúcar. **Produção de Etanol** Disponível em: <<http://www.unica.com.br>>. Acesso em: 20 out. 2012.