



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



PROSPECÇÃO DO USO DE MICROALGAS NA SÍNTESE DE ETANOL

Gabriela Aparecida Santos

Uberlândia – MG

2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
QUÍMICA



PROSPECÇÃO DO USO DE MICROALGAS NA SÍNTESE DE ETANOL

Gabriela Aparecida Santos

Monografia de graduação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso do curso de Engenharia Química.

Uberlândia – MG

2018

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA DA MONOGRAFIA DA DISCIPLINA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GABRIELA APARECIDA SANTOS
APRESENTADA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, EM 06/12/2018.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dra. Fabiana Regina Xavier Batista
Orientadora – FEQUI/UFU

Prof.^a Dr. Juliana, de Souza Ferreira
FEQUI/UFU

Doutorando: Felipe Santos Moreira
PPGEQ/FEQUI/UFU

AGRADECIMENTOS

À Deus pela minha vida, por me guiar e dar a oportunidade de realizar os meus sonhos.

À minha família, especialmente aos meus pais, Jésio e Valéria, pelo cuidado, carinho, atenção e pela motivação que me dão todos os dias para obter êxito no que almejo.

À minha irmã Daniela, que me motiva e alegra nos dias difíceis, me inspira e ensina a ser uma pessoa melhor e correr atrás dos meus objetivos e que está sempre do meu lado quando eu preciso.

À Prof. (a) Dra. Fabiana que eu tanto admiro pela dedicação, atenção, apoio e incentivo em todos esses anos na Iniciação Científica e na realização deste trabalho.

Aos meus amigos que propiciaram momentos de muita alegria e pelo apoio e companheirismo nos momentos de dificuldade.

A todos os professores que tive durante a graduação que compartilharam seu conhecimento e sabedoria que colaborou para meu crescimento pessoal e profissional.

“Não devemos nos questionar porque algumas coisas nos acontecem e sim o que podemos fazer com o tempo que nos é dado”.

J.R.R Tolkien

SUMÁRIO

Lista de Figuras.....	i
Lista de Tabelas	ii
RESUMO	iii
ABSTRACT	iv
CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUÇÃO	1
1.2. OBJETIVOS	2
1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	2
CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. BIOCOMBUSTÍVEIS.....	3
2.2. ETANOL	3
2.2.1. Breve histórico da produção de etanol no Brasil	4
2.2.2. Processo produtivo.....	6
2.3. ALGAS	9
2.3.1. Microalgas e condições de cultivo	10
2.3.2. Processo de produção de etanol a partir de microalgas.....	13
2.4. ESTUDO E AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE SÍNTESE DE ETANOL POR MICROALGAS	14
2.4.1. Método I – Obtenção de etanol pela fermentação da alga <i>C. reinhardtii</i> com meio isento de SO ₄	15
2.4.2. Método II - Pré-tratamento ácido hidrotérmico da biomassa da alga <i>C. reinhardtii</i> adicionada ao processo de fermentação com levedura para a produção de etanol.....	17
2.4.3. Seleção do método mais favorável para análise da viabilidade econômica	19
CAPÍTULO III – AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL POR MICROALGAS	19
CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES	23
4.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	24
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

Lista de Figuras

Figura 1- Produção de etanol anidro e hidratado por Unidade da Federação.	5
Figura 2 - Evolução dos veículos leves no Brasil quanto ao tipo de combustível utilizado.	6
Figura 3 - Comparação entre diferentes rotas tecnológicas de produção de bioetanol.....	7
Figura 4 - Fatores ambientais que influenciam na acumulação de carboidratos em algas pela alteração das rotas bioquímicas..	11
Figura 5 - Processo de produção de bioetanol de terceira geração.....	14
Figura 6 - Rota proposta para produção de etanol por <i>C. reinhardtii</i>	16
Figura 7 - Esquematização do processo de síntese de etanol a partir de microalgas.....	20

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Principais grupos de algas uni e pluricelulares pertencentes ao reino Protoctista. ...	9
Tabela 2 - Funções dos nutrientes para o crescimento de microalgas.	12
Tabela 3 - Composição do meio TAP.	16
Tabela 4 - Componentes do Sais TAP com a substituição dos sulfatos por cloreto	16
Tabela 5 - Composição da solução de fosfato.....	16
Tabela 6 - Componentes do traço de elementos com a substituição dos sulfatos por cloreto...17	
Tabela 7 - Componentes do meio Tris Acetate Phosphate – TAP.....	18
Tabela 8 - Estimativa do custo dos equipamentos empregados na etapa de cultivo celular para a produção de etanol	20
Tabela 9 - Índices médios de composição do investimento total a partir do custo dos equipamentos	21
Tabela 10 - Estimativa do custo de matéria-prima	22
Tabela 11 - Análise econômica para a produção de etanol a partir da alga <i>C. reinhardtii</i>	22

RESUMO

Existe um crescente interesse por fontes alternativas de energia, principalmente por aquelas que contribuam em reduzir as emissões de CO₂, característica das fontes tradicionais de energia fóssil. Para isso, o uso de biocombustíveis, como o etanol, é visto como uma alternativa viável. Ressalta-se que o Brasil é pioneiro na utilização em larga escala de etanol combustível desde o fim da década de 1970, e ainda apresenta notável evolução, utilizando um modelo produtivo que tem como matéria-prima a cana-de-açúcar. Entretanto, o foco na atualidade é a obtenção de novas fontes que apresentem rendimento favorável e que tenham baixos custos para serem ampliadas a uma escala comercial. Neste contexto, destaca-se o uso das microalgas para a produção de etanol, visto que elas apresentam uma alta taxa fotossintética e possuem imensa biodiversidade e variabilidade em sua composição bioquímica. Além disso, as algas são de fácil cultivo, pois se desenvolvem em diferentes condições e apresentam elevada taxa de crescimento produzindo considerável quantidade de biomassa. Deste modo, a proposta deste trabalho de conclusão de curso vislumbra detalhar a partir de uma revisão bibliográfica os principais métodos para a produção de etanol a partir de microalgas levando em consideração os aspectos biológicos e tecnológicos e a realização de uma análise da viabilidade econômica do processo de síntese de etanol por microalgas para obtenção de uma estimativa do tempo de retorno do investimento proposto.

Palavras-chave: Etanol de terceira geração, microalga, viabilidade econômica.

ABSTRACT

There is a growing interest in alternative sources of energy, especially those that contribute to reducing CO₂ emissions, which is characteristic of traditional sources of fossil energy. For this, the use of biofuels as ethanol is seen as a viable alternative. It is noteworthy that Brazil is a pioneer in the large-scale use of fuel ethanol since the end of the 1970s, and still shows remarkable evolution, using a production model that has as raw material sugar cane. However, the current focus is to obtain new sources that present favorable income and have low costs to be expanded on the commercial scale. In this context, the use of microalgae for ethanol production is highlighted, since they have presented high photosynthetic rate and immense biodiversity and variability in their biochemical composition. In addition, algae are easy to grow and producing considerable amounts of biomass. Therefore, the aim of the current work of conclusion of course was to detail from a bibliographical review the main methods for the ethanol production by microalgae and to estimate an analysis of the economic feasibility of the process obtaining the estimation return time of investment.

Keywords: Third-generation bioethanol, microalgae, economic viability.

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1. INTRODUÇÃO

A demanda de energia no mundo cresce de forma exponencial em função do aumento populacional. A maior parte desta energia é fornecida pela utilização de combustíveis fósseis, como o petróleo e o gás natural. No entanto, essas fontes de energia apresentam limitações, pois por não serem renováveis, gera uma incerteza em sua oferta no futuro além da associação à poluição do meio ambiente bem como as mudanças climáticas (HO et al., 2012).

Neste contexto, o uso de biocombustíveis que sejam renováveis e não contribuam para o aumento do efeito estufa e do aquecimento global tem sido uma alternativa eficiente para a substituição de combustíveis fósseis. Dentre os biocombustíveis existentes, estima-se que o etanol seja um dos mais utilizados, pois apresenta combustão mais limpa reduzindo emissões de gases como o CO₂ além de ser biodegradável (JOHN et al., 2011).

Atualmente, o etanol é obtido a partir de dois tipos principais de fontes de biomassa, denominadas de primeira e segunda geração: enquanto a primeira compreende culturas tradicionais, como a cana-de-açúcar e o milho, a segunda engloba materiais lignocelulósicos, como o bagaço de cana-de-açúcar e a palha de milho, normalmente resíduos do processamento dos primeiros.

Os biocombustíveis de terceira geração que estão em sob constante estudo e desenvolvimento, são os obtidos através da biomassa de microrganismos, em especial de microalgas (LAM e LEE, 2012). As justificativas para a produção de biocombustíveis a partir de microalgas em comparação com os de primeira e segunda geração são que o cultivo pode ser realizado em terras com baixo potencial agrícola reduzindo a competição por terras agricultáveis e também podem ser cultivadas em água do mar, águas salobras e, como fontes de carbono, resíduos industriais (como efluentes orgânicos e CO₂) (SCHENK et al., 2008). Além disso, fatores como a elevada eficiência de conversão fotossintética, o rápido crescimento e o elevado teor de carboidratos, fazem das microalgas uma das matérias-primas mais promissoras para a produção de bioetanol (CHISTI, 2008).

Embora se pressuponha que a produção e o processamento de microalgas em escala industrial para produção de bioetanol sejam motivadoras, este processo ainda se encontra em um estágio inicial (ALAM et al., 2012; LAM e LEE, 2012). Devido ao caráter relativamente preliminar da técnica, pesquisas em diversas frentes devem ser realizadas de modo a tornar o processo de produção de bioetanol de terceira geração economicamente viável. Assim, este

trabalho pretende dar sua parcela de contribuição avaliando algumas formas favoráveis de obtenção de etanol a partir de microalgas e a aplicação da viabilidade econômica em relação à determinada tecnologia de conversão.

1.2. OBJETIVOS

Esse trabalho teve como objetivo geral o estudo da produção de etanol a partir de microalgas no qual os objetivos específicos foram:

- i. Avaliar as diferentes formas de obtenção de etanol a partir de microalgas;
- ii. Selecionar uma tecnologia de conversão de bioetanol por microalgas que apresentasse um rendimento favorável;
- iii. Realizar a estimativa da viabilidade técnico-econômica em relação a tecnologia de conversão selecionada;

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 4 (quatro) capítulos. O Capítulo I apresenta uma introdução ao tema proposto seguido dos objetivos gerais e específicos.

O Capítulo II consiste em uma revisão bibliográfica dedicada a expor os fundamentos e o estado da arte das diversas áreas do tema proposto. Junto deste encontra-se a apresentação de alguns métodos para a obtenção de etanol a partir de microalgas (de acordo com a literatura) e avaliação destes a fim de selecionar o que obteve resultados mais promissores.

O Capítulo III consiste na análise da viabilidade econômica do processo produtivo de etanol a partir de microalgas (em relação ao método selecionado anteriormente).

No Capítulo IV são apresentadas tanto as conclusões gerais quanto sugestões para trabalhos futuros. Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas.

CAPÍTULO II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. BIOCOMBUSTÍVEIS

Os biocombustíveis são substâncias derivadas de biomassa renovável, podem substituir parcial ou integralmente compostos de origem fóssil em motores ou em outros tipos de geração de energia e são biodegradáveis, reduzindo, portanto, impactos elevados ao meio ambiente. Os dois principais biocombustíveis líquidos usados no Brasil são o etanol obtido a partir da cana-de-açúcar e o biodiesel, que é produzido a partir de óleos vegetais ou de gorduras animais (MME, 2018).

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), nos últimos oito meses do ano de 2018, a produção de biodiesel aumentou 26% e o consumo de etanol automotivo cresceu 14%. Os números seguem a expectativa mundial de substituir gradativamente os combustíveis fósseis por biocombustíveis com menores índices de emissões de gases de efeito estufa. Estes indicadores também podem contribuir para que as fontes renováveis representem 44% na matriz energética até dezembro de 2018, aumentando um ponto percentual em relação ao indicador de 2017 (43%) (MME, 2018).

Como no Brasil há uma ampla disponibilidade territorial e condições climáticas favoráveis ao cultivo das matérias-primas necessárias para a produção dos biocombustíveis, tem-se incentivado investimentos em políticas públicas de cunho social para o aproveitamento das potencialidades regionais, com geração de renda e empregos (ANP, 2018).

Para incentivar a produção de biocombustíveis e dar previsibilidade ao mercado, o governo sancionou a lei que cria o RenovaBio, que é a Política Nacional de Biocombustíveis e tem como objetivos criar ferramentas para que o Brasil possa cumprir os compromissos firmados no acordo de Paris e incentivar a expansão dos biocombustíveis com foco na regularidade do abastecimento.

2.2. ETANOL

O etanol é uma substância química com fórmula molecular C_2H_6O , produzida especialmente via fermentação de diferentes matérias-primas como a cana de açúcar, milho, beterraba, batata, entre outros. Aproximadamente 9% do etanol mundial são produzidos sinteticamente a partir de eteno, enquanto os 91% restantes são obtidos através da fermentação de açúcares com micro-organismos, sendo denominado bioetanol por ser produzido via

bioquímica (DEMIRBAŞ, 2005). É considerado uma alternativa interessante para substituição de combustíveis fósseis, pois é facilmente biodegradável, reduz emissões de óxidos de nitrogênio e material particulado (DEMIRBAŞ, 2005), reduz emissões de CO₂ em mais de 80% ao mesmo tempo que elimina a emissão de dióxido de enxofre, causador da chuva ácida (LASHINKY e SCHWARTZ, 2006).

Existem duas formas da utilização do etanol como combustível veicular: o etanol hidratado, aplicado diretamente no tanque do veículo, substituindo a gasolina, e o etanol anidro que é usado como aditivo à gasolina, substituindo o chumbo tetraetila por melhorias no motor e também por questões ambientais (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2005).

2.2.1. Breve histórico da produção de etanol no Brasil

O Brasil é pioneiro na utilização em larga escala de etanol combustível desde o fim da década de 1970. No ano de 1973, ocorreram duas crises que impulsionaram o incentivo à produção de etanol no Brasil: a crise do petróleo e a crise na indústria canavieira. Nesse cenário de crise, em 1975, foi criado o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), programa federal com o objetivo de aumentar a produção de etanol e reduzir a importação de petróleo (BRAY; FERREIRA; RUAS, 2000; SHIKIDA; BACHA, 1999).

Quando o Proálcool foi implementado, o Brasil já era um relevante produtor de cana-de-açúcar, moendo 68,3 milhões de toneladas de cana por ano e produzindo 555,6 milhões de litros de etanol, dos quais 232,6 milhões de litros de etanol anidro e 323,0 milhões de litros de etanol hidratado (NASTARI, 1983). Na primeira fase do Proálcool (1975-1979), o álcool produzido em destilarias anexas às usinas de açúcar era do tipo “anidro”, ou seja, desidratado, o que permitia a mistura com a gasolina. A produção de álcool cresceu de 600 milhões de litros por ano em 1975-1976 para 3,4 bilhões de litros por ano em 1979-1980. Na segunda fase do Proálcool (1979-1985), o álcool passou a ser produzido também em destilarias autônomas, dedicadas exclusivamente à produção de álcool, sem produção de açúcar. Nesta fase, dá-se início à produção de álcool hidratado, o que permitiria seu uso generalizado em carros a álcool. Com isso, a produção de álcool cresceu substancialmente no período, chegando a 11,8 bilhões de litros na safra de 1985-1986.

O setor sucroalcooleiro brasileiro é um dos mais competitivos do mundo, com bons índices de produtividade, rendimento industrial e com baixos custos de produção. Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), no ano de 2012,

produziu-se mais de 23,7 m³ etanol enquanto a produção de 2018 já é de 26,06 m³ até o mês de setembro, conforme apresentado na Figura 1.

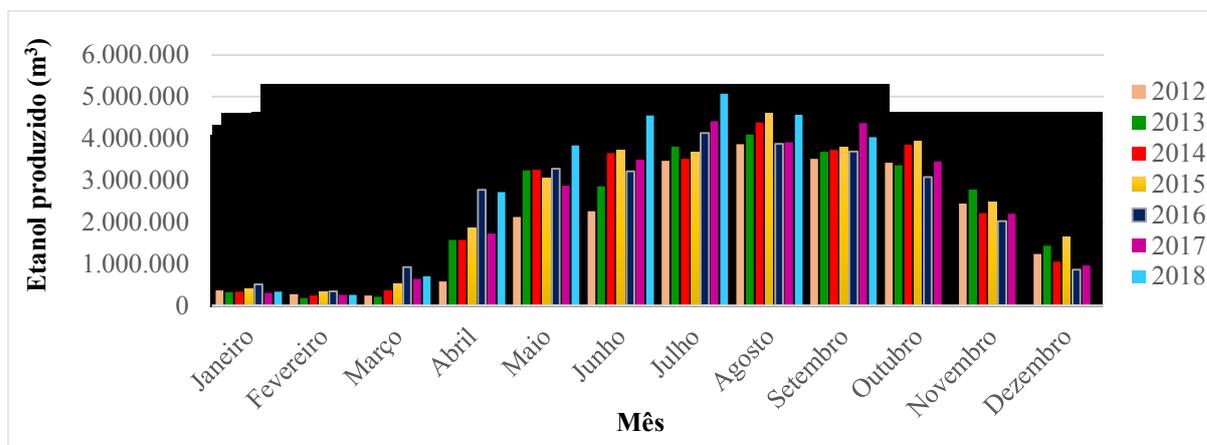


Figura 1- Produção de etanol anidro e hidratado por Unidade da Federação.

Fonte: Adaptado de ANP, 2018.

Com esse cenário, o Brasil é o segundo maior produtor de etanol do mundo, ficando somente atrás dos Estados Unidos da América (EUA).

A evolução do mercado de etanol combustível no Brasil tem sido significativa desde seu princípio até hoje. O empenho de empresários, cientistas e a própria sociedade para concretizar a substituição da gasolina por um combustível renovável e produzido localmente tem se mostrado eficaz e progressivo.

O etanol combustível passou por três momentos distintos nas variadas fases do Proálcool, como mostra a Figura 2. Em um primeiro instante, até 1989, persistiu o uso de etanol em carros a álcool (hidratado) e a mistura do etanol anidro à gasolina. Em um segundo momento, após a crise de 1989 até 2002, prevaleceu o declínio e o desaparecimento do carro a álcool, e aumento das quantidades de etanol anidro na mistura. Por último, o período de 2002 até 2014 foi marcado pela introdução do carro flex fuel no país (CORTEZ, 2016).

Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (Unica), o consumo médio mensal de 2,2 bilhões de litros de etanol (anidro e hidratado) pela frota de veículos flexfuel do Brasil evitou a emissão de 32 milhões de toneladas de gás carbônico na atmosfera no primeiro semestre de 2018. De acordo com a entidade, as emissões evitadas entre janeiro e junho são as maiores para o período desde 2003, quando os primeiros modelos *flex* começaram a rodar no país (REVISTA GLOBO RURAL, 2018).

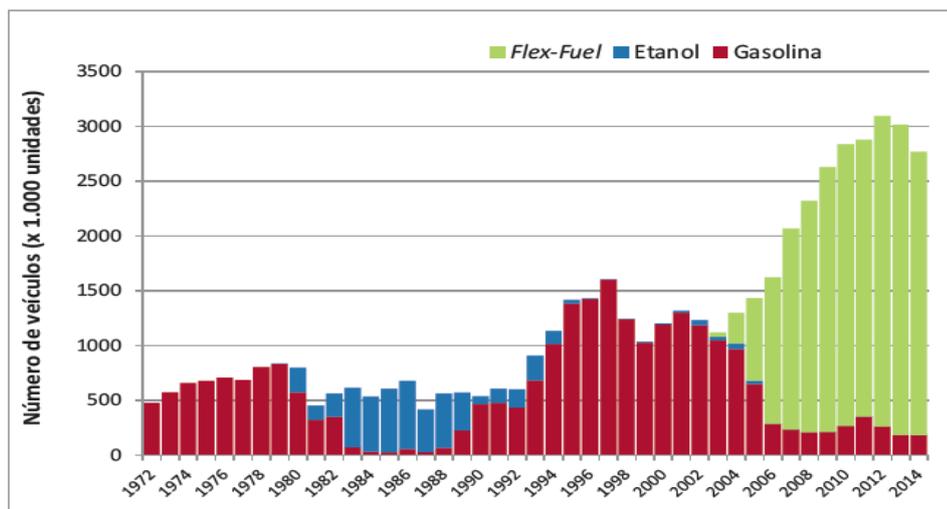


Figura 2 - Evolução dos veículos leves no Brasil quanto ao tipo de combustível utilizado.
Fonte: CORTEZ, 2016.

Muitos países consideram o programa Proálcool um exemplo a ser seguido pelo seu desenvolvimento. Observa-se esse interesse na América Latina, na Ásia e na África, principalmente por parte de países que possuem reservas de carvão mineral, se interessam pelo etanol de cana-de-açúcar pelos possíveis impactos sociais (CORTEZ, 2016).

2.2.2. Processo produtivo

A produção de etanol por via fermentativa é a mais utilizada no Brasil e nos EUA. A matéria-prima, utilizada na fermentação, pode ser açucarada (cana-de-açúcar, beterraba, melão, etc.), amiláceas (milho, arroz, mandioca, etc.) e celulósica (madeira, resíduos agrícolas) (LIMA; BASSO; AMORIM, 2001; VASCONCELOS, 2012).

No Brasil, a matéria-prima principal utilizada é a cana-de-açúcar, enquanto nos EUA, maior produtor mundial de etanol, a principal matéria-prima é o milho. Pode-se classificar o etanol segundo a matéria-prima utilizada na sua produção em etanol de primeira, segunda e terceira geração (JOHN et al., 2011).

A Figura 3 é um comparativo entre a primeira e a segunda geração de etanol que se baseiam em três diferentes rotas. A primeira delas usa biomassa açucarada, mais comumente cana-de-açúcar e beterraba, a segunda usa fontes amiláceas (por exemplo, milho, trigo e mandioca) e a terceira, biomassa lignocelulósica. Cada rota apresenta um processo para obtenção da solução açucarada que será fermentada para obtenção do etanol.

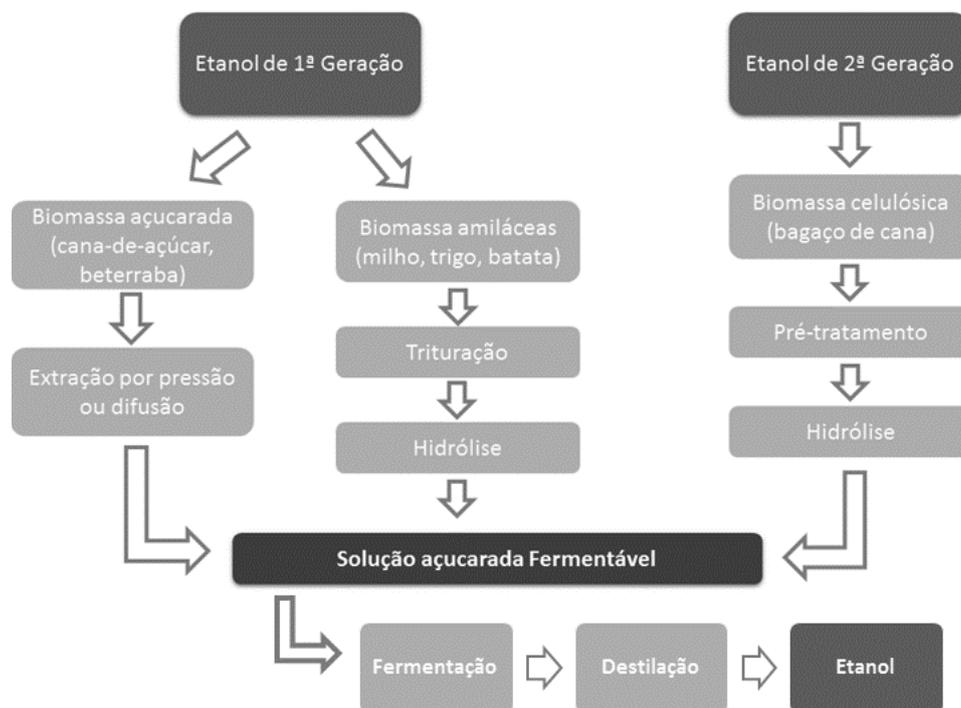


Figura 3 - Comparação entre diferentes rotas tecnológicas de produção de bioetanol.

Fonte: Adaptado de BNDES e CGEE, 2008.

Na produção de etanol de primeira geração, utilizam-se espécies vegetais que fornecem diretamente os açúcares necessários à fermentação sendo assim, um processo produtivo mais simples (MUSSATTO et al., 2010). A obtenção de glicose ocorre a partir do processo de moagem da cana-de-açúcar para liberação do caldo. Da mesma forma, o açúcar pode ser removido da beterraba pelo corte da beterraba em fatias finas e pela lavagem das fatias com uma corrente de água em contracorrente em um extrator apropriado (BOGLIOLO et al., 1996).

Já na produção de etanol a partir de espécies que estocam a glicose sob a forma de amido (milho, arroz, trigo, mandioca e batata), há necessidade de uma etapa adicional para liberação da glicose, pois os micro-organismos fermentadores não são capazes de utilizar o amido diretamente. O processo é conhecido por sacarificação e consiste na conversão do amido em açúcares fermentáveis pela hidrólise. Essa hidrólise pode ser feita por maltagem, por adição de enzimas ou pela ação de ácidos.

O etanol de segunda geração, como é conhecido, pode ser produzido, a partir dos restos de vegetais que já foram processados pela indústria como, por exemplo, palha de arroz, palha de trigo, palha de milho e palha e bagaço de cana-de-açúcar (SARKAR et al., 2012). A produção de bioetanol de segunda geração, por utilizar matérias-primas mais complexas, requer um processo produtivo com mais etapas que o de primeira geração. O processo produtivo pode ser

resumido em quatro estágios: pré-tratamento da biomassa, hidrólise com produção de açúcares fermentescíveis, fermentação dos açúcares e, por fim, a separação do produto por destilação (SÁNCHEZ e CARDONA, 2008).

A produção de etanol de primeira e segunda geração, no entanto, apresentam algumas desvantagens. Na primeira geração os fatores que têm sido bastante questionados são a utilização de terras aráveis que poderiam ser empregadas no cultivo de alimentos e emprego de matérias-primas com grande valor nutritivo para a produção de combustível ao invés de produtos alimentícios (como açúcar e farinha de milho). O impacto do bioetanol de primeira geração sobre os preços globais dos alimentos é sensível, especialmente nas regiões mais economicamente vulneráveis do planeta (BRENNAN e OWENDE, 2010). Já na obtenção de etanol de segunda geração as desvantagens são o seu baixo rendimento (pequena conversão da biomassa lignocelulósica em bioetanol) e o alto custo envolvido com o processo de hidrólise no seu atual estado de desenvolvimento (JOHN et al., 2011). Mesmo com a matéria-prima sendo acessível a baixo custo, a produção de bioetanol lignocelulósico em escala industrial é mais cara que a produção de bioetanol de primeira geração, devido ao alto custo energético envolvido com as técnicas usuais de pré-tratamento da biomassa (HARUN e DANQUAH, 2011).

Com isso, surge a necessidade de se explorar novas tecnologias para obtenção de etanol que visem uma boa produção e que minimizem as desvantagens em relação às outras gerações.

A produção de etanol (e outros biocombustíveis como o biodiesel) de terceira geração utilizando como matéria-prima as algas têm sido exploradas por diversos pesquisadores no ramo da biotecnologia dentre outros. Elas são consideradas uma alternativa ao cultivo de alimentos na produção de combustíveis renováveis por serem ricas em lipídios – visando a produção de biodiesel - e carboidratos – visando a produção de etanol. Apresentam diversas vantagens com relação a outras biomassas, pois não afetam o fornecimento de alimento, não competem por terras agricultáveis, consomem menos água que outros cultivos; podem crescer em diferentes ambientes, impróprios para outras espécies, utilizando água salgada, salobra ou mesmo águas residuais, são capazes de capturar eficientemente emissões de carbono de plantas industriais e tem o potencial de produzir coprodutos de alto valor (SIRAJUNNISA; SURENDHIRAN, 2016).

2.3. ALGAS

As algas formam a base da grande maioria das cadeias tróficas aquáticas, fornecendo oxigênio para os outros seres aquáticos e contribuindo com a maior parte do oxigênio disponível na atmosfera. São consideradas organismos talófitos (ou seja, não possuem raízes, caule e folhas), fotossintetizantes (exceto algumas espécies parasitas) que possuem em comum o pigmento clorofila (LEE, 2008). Elas podem ser autotróficas ou heterotróficas. As autotróficas, através da fotossíntese, aproveitam a obtenção de açúcares fermentescíveis a partir de biomassa microalgal luz solar e fixam o carbono do CO₂ atmosférico o qual é assimilado como material de reserva tal como carboidratos. Há muitas espécies heterotróficas as quais são capazes de utilizar pequenas moléculas orgânicas do ambiente e transformá-las em substâncias como lipídeos e proteínas. Existem ainda algumas algas que são capazes de realizar a fotossíntese e aproveitar nutrientes orgânicos exógenos, esses seres, em particular, são denominados mixotróficos. A maioria das algas apresenta cloroplastos, cujo número e forma podem variar, mas que sempre apresentam clorofila, pigmento importante para a realização da fotossíntese. Além de diferentes tipos de clorofila (a, b, c, d ou e), os cloroplastos das algas podem apresentar outros pigmentos, tais como carotenos ou xantofilas (BRENNAN; OWENDE, 2010).

Entre as características consideradas na classificação das algas, destacam-se basicamente duas: o tipo de pigmento fotossintetizante e a presença de substâncias de reservas armazenadas no interior das células, existindo sete filos distintos de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1 - Principais grupos de algas uni e pluricelulares pertencentes ao reino Protocista.

Algas					
Filo	Organização	Tipo de clorofila	Pigmentos acessórios	Substância de reserva	Componentes da parede celular
Chlophyta	Unicelular ou multicelular	a,b	Carotenos e xantofilas	Amido	Celulose
Phaeophyta	Multicelular	a,c	Carotenos, fucoxantina e xantofilas	Óleos e laminarina	Celulose e algina
Rhodophyta	Multicelular (maioria)	a,d	Carotenos, xantofilas, ficoeritrina e ficocianina	Amido das florídeas	Celulose, ágar e carragenina
Bacillariophyta	Unicelular	a,c	Carotenos, fucoxantina e xantofilas	Óleos	Dióxido de silício
Chrysophyta	Unicelular (maioria)	a,c	Carotenos, fucoxantina e xantofilas	Óleos e crisolaminarina	Celulose
Euglenophyta	Unicelular	a,b	Carotenos e xantofilas	Paramilo	Não possui parede celular
Dinophyta	Unicelular	a,c	Carotenos, peridina e xantofilas	Amidos e óleos	Celulose

Usualmente as algas são agrupadas em duas categorias - microalgas e macroalgas – com base em sua morfologia e tamanho. Macroalgas são organismos multicelulares que possuem estruturas semelhantes a raízes, caules e folhas de plantas superiores. Já as microalgas, como o nome indica, são organismos microscópicos que em grande parte são unicelulares (JOHN et al., 2011). As microalgas possuem vantagens em relação às macroalgas por sua maior produtividade de açúcar devido, principalmente, ao rápido crescimento celular e tem a glicose como principal monossacarídeo derivado do carboidrato de sua estrutura. Já nas macroalgas encontram-se alginato e manitol, os quais são mais difíceis de fermentar, sendo mais desafiador converter macroalgas em etanol (HO et al., 2013).

2.3.1. Microalgas e condições de cultivo

Microalgas podem ser encontradas em diversos ambientes aquáticos do planeta. São utilizadas como matéria-prima em diversas aplicações, com destaque na alimentação humana, produtos da indústria farmacêutica e cosmética. Entretanto, tem-se visado a utilização de microalgas como fonte para biocombustíveis, uma vez que essas possuem imensa biodiversidade e variabilidade em sua composição bioquímica, provenientes de sua biomassa (BRASIL, 2014).

Elas podem ser classificadas de acordo com a maneira de funcionamento de seu metabolismo, utilizando fontes orgânicas ou inorgânicas de carbono com ou sem a presença de luz. São quatro os tipos de metabolismo possíveis em microalgas: autotrófico, heterotrófico, mixotrófico e heterotrófico. O cultivo autotrófico envolve a utilização de luz solar como a única fonte de energia, que é convertida em energia química através da fotossíntese juntamente com CO₂ como fonte de carbono. Já o cultivo heterotrófico é definido pela utilização de compostos orgânicos – como açúcares e ácido acético – como única fonte de energia e de carbono. O cultivo mixotrófico é um processo metabólico misto: a fotossíntese é a principal fonte de energia para a célula, embora também possa haver assimilação de compostos orgânicos complexos. Já o cultivo heterotrófico exige a presença de luz para que compostos orgânicos sejam utilizados como fonte de carbono (CHOJNACKA e MARQUEZ-ROCHA, 2004; KUMAR et al., 2010).

A composição bioquímica da biomassa das microalgas não é determinada somente pela natureza de cada espécie algal, mas pode diferir também de acordo com as condições de cultivo.

A Figura 4 apresenta os fatores que auxiliam no aumento de carboidrato nas células através da regulação das rotas bioquímicas (MILLÁN, 2016).

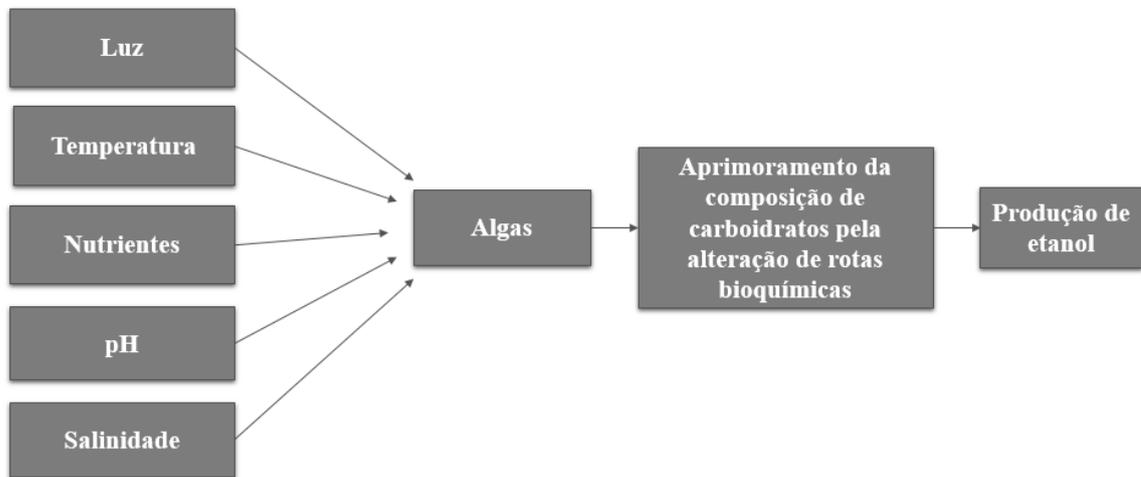


Figura 4- Fatores ambientais que influenciam na acumulação de carboidratos em algas pela alteração das rotas bioquímicas.

Fonte: adaptado de MILLÁN, 2016.

A luz atua como a principal fonte de energia no processo de produção de biomassa, influenciando diretamente no crescimento (LACAZ-RUIZ, 1996). Em ambientes com alta intensidade luminosa as quantidades de clorofila e outros pigmentos diminuem enquanto a de carboidratos e lipídeos aumenta.

Temperatura também é um fator muito importante, pois geralmente um aumento na temperatura leva a um aumento na produção de biomassa. Similarmente, um estresse de temperatura pode influenciar também o aumento da quantidade de carboidratos (MILLÁN, 2016).

Os nutrientes são fornecidos pelo meio e são necessários ao crescimento das microalgas e suas variações provocam mudanças consideráveis nas rotas metabólicas e na composição bioquímica. Conforme observado na Tabela 2, diversos elementos químicos são utilizados pelas microalgas durante as diferentes fases do seu desenvolvimento. Nitrogênio e fósforo são os nutrientes mais importantes para o crescimento e metabolismo das microalgas. Outros nutrientes como carbono, concentração de sais e metais também podem afetar o crescimento e a composição das células nos dois sistemas de cultivo (KLEIN, 2013).

Tabela 2 - Funções dos nutrientes para o crescimento de microalgas.

Nutriente	Fontes principais	Função	Concentração
Carbono (C)	CO ₂ , HCO ₃ ³⁻ , CO ₃ ²⁻	Suprir C para toda a célula	1-10 g L ⁻¹
Nitrogênio (N)	NO ₃ ³⁻ , ureia, aminoácidos, N ₂	Suprir N para toda a célula	10-2000 mg L ⁻¹
Fósforo (P)	Fosfatos, hidrofosfatos	Suprir P para reações celulares	10-500 mg L ⁻¹
Enxofre (S)	Sulfatos	Suprir S para proteínas e reações celulares	1-200 mg L ⁻¹
Sais inorgânicos	K, Ca, Na, Mg	Manter estrutura e atividade da célula	0,1-100 mg L ⁻¹
Elementos-traço	Fe, Zn, Mn, Pb, Cd	Agir como cofator de enzimas	0,01-10 mg L ⁻¹
Vitaminas	B, C, E	Auxiliar a divisão celular	0,01-1000 µg L ⁻¹

Fonte: KLEIN, 2013.

A salinidade pode afetar o crescimento de microalgas em virtude do estresse osmótico e iônico e das modificações nas proporções iônicas celulares devido à permeabilidade seletiva da membrana aos íons. Porém, alterações nas suas concentrações nos meios de cultivo podem influenciar na síntese de carboidratos, sendo que a diminuição da fonte de nitrogênio e o aumento da concentração de cloreto de sódio acarretam no aumento da concentração de carboidratos (MARGARITES, 2014).

O sistema de cultivo empregado também afeta na produção da biomassa algal. Os sistemas de cultivo de microalgas mais empregados são: abertos - lagoas *raceway* e os fechados - fotobiorreatores. O fotobiorreator é usado para o cultivo em um ambiente controlado e permite um crescimento da espécie desejada por longa duração sem mudanças nas características físicas e biológicas. No sistema aberto, água e nutrientes circulam por canais com uma profundidade de 15-20 cm e um rotor com pás fornece agitação e circulação (MATA; MARTINS; CAETANO, 2010).

2.3.2. Processo de produção de etanol a partir de microalgas

Para a produção de bioetanol de terceira geração, deve-se selecionar uma espécie de microalga com a habilidade de produzir altas concentrações de carboidratos ao invés de lipídios como composto de reserva energética (MUSSATTO et al., 2010). Além disso, algumas das características desejáveis para que uma microalga seja interessante para a produção de biocombustíveis segundo Brennan e Owende (2010) são: tolerar tensões de cisalhamento encontradas nos reatores (especialmente em fotobiorreatores fechados), apresentar grande capacidade de absorção de CO₂, tolerar variações de temperatura, apresentar ciclo produtivo de curta duração, apresentar alta eficiência fotossintética, ser capaz de auto flocculação, uma vez que a formação de agregados celulares facilita a etapa de recuperação da biomassa microalgal

As tecnologias de conversão para obtenção de etanol a partir de microalgas são variadas conforme observado na literatura. Em geral, observa-se que muitas pesquisas estão voltadas para o uso da biomassa algal para obtenção de etanol. Segundo Margarites (2014), em experimentos de produção de etanol a partir de biomassa de *Spirulina sp.*, obteve-se uma produtividade de 1,18 g.L⁻¹.h⁻¹ de etanol, utilizando 50% dos carboidratos provindos da sacarificação da biomassa e 50% a partir da glicose.

Alguns pesquisadores utilizam um pré-tratamento da biomassa algal para obter melhores resultados na obtenção de etanol, uma vez que ele quebra a estrutura cristalina da celulose e libera os açúcares fermentáveis para que a hidrólise de hidratos de carbono possa ser alcançada mais rapidamente e com maior rendimento (MOSIER et al., 2005). Os principais métodos incluem tratamento físico (tal como moagem e trituração), pré-tratamento termoquímico (tal como explosão a vapor) e explosão de fibra de amônia. Tem-se por objetivo reduzir o tamanho de partícula da biomassa para atingir uma maior área de superfície para o acesso da enzima aplicada ao processo.

Harun *et al.* (2009) obtiveram etanol por fermentação com *Saccharomyces bayanus*, a partir de células intactas e rompidas da espécie *Chlorococum sp.* e concluíram que o maior rendimento foi o obtido a partir das células previamente rompidas.

Outra etapa também considerada fundamental para a produção de bioetanol é a hidrólise do carboidrato (sacarificação), que constituem a parede das células de microalgas, a qual está inter-relacionada com a etapa do pré-tratamento, uma vez que esse processo ajuda no rompimento da parede celular (RAZEGHIFARD, 2013). A hidrólise do carboidrato é importante para torná-lo metabolizável pelos microrganismos que realizam a fermentação (MIRANDA, PASSARINHO, GOUVEIA, 2012). Para que isto ocorra é necessário realizar o

rompimento celular liberando para o meio os produtos intracelulares das microalgas, como o lipídio e carboidrato (BRENNAN; OWENDE, 2010).

A fermentação envolve microrganismos capazes de se desenvolver em ausência de oxigênio e de qualquer outro aceptor final de elétrons exógeno. A levedura *Saccharomyces cerevisiae* é comumente utilizada na fermentação alcoólica, em temperaturas de 30 °C e na presença, além da fonte de carbono, de uma fonte de nitrogênio (RAZEGHIFARD, 2013). Além da utilização de leveduras, outros microrganismos podem ser utilizados para o processo de fermentação. Essas possibilidades de uso de outros microrganismos fermentadores, além da *S. cerevisiae*, deve ser estudada no caso da obtenção de bioetanol por microalgas.

Um esquema para o processo para obtenção do etanol a partir da biomassa microalgal pode ser observado na Figura 5.

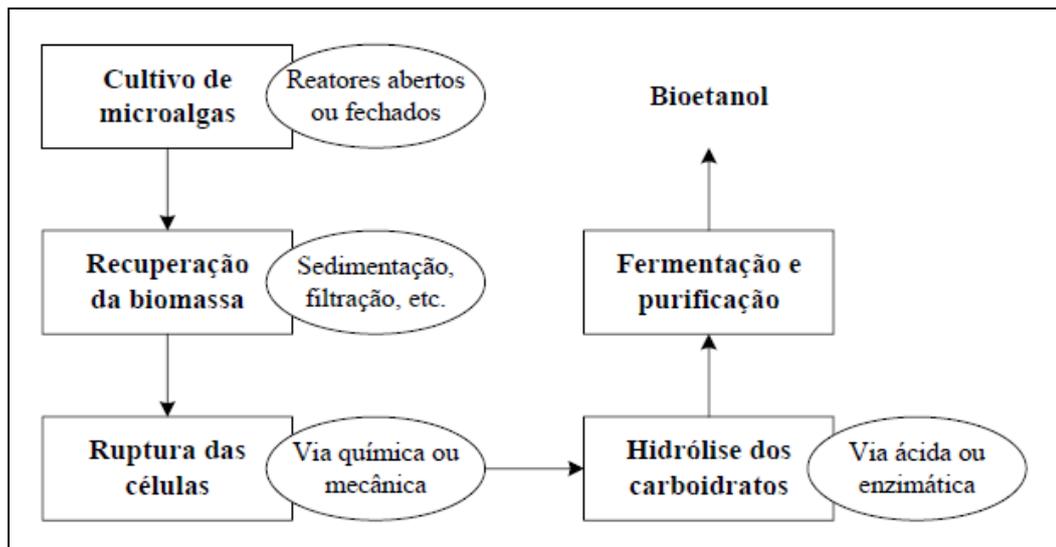


Figura 5 - Processo de produção de bioetanol de terceira geração.

Fonte: Adaptado de MUSSATTO et al., 2010

Logo, pode-se observar que existem vários métodos a serem estudados para obtenção de etanol a partir das algas verdes nos quais são necessários aperfeiçoamento das técnicas empregadas e um maior estudo das condições de operação utilizadas.

2.4. ESTUDO E AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS DE SÍNTESE DE ETANOL POR MICROALGAS

Já foi visto que para a produção de etanol a partir de microalgas, necessita-se primeiramente da seleção de uma microalga que apresente altas concentrações de amido e glicogênio em sua composição. Como exemplo de algumas microalgas que se adaptaram aos

parâmetros de produção deste biocombustível por possuírem considerável concentração de carboidratos estão a *Chlorella*, *Dunaliella*, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Scenedesmus* e *Spirulina* (JOHN *et al.*, 2011). Alguns trabalhos analisados que apresentaram resultados favoráveis em relação a conversão de microalgas em etanol utilizaram a microalga *Chlamydomonas reinhardtii* em comum. Diante disso, selecionaram-se os artigos que a utilizaram para obtenção de etanol.

Dentre os variados métodos para obtenção de etanol por microalgas (no caso *C. reinhardtii*), dois foram selecionados a fim de se avaliar os parâmetros empregados no processo e a concentração de etanol final obtida.

2.4.1. Método I – Obtenção de etanol pela fermentação da alga *C. reinhardtii* com meio isento de SO₄

O primeiro método avaliado foi o utilizado por Costa (2014), no qual a produção de etanol a partir da *C. reinhardtii* foi dada através da fermentação do inóculo algal com o meio TAP isento de enxofre.

O metabolismo da *C. reinhardtii* é complexo, incluindo uma ampla variedade de subprodutos finais resultantes da fermentação sob diferentes condições de crescimento, a fim de manter o equilíbrio de energia no meio anaeróbico. O processo de fermentação ocorre no escuro em meio anaeróbico ou na luz depois da depleção de enxofre. Os subprodutos gerados são dióxido de carbono, hidrogênio, ácido acético, ácido fórmico, etanol, lactato, glicerol, malato e succinato (MUS *et. al.*, 2007).

No trabalho desenvolvido por MUS *et al.* (2007), relatou-se que a formação de etanol ocorre durante a fotofermentação por *C. reinhardtii*, a partir da redução da acetil-CoA, resultando na oxidação de duas moléculas de NADH. Os autores enfatizaram que incrementos nos níveis de ADH1 mRNA ocorrem durante o período de anoxia. Assim, o piruvato pode ser também convertido a etanol via PDC1 (piruvato decarboxilase) e na rota da enzima álcool desidrogenase (ADH), verifica-se a produção de etanol e também a oxidação de um NADH.

A Figura 6 apresenta uma esquematização da rota proposta para produção de etanol pela alga *C. reinhardtii*.

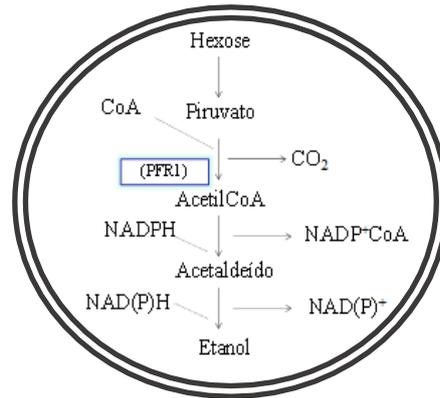


Figura 6 - Rota proposta para produção de etanol por *C. reinhardtii*.

Fonte: Adaptado de MUS et al., 2007.

Costa (2014) utilizou em seu trabalho as algas verdes unicelulares *C.reinhardtii* cc-124 que foram adquiridas do banco canadense *Chlamydomonas Resource Center* e subcultivadas em meio basal *Tris AcetatePhosphate* – TAP, proposto por ANDERSEN (2005).

A composição do meio de cultivo utilizado apresenta algumas soluções como TAP sais isento de enxofre, solução de fosfato e traços de elementos que são combinações de substâncias que são apresentadas nas Tabelas 3 a 6. E a concentração de ácido acético é de 17,4 mmol.L⁻¹ presente no meio.

Tabela 3 - Composição do meio TAP.

Reagentes	Concentração adicionada em 1000mL
Tris-base NH ₂ C (CH ₂ OH) ₃	2,42 g
TAP Sais	25,00 mL
Solução de fosfato	1,00 mL
Traço de elementos	1,00 mL
Ácido Acético	1,00 mL

Tabela 4 - Componentes do Sais TAP com a substituição dos sulfatos por cloreto.

Reagentes	Concentração (g/L)
NH ₄ Cl	15,00
MgCl ₂ · 6H ₂ O	3,29
CaCl ₂ · 2H ₂ O	2,00

Tabela 5 - Composição da solução de fosfato.

Solução de Fosfato	
Reagentes	Concentração (g/100mL)
K ₂ HPO ₄	28,80
KH ₂ PO ₄	14,40

Tabela 6 - Componentes do traço de elementos com a substituição dos sulfatos por cloreto.

<i>Traço de Elementos</i>	
Reagentes	Concentração (g/100mL)
Na ₂ EDTA·2H ₂ O	5,00
ZnCl ₂ ·7H ₂ O	2,12
H ₃ BO ₃	1,14
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0,5
FeCl ₂	0,5
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0,16
CuCl ₂ ·2H ₂ O	0,11
(NH ₄) ₆ ·MoO ₃	0,11

Os experimentos foram conduzidos em reatores (frascos de penicilina) de 50 mL e volume útil de 37,5 mL, utilizando meio TAP isento de enxofre com uma concentração de inóculo algal variável de 0,05, 0,10 e 0,20 g/L. A injeção de gás argônio no sistema ocorreu durante 3 min para remover o oxigênio. Os reatores foram mantidos na estufa a 25±1° C, com intensidade luminosa de 2200 lux (30 μE·m⁻²·s⁻¹) durante cinco dias (COSTA, 2014).

As amostras após a fermentação foram avaliadas e o melhor resultado para a produção de etanol foi obtido utilizando-se uma concentração de inóculo de 0,05 g/L no qual a concentração de etanol final obtida foi de 19,25 g/L. Deve-se ressaltar que o tempo de fermentação mais adequado para a síntese do etanol avaliado por Costa (2014) foi de 72 horas, pois em outros intervalos não se obteve considerável produção.

2.4.2. Método II - Pré-tratamento ácido hidrotérmico da biomassa da alga *C. reinhardtii* adicionada ao processo de fermentação com levedura para a produção de etanol

O segundo método avaliado foi o executado por NGUYEN et al. (2009), no qual o pré-tratamento hidrotérmico com ácido sulfúrico diluído foi aplicado para a hidrólise da biomassa da alga *Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90, em uma tentativa de determinar as condições ótimas de geração de açúcares monoméricos disponíveis para uma produção mais eficiente de etanol pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* S288C.

A alga *Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90 foi cultivada utilizando o meio *Tris Acetate Phosphate* – TAP, contendo os seguintes componentes apresentados na Tabela 7 com adição de 1,0 mL de ácido acético glacial.

Tabela 7 - Componentes do meio *Tris Acetate Phosphate* – TAP.

Reagentes	Concentração (g/L)
K ₂ HPO ₄	0,108
KH ₂ PO ₄	0,056
NH ₄ Cl	0,4
MgSO ₄ ·7H ₂ O	0,1
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0,05
C ₄ H ₁₁ NO ₃	2,422
C ₁₀ H ₁₆ N ₂ O ₈	0,05
BO ₃ H ₃	0,0114
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0,022
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0,00506
FeSO ₂ ·7H ₂ O	0,00499
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0,00161
CuSO ₄ ·5H ₂ O	0,00167
MO ₇ O ₂₄ (NH ₄).6H ₂ O	0,0011

A cultura das algas foi realizada a 23°C num fotobiorreator de 2,5 mL contendo 1,6 mL de meio autoclavado com 10% de inoculação sob iluminação contínua (450 $\mu\text{E}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), fornecidas por lâmpadas fluorescentes brancas e agitação rotativa (130 rpm). O pH do meio foi automaticamente ajustado para o intervalo de 7,0 a 7,4 pela alimentação de 1,0 M de ácido acético (NGUYEN et al., 2009).

As células foram colhidas por centrifugação e caracterizadas. Logo após, foram realizados o pré-tratamento com ácido sulfúrico diluído e o tratamento térmico em uma autoclave a diferentes temperaturas (100, 110 e 120 °C) num intervalo de tempo de 15 a 120 minutos. O líquido contendo os açúcares hidrolisados da biomassa algal foi coletado por centrifugação e neutralizado com CaCO₃ para ajuste de pH. O precipitado sólido formado foi removido e a fração líquida foi então filtrada por uma membrana para posterior uso no processo fermentativo que foi realizado utilizando-se a levedura *Saccharomyces cerevisiae S288C*. As amostras foram recolhidas num intervalo de 24 horas para análise da produção de etanol e do crescimento de células e a máxima concentração de etanol alcançada foi de 14,6 g/L.

2.4.3. Seleção do método mais favorável para análise da viabilidade econômica

Avaliando-se os dois estudos demonstrados nas seções anteriores, notou-se que em questões de produtividade NGUYEN et al. (2009) obtiveram melhores resultados, pois as amostras de etanol foram recolhidas num intervalo de tempo menor em relação ao executado por Costa (2014). Entretanto o fato de que a síntese de etanol foi realizada pela levedura *Saccharomyces cerevisiae* S288C enquanto que no trabalho de Costa (2014), a própria alga *Chlamydomonas reinhardtii* UTEX 90 sintetizou etanol pela sua rota metabólica deve ser considerado pela utilização exclusiva da microalga. Além disso, o método I foi mais simples, exigindo menos equipamentos e materiais em relação ao método II que precisou de mais etapas de processo.

Com isso, o Método I foi o escolhido para realização da etapa de análise da viabilidade econômica do processo de etanol a partir de microalgas.

CAPÍTULO III – AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ETANOL POR MICROALGAS

Na análise preliminar da viabilidade econômica do processo de síntese de etanol por microalgas tendo como referência a metodologia empregada no trabalho de Costa (2014) avaliado no capítulo anterior, tem-se como foco a estimativa do Capital Total de Investimento e do Custo Total de Produção empregado para o cálculo do tempo de retorno do investimento. Ressalta-se que a viabilidade econômica realizada no presente estudo foi baseada naquela efetuada por Batista (2007).

Os equipamentos minimamente propostos para o processo de produção do etanol por microalgas são basicamente compostos por um tanque misturador de aço inoxidável de 1 m³ para o armazenamento do meio de cultivo contendo suplementos, de um fotobiorreator tubular de larga escala (LPS) de 120 L operando em modo batelada, além de bombas para deslocamento do fluido na tubulação. Em adição são necessários ainda um compressor para injeção de gás argônio no reator, filtros para separação de partículas grandes do meio e uma centrífuga para separação sólido/líquido do meio já contendo o etanol. Todos os equipamentos e seus respectivos custos são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 - Estimativa do custo dos equipamentos empregados na etapa de cultivo celular para a produção de etanol (valores estimados conforme fabricante).

Equipamentos	Quantidade	Custo unitário (US\$)	Custo total (US\$)
Tanque agitado 1000L	1	7,702,35	7,702,35
Pré-filtro tipo <i>bag</i>	1	929,39	929,39
Fotobiorreator 120 L	1	33,136,60	33,136,600
Compressor de gás	1	4,275,70	4,275,70
Cilindro argônio 50 L	1	91,38	91,38
Centrífuga	1	42,645,410	42,645,41
Filtro PureFlo linha SKMV	1	919,40	919,40
Bomba	3	263,80	791,38
Custo total de compra (CC)			90,491,619

O esquema proposto para o processo de obtenção de etanol pode ser observado na Figura 7 no qual ilustra a disposição dos equipamentos utilizados.

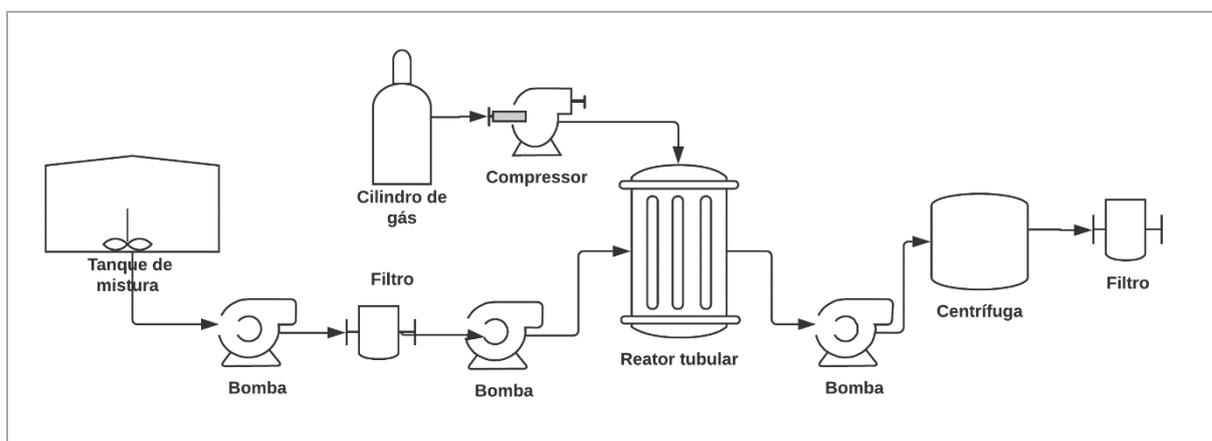


Figura 7 - Esquemática do processo de síntese de etanol a partir de microalgas.
Fonte: Autores (2018)

O fotobiorreator apresenta um ciclo de operação de 72 horas com um volume total de 120 litros. Considerando-se que o tempo operacional da planta seja de 330 dias/ano, seriam gastos anualmente cerca de 13,200,00 litros de meio de cultura.

O custo de operação da planta é a soma de todas as despesas relativas à matéria-prima, mão de obra, utilidades, etc. Considerou-se neste projeto que a indústria em questão já conta com uma infraestrutura no ramo biotecnológico.

Para o cálculo do capital de investimento foi proposto médias do multiplicador custo total de compra (CC) para cada item de custo suposto para a planta apresentados na Tabela 9

Tabela 9 - Índices médios de composição do investimento total a partir do custo dos equipamentos (Batista, 2007).

Item de custo	Média do multiplicador	Investimento (US\$)
1. Custo direto da planta (CD)		
Instalação	0,50 x CC	45,245,810
Tubulação	0,40 x CC	36,196,648
Instrumentação	0,35 X CC	31,672,067
Isolamento	0,03 X CC	2,714,749
Instalação elétrica	0,15 X CC	13,573,743
Subtotal		129,403,015
2. Custo indireto da planta (CI)		
Engenharia	0,25 X CC	22,622,905
Construção	0,35 X CC	31,672,067
Subtotal		54,294,971
3. Custo total da planta (CTP = CD + CI)		
Subtotal (CTP)		183,697,987
Honorários do empreiteiro (HE)	0,05 X CC	4,524,581
Contingência (C)	0,10 X CC	9,049,162
4. Capital fixo direto (CFD = CTP + HE + C)		
Subtotal (CFD)		197,271,729
Capital de giro (C_{giro})	0,10 X CC	9,049,162
Custo de partida ($C_{partida}$)	0,05 X CC	4,524,581
5. Capital de investimento (CTI = CFD + C_{giro} + $C_{partida}$)		
Subtotal (CTI)		210,845,472

A Tabela 10 apresenta o custo total com a matéria-prima. Os valores foram baseados nos catálogos dos fabricantes e considerando um ganho de escala de 50 %, pois os custos são dados em função de 1L ou 1Kg. Para a estimativa do custo de matéria-prima considerou-se o meio de cultivo (já apresentado nas Tabelas 3 a 6) utilizado no processo de fermentação.

Considerando que anualmente seriam gastos 13.200L de meio de cultura estima-se a capacidade da planta em relação à concentração de etanol obtida por Costa (2014) que foi de

19,25 g/L. Como mencionado anteriormente, esta estimativa refere-se somente a etapa de cultivo celular. O processo de destilação e purificação assim como armazenamento não foram o foco deste trabalho. Através do cálculo do custo com matéria-prima, estimou-se então o custo total de produção (Batista, 2007).

Tabela 10 - Estimativa do custo de matéria-prima (valores estimados conforme fabricante).

Composto	Quantidade	Custo unitário (US\$)	Custo total (US\$/ano)
Meio de cultura	13.200 L/ano	0,198	2,623,80

O preço de venda do etanol foi considerado de acordo com a empresa de produtos químicos Sigma Aldrich, que está em torno de US\$ 34,72 o litro.

Como esta análise foi realizada apenas para a etapa de cultivo celular e processo fermentativo, considerou-se que o custo de cultivo das algas para a obtenção de etanol compunha 50% do valor total, ou seja, US\$ 17,36 o litro. A Tabela 11 mostra um resumo das análises econômicas efetuadas.

Observa-se que a razão entre o custo total de produção com a capacidade da planta resultou no valor do custo de produção por unidade. Os rendimentos foram obtidos pela relação entre o preço de venda e a capacidade da planta e o lucro bruto foi obtido pela subtração dos rendimentos com o custo total de produção.

Assumindo que os impostos incidentes sobre o lucro bruto sejam de 40 %, estimou-se um lucro líquido de cerca de 135,919,61.

Tabela 11 - Análise econômica para a produção de etanol a partir da alga *C. reinhardtii*.

Item	
Capital total de investimento (US\$)	210,845,47
Custo total de produção (US\$/ano)	2,619,32
Capacidade da planta (g/ano)	254,100,00
Custo de produção por unidade (US\$/g)	0,010
Preço de venda (US\$/g)	0,90
Rendimentos (US\$/ano)	229,152,00
Lucro bruto (US\$/ano)	226,532,68
Lucro líquido (US\$/ano)	135,919,61
Tempo de recuperação do investimento (ano)	1,70

Logo, segundo Batista (2007), considerando-se uma taxa de juros de 5% a.a. o tempo de recuperação do investimento obtido foi de aproximadamente 2 anos.

CAPÍTULO IV – CONCLUSÕES

É notável que as microalgas podem apresentar um grande potencial para aplicação em diversas áreas, seja na farmacêutica, cosmética ou na área alimentícia. Isso se deve à sua composição bioquímica rica em diversos compostos que possibilitam a síntese de subprodutos de interesse por essas áreas. No que tange a produção de biocombustíveis, as algas têm se mostrado promissoras por possuírem considerável concentração de amido e lipídeos, compostos de interesse para a produção de bioetanol e biodiesel respectivamente.

A produção de etanol a partir de microalgas tem despertado o interesse de vários pesquisadores que buscam aprimoramento em suas metodologias para alcançar resultados satisfatórios. Dentre os métodos avaliados nesse trabalho, observou-se que a concentração de etanol obtida por Costa (2014) não é alta, mas considerável, levando-se em conta que é uma tecnologia de conversão em estudo e desenvolvimento.

A análise da viabilidade econômica da síntese de etanol pela alga *Chlamydomonas reinhardtii* mostrou que, para a concentração de etanol obtida por Costa (2014) e pela metodologia empregada por ela, o processo de síntese de etanol por microalgas é promissor, pelo fato do investimento inicial empregado ter um tempo de retorno satisfatório de aproximadamente dois anos. Entretanto, deve-se frisar que essa análise é uma estimativa preliminar do processo que busca apenas demonstrar uma avaliação superficial acerca dos gastos envolvidos no projeto já que considera apenas a etapa de cultivo celular sem contar com as etapas de destilação e purificação do etanol produzido.

O emprego da tecnologia de conversão utilizada por Costa (2014) deve ser estudado detalhadamente e reproduzida para que se consiga otimizar a quantidade de etanol obtida tornando o processo favorável e apto a competir com as outras tecnologias empregadas para obtenção de etanol, tanto de primeira quanto de segunda geração que estão em maior desenvolvimento e ainda apresentam melhores resultados.

Com isso, conclui-se que mais estudos devem ser realizados a fim de se encontrar uma tecnologia de conversão de etanol a partir de microalgas que vise aumentar a produtividade e que seja satisfatória em comparação com as outras gerações.

4.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em busca do avanço no processo de obtenção de etanol a partir de microalgas alguns parâmetros devem ser avaliados com rigor para se alcançar melhores resultados. Dentre eles estão:

- Cultivo – avaliar diferentes condições de iluminação e temperatura, variação do fornecimento de nutrientes nos meios de cultivo, sistemas de fotobiorreatores e lagoas, fontes de carbono, ente outros;
- Tipos de pré-tratamento e hidrólise da biomassa algal em metodologias que a utilizem;
- Fermentação – avaliar o efeito do tempo, temperatura e outras condições além de testar diferentes micro-organismos (bactérias, fungos filamentosos e leveduras não convencionais) para produção de bioetanol a partir do hidrolisado de microalgas;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAM, F.; DATE, A.; RASJIDIN, R.; MOBIN, S.; MORIA, H. Biofuel from algae - Is it a viable alternative? *Procedia Engineering*, n. 49, p. 221-227, 2012.

ANDERSEN, R. A., *Algal culturing techniques* (Ed), London Elsevier Academic Press, p.578, 2005.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCMBUSTÍVEIS. Produção e fornecimento de biocombustíveis. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/producao-de-biocombustiveis>>. Acesso em: 08 de novembro de 2018.

_____. Dados estatísticos. Produção de etanol. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/dados-estatisticos>>. Acesso em: 04 de novembro de 2018.

BATISTA, F. R. X. Formulação de Meio de Cultura Livre de Proteínas Animais para Células de *Drosophila melanogaster* Produtoras da Glicoproteína G do Vírus da Raiva. Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação da universidade Estadual de Campinas, 2007.

BOGLIOLO, M., BOTTINO, A., CAPANNELLI, G., DE PETRO, M., SERVIDA, A., PEZZI, G., VALLINI, G. Clean water recycle in sugar extraction process: Performance analysis of reverse osmosis in the treatment of sugar beet press water. *Desalination*, v. 108, p. 261-271, 1996.

BNDES; CGEE. Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável. Rio de Janeiro: BNDES. p.316, 2008.

BRASIL, B. dos S. A. F. Microalgas: a 3ª geração de biocombustíveis no Brasil. Embrapa Agroenergia - Artigo de divulgação na mídia (INFOTECA-E), 2014.

BRAY, S. C.; FERREIRA, E. R.; RUAS, D. G. As políticas da agroindústria canavieira e o PROÁLCOOL no Brasil. Marília: Unesp Marília, p. 104, 2000.

BRENNAN, L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 14, p. 557-577, 2010.

CARDONA, C. A.; SANCHEZ, O. J. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, v. 98, n. 12, p. 2415–2457, 2007.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, n. 25, v.3, p. 294-306, 2008.

CHOJNACKA, K., MARQUEZ-ROCHA, F.-J. Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae. *Biotechnology*, v. 3, n. 1, p. 21-34, 2004.

CORTEZ, L. A. B. *Universidades e empresas: 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro*. São Paulo: Blucher, 224, 2016.

COSTA, R. L. *Produção de Hidrogênio e Etanol a partir da alga verde Chlamydomonas reinhardtii*. Dissertação de Mestrado no Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. 2014.

DEMIRBAŞ, A. Bioethanol from Cellulosic Materials: A Renewable Motor Fuel from Biomass. *Energy Sources*, v. 27, p. 327-337, 2005.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Potencial de redução de emissões de CO₂ em projetos de produção e uso de biocombustíveis*. Rio de Janeiro, p.66, 2005.

HARUN, R., DANQUAH, M. K. Influence of acid pre-treatment on microalgal biomass for bioethanol production. *Process Biochemistry*, v. 46, p. 304-309, 2011.

HARUN, R.; DANQUAH, MK. & FORDE, GM. Microalgal biomass as a fermentation feedstock for bioethanol production. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, v. 85, p. 199-203, 2009.

HO, S. H. et al. Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock. *Hidrólise Ácida! Bioresource technology*. v. 135, p. 191–198, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.015>>

HO, S.-H., HUANG, S.-W., CHEN, C.-Y., HASUNUMA, T., KONDO, A., CHANG, J.-S. Characterization and optimization of carbohydrate production from an indigenous microalga *Chlorella vulgaris* FSP-E. doi: 10.1016/j.biortech.2012.10.100. 2012.

JOHN, R. P., ANISHA, G. S., NAMPOOTHIRI, K. M., PANDEY, A. Micro and macroalgal biomass: A renewable source for bioethanol. *Bioresource Technology*, v. 102, p. 186-193, 2011.

KLEIN, B. C. Cultivo de microalgas para produção de bioetanol de terceira geração Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP, 2013.

KUMAR, A., ERGAS, S., YUAN, X., SAHU, A., ZHANG, Q., DEWULF, J., MALCATA, F. X., VAN LANGENHOVE, H. Enhanced CO₂ fixation and biofuel production via microalgae: recent developments and future directions. *Trends in Biotechnology*, v. 28, p. 371-380, 2010.

LACAZ-RUIZ, R. Utilização de meios de cultura a base de solução de cinzas, efluente da indústria cítrica e meios de cultura alternativos formulados através de programa específico de computação para cultivo de *Spirulina platensis* (Norst.). Rio Claro. Tese (Doutorado em Microbiologia Aplicada) – Instituto de Biociências, Universidade Estadual Paulista. P. 133, 1996.

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

LASHINKY, A., SCHWARTZ, N. D. How to Beat the High Cost of Gasoline. *Fortune*, 2006. Disponível em: <money.cnn.com/magazines/fortune/fortune_archive/2006/02/8367959/index.-htm>. Acesso em: 14 de setembro de 2011.

LEE, R.E. *Phycology*. Cambridge University Press. 547pp, 2008.

LIMA, U. D.; BASSO, L. C.; AMORIM, H. V. Produção de etanol. In: LIMA, U. D. et al (Coord.). *Biotecnologia industrial: processos fermentativos e enzimáticos*. São Paulo: Edgard Blucher, v. 3. p. 1-43, 2001.

MARGARITES, A. C. F. Síntese de carboidratos por microalgas e produção de bioetanol. Tese de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos da Universidade Federal do Rio Grande. Rio Grande/RS, 2014.

MATA, T. M.; MARTINS, A. A.; CAETANO, N. S. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. *Renewable and sustainable energy reviews*. v. 14, n. 1, p. 217–232, 2010.

MILLÁN. V. Obtenção de açúcares fermentescíveis a partir de biomassa microalgal. Trabalho de diplomação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2016.

MIRANDA, J. R.; PASSARINHO, P. C.; GOUVEIA, L. Bioethanol production from *Scenedesmus obliquus* sugars: the influence of photobioreactors and culture conditions on biomass production. *Appl Microbiol Biotechnol*, v. 196, p. 555–564, 2012.

MOSIER, N.; WYMAN, C.; DALE, B.; ELANDER, R.; HOLTZAPPLE, Y. Y. L. M.; LADISCH, M. Features of promising technologies for pretreatment of lignocellulosic biomass. *Bioresour Technol*, v. 96, p. 673–686, 2005.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. BIOCMBUSTÍVEIS: produção e consumo seguem em alta no País. 2018. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Acesso em: 08 de novembro de 2018.

MUS, F.; DUBINI, A.; SEIBERT, M.; POSEWITZ, M. C.; GROSSMAN, A. R. Anaerobic Acclimation in *Chlamydomonas reinhardtii*: anoxic gene expression, hydrogenase induction, and metabolic pathways. *The Journal of Biological Chemistry*, v. 282, p. 25475-25486, 2007.

MUSSATTO, S. I., DRAGONE, G., GUIMARÃES, P. M. R., SILVA, J. P. A., CARNEIRO, L. M., ROBERTO, I. C., VICENTE, A., DOMINGUES, L., TEIXEIRA, J. A. Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. *Biotechnology Advances*, v. 28, p. 817-830, 2010.

NASTARI, P. M. The role of sugarcane in Brazil's history and economy. 1983. Ph.D. Dissertation, Iowa State University, Ames, 1983.

NGUYEN, M. T., CHOI, S. P., LEE, J., LEE, J. H., & SIM, S. J. Hydrothermal acid pretreatment of *Chlamydomonas reinhardtii* biomass for ethanol production. *Journal of microbiology and biotechnology*, v. 19, n.2, p. 161-166, 2009.

RAZEGHIFARD, R. Algal biofuels. *Photosynthesis Research*, v. 117, p. 207–219, 2013.

REVISTA GLOBO RURAL. Consumo de etanol evitou emissão de 32 milhões de t. de gás carbônico. 2018. Disponível em: <<https://revistagloborural.globo.com/Noticias/Agricultura/Cana/noticia/2018/08/consumo-de-etanol-evitou-emissao-de-32-milhoes-de-t-de-gas-carbonico.html>>. Acesso em: 28 setembro de 2018.

SÁNCHEZ, O. J., CARDONA, C. A. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. *Bioresource technology*, v. 99, p. 5270-5295, 2008.

SARKAR, N. et al. Bioethanol production from agricultural wastes: an overview. *Renewable Energy*, v. 37, n. 1, p. 19, 2012.

SCHENK, P. M.; THOMAS-HALL, S. R.; STEPHENS, E.; MARX, U. C.; MUSSGNU, J. H.; POSTEN, C.; KRUSE, O.; Hankamer, B. Second Generation Biofuels: High-Efficiency Microalgae for Biodiesel Production. *Bioenergy Research*, v.1, n.1, p.20-43, 2008.

SHIKIDA, P. F.; BACHA, C. J. Evolução da agroindústria canavieira brasileira de 1975 a 1995. *Revista Brasileira de Economia*, v. 53, n. 1, p. 69-90, mar. 1999.

SIRAJUNNISA, A. R.; SURENDHIRAN, D. Algae??? A quintessential and positive resource of bioethanol production: a comprehensive review. *Renewable and sustainable energy reviews*, v. 66, p. 248–267, 2016.

VASCONCELOS, J. N. Fermentação etanólica. In: SANTOS, F.; BORÉM, A.; CALDAS, C. (Ed.). *Cana-de-açúcar: bioenergia, açúcar e etanol*. 2. ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, v. 1. p. 451-487, 2012.