



Avaliação econômica de uma
biorrefinaria à base de microalgas para
produção de carotenoides e bioetanol

Alberto José Leandro Santos

Projeto Final em Engenharia Química

Orientadores

Suely Pereira Freitas, D.Sc.

Marcella Fernandes de Souza, B.Sc.

Março de 2017

AVALIAÇÃO ECONÔMICA DE UMA BIORREFINARIA À BASE DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE CAROTENOIDES E BIOETANOL

Alberto José Leandro Santos

Projeto Final em Engenharia Química submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Carlos Augusto Perlingeiro, D.Sc.

Raul Alves de Oliveira, D.Sc.

Mariana Mello Pereira da Silva, M.Sc.

Orientado por:

Suely Pereira Freitas, D.Sc.

Marcella Fernandes de Souza

Rio de Janeiro – RJ – Brasil
Março de 2017

Leandro Santos, Alberto José.

Avaliação econômica de uma biorrefinaria à base microalgas para produção de carotenoides e bioetanol/ Alberto José Leandro Santos. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2017.

x, 76 p.; lxvi.

(Projeto Final) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2017.

Orientadores: Suely Pereira Freitas, Marcella Fernandes de Souza.

1. Viabilidade econômica. 2. Microalgas. 3. Bioetanol. 4. carotenoides. (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Suely Pereira Freitas, Marcella Fernandes de Souza. I. Título - Avaliação econômica de uma biorrefinaria à base de microalgas para produção de carotenoides e bioetanol.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar aos meus pais, Márcia e José, por sempre estarem ao meu lado me dando apoio, sendo pacientes e companheiros.

Aos meus amigos, que sempre me apoiaram nas horas em que mais precisei e com os quais posso contar em quaisquer momentos.

Aos meus familiares, minha avó, tios e primos pelo companheirismo, apoio e confiança com os quais sempre pude contar.

À minha orientadora, Suely Freitas, pela presença, dedicação, confiança, orientação, paciência e por ter acreditado em meu trabalho desde o início.

À minha orientadora, Marcella Souza, por estar sempre presente quando precisei e pela dedicação que teve com meu trabalho.

A todos aqueles que de alguma forma me ajudaram a concluir este trabalho, meu muito obrigado.

Resumo do Projeto Final apresentado à Escola de Química como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Engenheiro Químico.

AValiação EconôMica de uma Biorrefinaria à Base de Microalgas para Produção de Carotenoides e Bioetanol

Alberto José Leandro Santos

Março, 2017

Orientadoras: Profa. Suely Pereira Freitas, D.Sc. e prof. Marcella Fernandes de Souza

Com base no interesse mundial em se produzir combustíveis a partir de fontes renováveis, foi proposto neste trabalho a avaliação econômica de uma biorrefinaria de microalgas para produção de bioetanol, carotenoides e biomassa seca. Para este fim, foi proposta uma unidade de cultivo com capacidade produtiva de 4.840 toneladas de biomassa por ano e com capacidade instalada de 11.000 m³. Fatores como orçamento de capital, custos operacionais, capital de giro, depreciação e receita foram calculados de forma a estimar a taxa interna de retorno (TIR), índice escolhido para pré-avaliação econômica da planta. Neste estudo, o sistema de cultivo de biomassa algal avaliado economicamente consistiu em fotobiorreatores tubulares expostos à luz solar, com uma produtividade volumétrica diária de biomassa de 1,5 kg/m³.dia e concentração de biomassa de 4,0 kg/m³. Avaliou-se inicialmente os custos de extração de carotenoides da biomassa, por se tratar de um produto de alto valor agregado. Para tal, considerou-se o uso do moinho de bolas para rompimento da parede celular das microalgas seguida da extração dos carotenoides por CO₂ supercrítico. A seguir, o estudo foi ampliado de forma a atender o conceito de biorrefinaria, e o uso da biomassa residual foi avaliado para a produção de bioetanol. Nesta etapa, foi prevista a aplicação de um processo de hidrólise enzimática, com reações de sacarificação e fermentação ocorrendo simultaneamente no mesmo tanque. Por fim, foi proposta a comercialização da biomassa residual para uso em alimentação animal ou humana devido ao seu alto conteúdo proteico. Nas condições selecionadas neste estudo, estimou-se uma TIR de 25%. Neste cenário, o investimento proposto depende fortemente da concentração de biomassa no meio de cultivo, do valor de venda dos carotenoides e da biomassa proteica para se tornar competitivo uma vez que o custo do bioetanol obtido é cerca de 3 vezes o valor praticado no mercado para o etanol de cana-de-açúcar.

Sumário

1. INTRODUÇÃO	11
1.1. Estrutura do trabalho	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. Objetivo Geral.....	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. A importância dos biocombustíveis para a sociedade	15
3.2. Microalgas como matéria-prima para a indústria	17
3.2.1. Ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs)	18
3.2.2. Carotenoides.....	19
3.2.2.1 Extração de carotenoides com CO ₂ Supercrítico (SFE).....	20
3.2.3. Proteínas	22
3.2.4. Bioetanol	23
3.3. O conceito de biorrefinaria e sua relação com as microalgas.....	24
3.4. Sistemas de cultivo de biomassa de microalgas	25
3.4.1. Raceway ponds	25
3.4.2. Fotobiorreatores	26
3.4.3. Comparação entre fotobiorreatores e Raceway Ponds	27
3.5. Produção de bioetanol de terceira geração	28
3.5.1. Pré-tratamento com Moinho de bolas	28
3.5.2. Hidrólise enzimática	29
3.5.3. Fermentação alcoólica.....	29
3.5.4. Comparação entre métodos SHF e SSF	30
3.6. Análise Econômica	31
3.6.1. Orçamento capital	31
<u>3.6.1.1. Investimento fixo</u>	32
<u>3.6.1.2. Custos de partida da planta</u>	32
<u>3.6.1.3. Capital de Giro</u>	32
3.6.2. Custos Operacionais	32
3.6.3. Receita.....	33
<u>3.6.4. Taxa Interna de Retorno (TIR)</u>	33
<u>3.7. Análise de sensibilidade</u>	33
4. METODOLOGIA	35
4.1. Microalga selecionada e composição da biomassa	35

4.2. Análise de cenário, fluxograma e linha do tempo.....	35
4.3. Balanço de massa.....	39
4.4. Detalhamento dos equipamentos.....	42
4.5. Dimensionamento dos equipamentos.....	43
4.6. Considerações para cálculo de custos operacionais.....	47
5. RESULTADOS.....	52
5.1. Orçamento capital.....	52
5.2. Custos com Meio de Cultivo.....	53
5.3. Custos com Utilidades.....	54
5.4. Custos com mão-de-obra.....	54
5.5. Depreciação.....	55
5.6. Capital de Giro.....	55
5.7. Custos de produção de biomassa seca, carotenoides e bioetanol.....	55
5.8. Análise da Taxa Interna de Retorno (TIR) para a planta produtora de biomassa seca, carotenoides e bioetanol.....	56
6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	60
6.1. Capacidade volumétrica instalada.....	61
6.2. Concentração de biomassa.....	63
6.3. Preço de venda de biomassa seca.....	64
6.4. Preço de venda de carotenoides.....	65
6.5. Custos de produção de biomassa seca e carotenoides em diversos cenários.....	65
6.6. Estimativa de capacidade volumétrica instalada mínima para uma planta economicamente viável.....	67
7. CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	73

Lista de figuras e tabelas

Figuras

Figura 1. Variação do preço do petróleo entre 1970 e 2014.....	15
Figura 2. Consumo mundial de energia entre 1990 e 2040 (projeção).....	16
Figura 3. Mercado mundial dos principais tipos de carotenoides em 2015.....	19
Figura 4. Fluxograma de sistema SFE de extração por CO ₂ supercrítico da companhia JASCO Brasil	21
Figura 5. Projeção do mercado mundial de ingredientes à base de proteína.....	22
Figura 6. Mercado mundial de bioetanol entre 2007 e 2015	24
Figura 7. Lagoas abertas <i>racewayponds</i> para cultivo de biomassa de microalgas	26
Figura 8. Sistema de fotobiorreatores tubulares para cultivo de biomassa de microalgas.....	27
Figura 9. Moinho de bolas industrial.....	29
Figura 10. Fluxograma do processo integrado.....	37
Figura 11. Linha do tempo do processo de produção de bioetanol a partir de microalgas.....	38
Figura 12. Balanço de massa de utilidades no fluxograma do processo.....	41
Figura 13. Preços de venda de carotenoides x preços de venda da biomassa seca para TIR igual a 20%	57
Figura 14. Preços de venda de carotenoides x preços de venda de biomassa seca para TIR igual a 30%	57
Figura 15. Ponto de nivelamento da planta.....	58
Figura 16. Capacidades instaladas da planta, em número de fotobiorreatores, para produção anual superior a 2.000 toneladas de biomassa pronta para venda.....	68

Tabelas

Tabela 1. Concentração de proteínas, carboidratos e lipídios nas principais espécies de microalgas	17
Tabela 2. Comparação da eficiência fotossintética e produtividade de biomassa por área entre microalgas e culturas vegetais terrestres	18
Tabela 3. Rendimento de extração de carotenoides em sistemas SFE de diferentes espécies de microalgas para tempo de extração de 180 minutos	21
Tabela 4. Comparação da produtividade de etanol de terceira geração em diferentes métodos de hidrólise	31
Tabela 5. Parâmetros da etapa de cultivo de biomassa	36
Tabela 6. Etapas que ocorrem a cada dia de operação.....	39
Tabela 7. Preço base de equipamentos	42
Tabela 8. Balanço de massa e volume dos parâmetros biomassa, água e bioetanol para produção de 44.000 quilos de biomassa por cultivo	44
Tabela 9. Linha do tempo com ciclo de cada processo, desde a etapa de cultivo até etapa de destilação	45
Tabela 10. Comparação entre capacidades Q _{bi} e Q _{ide} equipamentos para cálculo de economia de escala e seus respectivos fatores de escala	46
Tabela 11. Macronutrientes e composição do meio modificado por Souza (2016), usados como base para custos com matérias-primas estimados neste trabalho.....	47
Tabela 12. Utilidades empregadas na planta e consumo energético.....	48
Tabela 13. Custos-base com mão-de-obra	50
Tabela 14. Orçamento capital da planta.....	51
Tabela 15. Custos com matéria-prima e insumos	52
Tabela 16. Custos com utilidades	53
Tabela 17. Custos com mão-de-obra	53
Tabela 18. Custos de produção por quilo de biomassa seca, carotenoides e bioetanol	54
Tabela 19. Análise da Taxa Interna de Retorno (TIR) para planta produtora de biomassa seca, carotenoides e bioetanol.....	55
Tabela 20. Variação da TIR de acordo com o número de fotobiorreatores usados	61
Tabela 21. Orçamento capital de plantas com variados números de fotobiorreatores de janela de 110 litros cada.....	62

Tabela 22. Capacidade instalada da planta medida em toneladas de biomassa seca por ano, de acordo com produtividade de biomassa adotada, além da TIR	63
Tabela 23. TIR para diferentes preços de venda de biomassa seca	63
Tabela 24. TIR para diferentes preços de venda dos carotenoides	64
Tabela 25. Custos de produção por quilo de biomassa seca para uma planta com capacidade instalada de 11.000.000 litros/dia na etapa de cultivo	65
Tabela 26. Custos de produção por quilo de carotenoides em função da concentração na biomassa seca e com base na produtividade volumétrica diária de biomassa, em uma planta com capacidade de 11.000.000 litros/dia	66

1. INTRODUÇÃO

Há aproximadamente 700 milhões de anos, iniciou-se uma das maiores transformações químicas da história da Terra. Uma atmosfera com uma concentração igual a 7000 partes por milhão de CO₂ e completamente anaeróbica começava, lentamente, a sua transformação que deu início à Explosão Cambriana, o início da proliferação da vida como a conhecemos hoje. A concentração atual de CO₂, correspondente a 400 partes por milhão, evidencia a magnitude da mudança sofrida pela atmosfera terrestre (Budzianowski, 2016). Curiosamente, os responsáveis por essa surpreendente transformação foram microscópicos seres, já presentes nos oceanos recém-formados da Terra naquela época. Entre estes seres estavam as microalgas, seres unicelulares, autotróficos e minúsculos que, desde os tempos mais primórdios, convertiam CO₂ em oxigênio através da absorção da luz solar, no processo chamado de fotossíntese.

Com a multiplicação das microalgas e outros seres fotossintetizantes, a concentração de CO₂ diminuiu enquanto que a de oxigênio cresceu substancialmente, sendo uma das responsáveis assim pela vida na Terra como a conhecemos hoje (Budzianowski, 2016). Este fato histórico mostra o potencial que as microalgas têm de sintetizar produtos em larga escala. Na atualidade, diversos estudos tomam como base essa característica para avaliar a viabilidade econômica de um desafio ligeiramente mais modesto para as microalgas, mas nem um pouco simples: a produção de biocombustíveis.

A principal vantagem da produção de biocombustíveis a partir de microalgas reside na maior eficiência fotossintética destas com relação às culturas vegetais terrestres, apresentando assim uma maior produtividade por área (Arceo, 2010). Em segundo lugar, as plantas de biocombustíveis à base de microalgas não têm necessidade de competir por terras agricultáveis com produtos voltados à alimentação, ao contrário de plantas de biocombustíveis derivados de culturas agrícolas, como cana-de-açúcar e milho (Giselrod e Patil, 2008).

O sucesso da produção de biocombustíveis das microalgas depende em grande parte das condições de cultivo usadas. Fatores como intensidade luminosa, pH, comprimento de onda, temperatura, concentração de CO₂, condições de mistura, concentração de nutrientes e contaminação influenciam diretamente na produtividade de biomassa, e devem ser controlados com rigor (Magro et al, 2016). Os processos

atuais de cultivo de biomassa algal são conduzidos em sistemas abertos, nas lagoas chamadas *racewayponds*, ou em sistemas fechados, nos fotobiorreatores.

Outro fator determinante no sucesso da planta de produção de biocombustíveis de microalgas está na diversificação da planta, com a produção de coprodutos de valor agregado e redução de custos, usando-se um conceito de biorrefinaria. A biomassa das microalgas é rica em compostos de alto valor agregado para o mercado, como ácidos ômega-3, proteínas e carotenoides. A receita gerada da venda destes produtos eleva as chances da planta ser viável economicamente (Cherubini, 2010). Além disso, a planta de microalgas pode formar parcerias com plantas de outras culturas vegetais, utilizando subprodutos que seriam descartados, como água e CO₂ (Holanda e Ramos, 2011).

Neste contexto, o pré-estudo de avaliação econômica será usada neste trabalho como uma ferramenta de analisar a viabilidade financeira desta biorrefinaria, identificando os parâmetros que mais influenciam na produtividade e arrecadação da planta, estabelecendo a partir deste conceito cenários com as maiores produtividades possíveis, para tornar a planta viável economicamente.

1.1. Estrutura do trabalho

O trabalho encontra-se organizado em 7 capítulos, apresentados a seguir.

O capítulo 1 consiste na introdução, na qual o objetivo geral do estudo e as justificativas para a elaboração de uma planta produtora de bioetanol de microalgas são apresentados.

O capítulo 2 consiste na apresentação dos objetivos geral e específicos do trabalho.

No capítulo 3 apresenta-se uma revisão bibliográfica de todos os conhecimentos envolvidos neste trabalho, como a composição das microalgas, produtos de valor agregado extraídos das microalgas, biorrefinarias, métodos de cultivo de microalgas, métodos de extração de produtos da biomassa algal, métodos de produção de bioetanol, os métodos de análise econômica e análise de sensibilidade.

No capítulo 4 descreve-se a metodologia usada no trabalho, incluindo a escolhados cenários, a escolha e o dimensionamento dos equipamentos, a metodologia para estimar a quantidade de insumos e utilidades necessárias para cada cenário e as considerações usadas para estimar custos com mão-de-obra.

O capítulo 5 consiste na apresentação e discussão dos resultados de viabilidade econômica obtidos para a planta produtora de biomassa seca, carotenoides e bioetanol.

O capítulo 6 apresenta a Análise de Sensibilidade, identificando quais são os parâmetros que mais influenciam no resultado final do processo. Além disso, aponta o impacto previsto que a variação destes parâmetros traria ao resultado da planta estudada. Por fim, apresenta-se uma análise de sensibilidade paramétrica para estimar o impacto de dois fatores críticos: biomassa algal com diferentes composições ou biorrefinarias com produtividades distintas.

O capítulo 7 apresenta a conclusão do trabalho, com uma análise dos resultados obtidos, evidenciando os principais obstáculos ao processo e indicando aspectos que poderiam ser explorados para tornar o processo de produção de bioetanol mais atrativo.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo foi analisar a viabilidade econômica de uma biorrefinaria de microalgas para produção de biomassa seca, carotenoides e bioetanol, identificando os principais obstáculos do processo e procurando possíveis soluções para diminuição dos custos.

2.2. Objetivos específicos

- Definir a capacidade e produtividade da biorrefinaria, com base em dados da literatura;
- Calcular o Investimento total com base nos preços praticados no mercado nacional;
- Estimar os custos de produção com consumo de matéria-prima, utilidades e mão de obra;
- Estimar custo unitário dos produtos finais, receitas e o fluxo de caixa anual;
- Calcular a taxa interna de retorno (TIR) do processo integrado;
- Realizar uma análise de sensibilidade paramétrica.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. A importância dos biocombustíveis para a sociedade

Apesar de os combustíveis fósseis serem responsáveis por 87% da energia primária consumida no mundo (World Economic Forum, 2013), o uso majoritário destes não pode ser garantido até o final deste século.

No último século, ocorreram significativas flutuações no preço do barril de petróleo, em virtude de fatores políticos e econômicos (Figura 1). Estas oscilações se acentuaram na década de 1970, quando o preço do barril cresceu de US\$ 20 para US\$ 110 em menos de 10 anos, e, no ano de 2008, quando o preço do barril caiu de US\$ 140 para US\$ 40 em menos de seis meses. A série histórica do preço do barril dificulta o planejamento das empresas produtoras de combustíveis fósseis.



Figura 1. Variação do preço do barril de petróleo entre 1862 e 2014 (Brown, 2017).

Desse modo, o mundo e, em particular, os países altamente dependentes de petróleo no crescimento da economia precisam investir em novas alternativas para evitar crises econômicas e políticas influenciadas pela volatilidade do preço do barril.

Outro aspecto importante é o aumento da demanda energética no mundo. De acordo com o *International Energy Outlook 2016* (IEO2016), a demanda mundial de energia vai crescer consideravelmente até 2040. Segundo o órgão, a demanda, que era de $5,49 \times 10^{14}$ kJ em 2012, aumentará para $6,29 \times 10^{14}$ kJ em 2020 e para $8,15 \times 10^{14}$ kJ em 2040 (Figura 2).

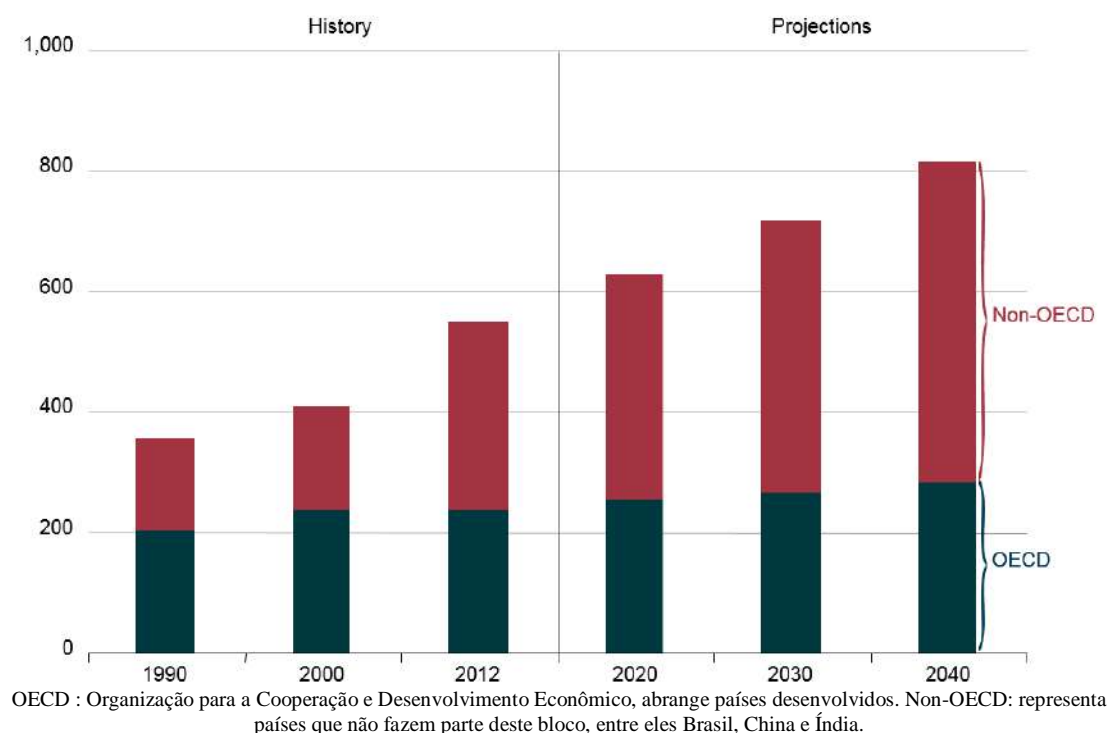


Figura 2. Consumo mundial de energia entre 1990 e 2040
(Fonte: <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/world.cfm>).

A incerteza sobre a oferta dos combustíveis fósseis no futuro é também uma ameaça para uma sociedade dependente fortemente do petróleo e seus derivados. Por mais que os combustíveis fósseis como carvão e petróleo estejam na matriz energética atual, estima-se que as reservas de carvão e petróleo vão se extinguir nos próximos 40 a 60 anos (Vasudevan e Fu, 2010). A tendência é que, neste cenário, a oferta diminua e a demanda cresça, o que faria o preço do petróleo aumentar significativamente ao longo dos anos. Com base em dados históricos, quando o preço do barril de petróleo atinge valores elevados, crises econômicas e políticas podem eclodir em diversos países. Logo, combustíveis alternativos e, de preferência, renováveis precisam ser desenvolvidos e testados em larga escala.

Por fim, os combustíveis fósseis contribuem para a poluição atmosférica e para o aquecimento global, devido à liberação de excesso de CO_2 nos processos de

combustão. Segundo a *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA), o ano de 2016 foi o ano mais quente já registrado da história, com uma temperatura média de 14,94 °C, cerca de 1°C superior à média do período entre 1961 e 1990 (14 °C). Os efeitos do aquecimento podem, segundo cientistas de todo o mundo, causar danos à agricultura e ao desenvolvimento da sociedade no futuro.

3.2. Microalgas como matéria-prima para a indústria

As microalgas são microrganismos unicelulares e fotoautotróficos capazes de sintetizar matéria orgânica a partir de água, luz solar e CO₂, sendo encontradas nos mares, oceanos e também em água doce (Arregondo-Veja, 1995). Existem aproximadamente 50.000 espécies de microalgas devido à presença destes microrganismos em praticamente todos os ecossistemas aquáticos do planeta (Richmond, 2004). A biomassa produzida pelas microalgas chamou a atenção de pesquisadores e cientistas devido à sua rica composição, formada por polissacarídeos, lipídios e proteínas (Magro et al, 2016). Estes compostos podem ser de grande valia para a sociedade, já que possuem um alto valor energético, nutricional e, conseqüentemente, comercial. Na tabela 1 são exibidas as concentrações médias de proteínas, carboidratos e lipídios presentes nas principais espécies de microalgas.

Tabela 1. Concentrações de proteínas, carboidratos e lipídios das principais espécies de microalgas

Espécies	Proteínas (%)	Carboidratos (%)	Lipídios (%)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10 - 17	12 - 14
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	47	-	2
<i>Scenedesmus dimorphus</i>	8 - 18	21-52	16 - 40
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12 - 17	14-22
<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	57	26	2
<i>Chlorella sorokiniana</i>	24-51	10-35	23-31
<i>Spirogyra sp.</i>	6 - 20	33-64	11 - 21
<i>Dunaliella bioculata</i>	49	4	8
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Euglena gracilis</i>	39-61	14-18	14-20
<i>Prymnesium parvum</i>	28-45	25-33	22-38
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9 - 14
<i>Spirulina platensis</i>	46-63	8 - 14	4 - 9
<i>Spirulina maxima</i>	60-71	13-16	6 - 7
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4 - 7

Fonte: Espinosa, 2015; Souza, 2016

Uma das principais justificativas para o cultivo de microalgas visando a produção de biocombustíveis está na maior eficiência fotossintética que estas têm com relação aos vegetais terrestres, ou seja, as microalgas têm uma produtividade de biomassa seca por área muito superior às principais culturas agrícolas (Haag, 2007). Na tabela 2 ilustra-se essa diferença.

Tabela 2. Eficiência fotossintética e produtividade de biomassa das microalgas e outras culturas vegetais.

	Produtividade de biomassa (ton/ha.ano)	Eficiência fotossintética
Ecosistema terrestre	6	0,15
Ecosistema aquático	3	0,07
Florestas	10 a 40	0,25 a 1,00
Culturas agrícolas	20	0,50
Milho (grão)	15	0,40
Milho (planta)	50	1,20
Cana de açúcar	60	1,50
Microalgas	Superior a 100	Superior a 2,50

Fonte: (Arceo, 2012)

As microalgas são produtoras de compostos utilizados como suplemento alimentar, como os ácidos graxos poli-insaturados e aminoácidos essenciais. Elas também sintetizam carotenoides, que são pigmentos de grande interesse comercial no setor de produtos naturais. As proteínas extraídas da biomassa podem ser comercializadas para a aquicultura e como suplemento alimentar humano (Brennan, e Owende, 2010). Finalmente, as microalgas são fonte de bioenergia também, podendo ser utilizadas como matéria-prima para fabricação de biodiesel, biogás e bioetanol.

3.2.1. Ácidos graxos poli-insaturados (PUFAs)

A maior parte dos ácidos graxos poli-insaturados encontrados nas microalgas têm uma cadeia longa, superior a 18 carbonos por molécula, e fazem parte das séries ômega-3 e ômega-6, sendo muito utilizados nas indústrias alimentar e farmacêutica (Simopoulos, 2002).

De acordo com o *Allied Market Research*, estima-se que o mercado mundial de ômega-3 movimentará 6,9 bilhões de dólares em 2022. O aumento da demanda e uma maior conscientização por parte da população mundial da importância de se consumir alimentos saudáveis e dos efeitos benéficos do ômega-3 foram os principais motivos para a projeção ser realizada.

3.2.2. Carotenoides

Carotenoides são pigmentos presentes nas microalgas que protegem a clorofila do excesso de luz e também atuam como pigmentos fotossintéticos secundários. O principal motivo para o uso de carotenoides na sociedade reside na capacidade destes de prevenir doenças degenerativas, estimulando o sistema imunológico, atuando contra o câncer e combatendo radicais livres (Orosa et al., 1997). Em comparação com os corantes sintéticos, os carotenoides têm maior resistência ao calor, à presença de ácido sulfúrico, ao congelamento e são eficientes mesmo se aplicados nos alimentos em baixas concentrações (Skulberg, 2004).

De acordo com o *BCC Research*, o mercado global de carotenoides movimentou aproximadamente US\$ 1,5 bilhões em 2014, e espera-se que este mercado movimente US\$ 1,8 bilhões em 2019. Já outra pesquisa, do *MarketsandMarkets*, afirma que o mercado de carotenoides movimentou US\$ 1,24 bilhões em 2016, e estima que este mercado movimente US\$ 1,53 bilhões em 2021. Na figura 3, o gráfico indica o mercado mundial de cada tipo de carotenoides, sendo que betacaroteno e astaxantina sempre são os que apresentam maior demanda.

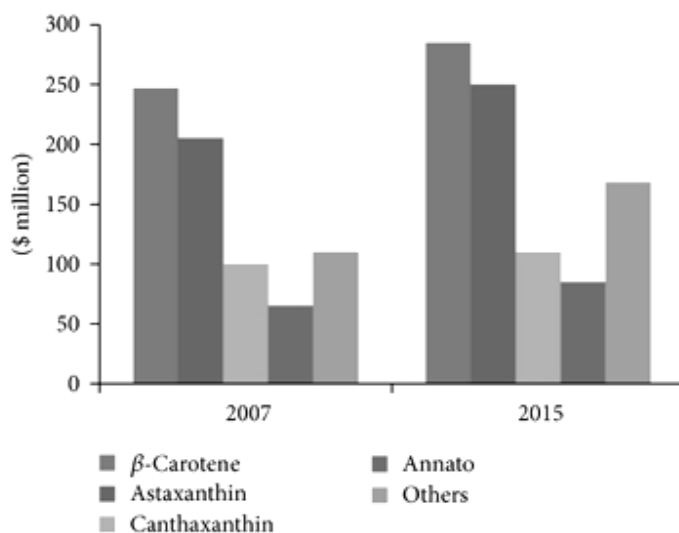


Figura 3. Mercado mundial dos principais tipos de carotenoides, em milhões de dólares. Os principais tipos de carotenoides explicitados no gráfico acima são: Betacaroteno, astaxantina, cantaxantina e anato.

Fonte: <https://www.hindawi.com/journals/ab/2014/837891/fig2/>

3.2.2.1 *Extração de carotenoides com CO₂ Supercrítico (SFE)*

A extração de compostos com potencial bioativa a partir de microalgas usando fluido supercrítico, ou sistema SFE, é uma tecnologia que vem sendo avaliada nos últimos anos e tem como uma das principais vantagens um baixo impacto ambiental, por usar apenas CO₂ e etanol como solventes, eliminando o uso de solventes com alta toxicidade e prejudiciais à saúde humana (Macías-Sanchez et al., 2008). Além disso, a conversão do CO₂ em um estado supercrítico, híbrido entre estados líquido e gasoso, amplia a capacidade de difusão do solvente na matriz aumentando o rendimento de extração dos solutos comparados aos solventes utilizados no método convencional (Maul et al., 1996). Além disso, os solventes empregados são gasosos nas condições ambientes, sendo facilmente dissociados dos extratos após o processo de extração. O CO₂ supercrítico é inerte, não cria reações secundárias ou indesejáveis. E por fim, a temperatura crítica (T_c=31,1 °C) e a pressão crítica (P_c = 73,8 bar) são relativamente baixas, sendo fáceis de atingir na indústria e são plenamente suportáveis para os compostos orgânicos manipulados (Maul et al., 1996).

O processo de extração baseia-se na injeção de CO₂ supercrítico a uma taxa constante no extrator, de forma a remover continuamente os extratos disponíveis na biomassa. A passagem do solvente através da matriz sólida remove a maior parte dos componentes solúveis em CO₂ supercrítico presentes na biomassa, como óleos essenciais. No caso da fração lipídica, pouco solúvel em CO₂ supercrítico, faz-se necessário a introdução de um co-solvente, em geral etanol, que se misturado ao CO₂ permite a extração destes compostos e, como consequência dos carotenoides presentes. No separador, o dióxido de carbono volta naturalmente à forma gasosa, sendo encaminhado para uma corrente de reciclo, e se dissocia por completo dos componentes extraídos. A figura 4 mostra um fluxograma simplificado de um sistema SFE desenvolvido pela empresa JASCO Brasil, com todos seus equipamentos.

O rendimento do processo depende basicamente da pressão, temperatura e tempo de residência. A temperatura deve ser superior à temperatura crítica, variando comumente entre 40 e 60 graus Celsius. Já os valores de pressão escolhidos estão na faixa entre 200 e 500 bar. O tempo de extração mais apropriado para remoção de carotenoides de microalgas corresponde a 180 minutos, segundo estudo de Macías-Sanchez et al. (2008).

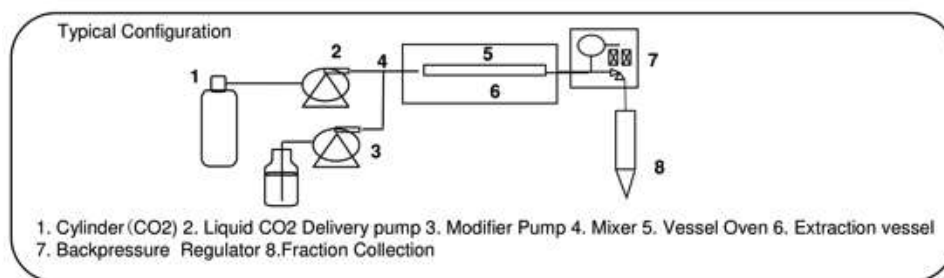


Figura 4. Fluxograma com equipamentos do sistema SFE-400 fornecido pela JASCO Brasil

Os rendimentos finais de extração de carotenoides obtidos pelos autores, a partir de três espécies diferentes de microalgas estão apresentadas na tabela 3. Nas condições que proporcionaram os melhores resultados (400 bar e 60 °C), os rendimentos variaram entre 0,852 e 9,623 ug carotenoides/mg de biomassa seca, dentre as três espécies de microalgas.

Tabela 3. Rendimentos de obtenção de carotenoides para um tempo de extração de 180 minutos

Pressão (bar)	Temperatura (C)	N.gaditana		Synechococcus sp.		D.salina	
		ug	carotenoides/mg biomassa seca	ug	carotenoides/mg biomassa seca	ug	carotenoides/mg biomassa seca
200	40	0,845		0,366		2,447	
	50	0,997		0,295		0,539	
	60	0,703		0,397		1,353	
300	40	1		0,459		1,583	
	50	2,1		1,86		4,536	
	60	2,341		0,553		5,79	
400	40	0,53		0,511		1,057	
	50	2,25		0,557		1,709	
	60	2,768		0,852		9,629	
500	40	1,385		0,414		2,281	
	50	2,405		0,668		4,093	
	60	2,893		0,485		3,88	

Fonte: Macias-Sanchez et al. (2008).

Com preço de mercado próximo ou superior a US\$ 3.000 por quilo, os carotenoides são os compostos mais valiosos presentes na biomassa algal e podem gerar um grande retorno financeiro para as unidades produtoras.

3.2.3. Proteínas

As proteínas, presentes na biomassa algal, têm uma importância vital nas alimentações humana e animal e podem ser usadas como suplementos alimentares, na aquicultura, na agricultura e muitas outras áreas (Brennan e Owende, 2010). De acordo com um estudo do *Global Market Insights*, o mercado de ingredientes à base de proteínas movimentou cerca de 22 bilhões de dólares em 2015. Estima-se que o mercado global de ingredientes alimentares à base de proteínas movimentará cerca de 43 bilhões de dólares em 2024, de acordo com a mesma pesquisa, conforme pode ser visto na Figura 5.

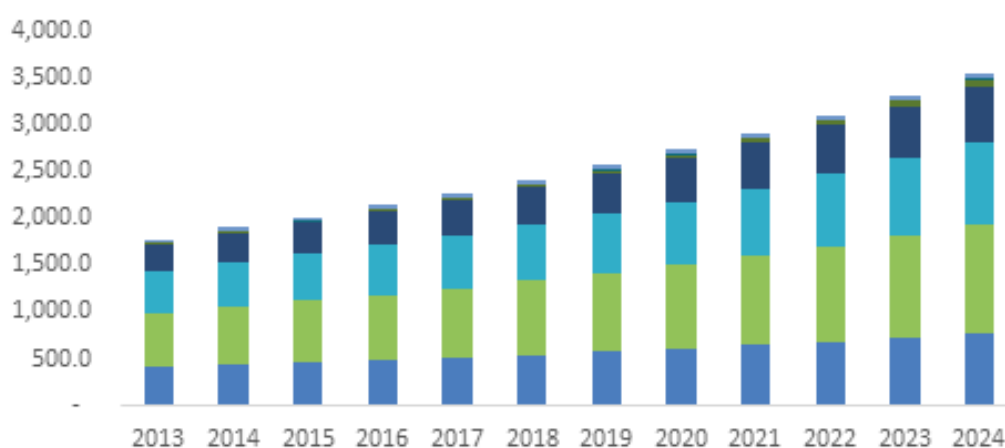


Figura 5. Projeção do mercado europeu de ingredientes à base de proteínas até 2024, em milhões de dólares, totalizando uma demanda aproximada de 3,5 bilhões de dólares neste ano

Fonte: <https://www.gminsights.com/industry-analysis/protein-ingredient-market>.

3.2.4. Bioetanol

O bioetanol é um combustível de origem vegetal comumente gerado a partir da fermentação de açúcares simples, sendo uma fonte de energia alternativa e renovável (Magro et al., 2016). O bioetanol pode ser classificado como sendo de primeira, segunda ou terceira gerações. O bioetanol de primeira geração é derivado de açúcares (cana-de-açúcar) ou amido (milho). Seu processo de produção consiste na fermentação de açúcares extraídos das culturas vegetais cultivadas (Amorim et al., 2011). O bioetanol de segunda geração é gerado pelo processamento da biomassa lignocelulósica de plantas, como bagaço de cana-de-açúcar, que precisa passar por uma etapa de pré-tratamento antes da fermentação (Sivaliya et al., 2013). Para produzir o bioetanol de primeira e segunda gerações, necessita-se de áreas agricultáveis para o cultivo da matéria-prima (Giselrod e Patil, 2008).

O bioetanol de terceira geração é produzido a partir da biomassa de microrganismos, principalmente microalgas. Através da sacarificação dos carboidratos da biomassa algal e posterior fermentação, consegue-se produzir o etanol. A vantagem deste bioetanol de terceira geração com relação aos outros dois é que as microalgas têm uma eficiência fotossintética muito superior às culturas vegetais terrestres, tendo assim uma maior produtividade de biomassa por área. Além disso, a produção pode ser realizada em terras não-agrícolas, reduzindo assim a competição por terreno com produtos agrícolas voltados à alimentação (Arceo, 2012).

Hoje em dia, o mercado mundial de biocombustíveis movimenta cerca de 168 bilhões de dólares (*BiofuelsInternational Magazine*, 2016). Este estudo projetou um crescimento deste mercado, estimando uma movimentação de aproximadamente 247 bilhões de dólares em 2024. Uma das principais razões para esta demanda crescente residiria no fato que os biocombustíveis podem ter aplicações variadas, como fonte de eletricidade, aquecimento e usos em transportes (*BiofuelsInternational Magazine*, 2016).

Considerando-se apenas o etanol, a Figura 6 detalha a produção mundial deste combustível, por país, no período entre 2007 e 2015. Os Estados Unidos são líderes em produção de etanol, tendo uma produção de 56 bilhões de litros do combustível em 2015, seguidos pelo Brasil, que no mesmo ano produziu quase 27 bilhões de litros de etanol. Em 2015, a produção mundial de etanol aproximou-se de 100 bilhões de litros.

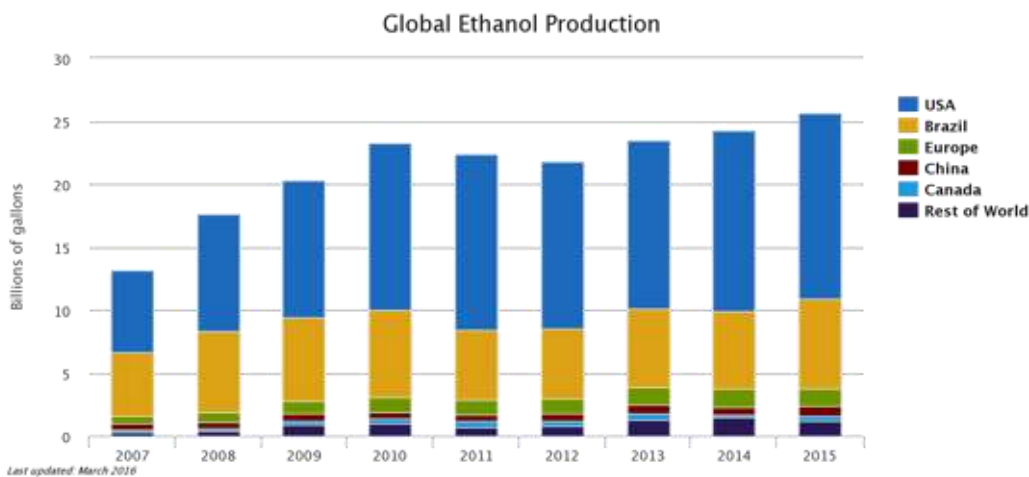


Figura 6. Produção anual mundial de etanol, de 2007 a 2015, por país

Fonte: www.afdc.energy.gov/data

3.3. O conceito de biorrefinaria e sua relação com as microalgas

Segundo Cherubini(2010) biorrefinaria é formada por instalações produtivas que geram e processam matérias-primas de origem vegetal e renovável, funcionando de forma completamente integrada, utilizando-se de processos biológicos e físico-químicos para converter estas matérias-primas em coprodutos de valor agregado que atendam às necessidades atuais de consumo com o menor impacto ambiental possível.

Este conceito é perfeitamente aplicável às microalgas, já que elas produzem compostos de grande utilidade à sociedade a partir de processos biológicos envolvendo sua matéria-prima renovável, a própria biomassa algal, podendo ser usadas na produção de biocombustíveis, ácidos graxos, pigmentos e farinhas proteicas. Além disso, elas podem também fornecer utilidades para as próprias plantas produtoras de biomassa algal ou para outras plantas geradoras de diversos produtos, já que as microalgas são capazes de consumir CO₂, diminuindo assim custos das plantas com consumo desta utilidade, e podem produzir eletricidade, através de processos de queima de biomassa (Holanda e Ramos, 2011).

A integração de uma planta de produção de biomassa algal com uma usina de cana-de-açúcar seria um exemplo de biorrefinaria que beneficiaria ambas as plantas (Holanda e Ramos, 2011). A planta de cana-de-açúcar e de bioetanol envolve processos de fermentação e uma conseqüente emissão de CO₂ em quantidades significativas. Este CO₂ seria tratado como uma utilidade na planta produtora de biomassa algal, reduzindo assim as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera e diminuindo os custos da planta de microalgas com consumo de insumos. Para cada

1.000 litros de bioetanol gerados na planta de cana-de-açúcar, 800 quilos de dióxido de carbono são emitidos. Se for aproveitada na planta de microalga, esta quantidade de CO₂ produziria 470 quilos de biomassa algal segundo dados reportados por Holanda e Ramos (2011).

3.4. Sistemas de cultivo de biomassa de microalgas

Há dois tipos de configurações para cultivo de biomassa de microalgas: sistemas abertos (*racewayponds*) e sistemas fechados (fotobiorreatores).

3.4.1. Racewayponds

Os *racewayponds* são formados por grandes lagoas aeradas, constituídos em sua maioria por canais independentes de recirculação, com uma profundidade média de 20 a 30 cm e área ocupada variando entre 0,50 ha e 200 ha em cultivos extensivos (Antunes e Silva, 2010). Apesar de ter menor custo que os fotobiorreatores, este sistema tem uma produtividade muito abaixo dos sistemas fechados, devido à dificuldade de se controlar e isolar um sistema aberto de fatores ambientes, como variações sazonais de temperatura e irradiação solar e a presença de microrganismos contaminantes (Oilgae, 2012). Para cultivos muito longos, a contaminação é praticamente inevitável, não sendo recomendado para produção de compostos puros, como exigidos pelas indústrias alimentícia, de cosméticos e farmacêutica. Além disso, o aumento da concentração de biomassa junto à superfície da lagoa dificulta a entrada da luz solar para maiores profundidades, deixando muitas regiões escuras e diminuindo assim a produtividade de biomassa (Arceo, 2010).

As principais vantagens deste sistema aberto estão nos custos de instalação, significativamente inferiores comparado aos custos de fotobiorreatores, e o menor consumo energético, quando comparado ao sistema fechado (Oilgae, 2012). A figura 7 mostra uma lagoa aberta *racewaypond* em operação.



Figura 7. Sistema de lagoas abertas para produção de biomassa algal

Fonte: <http://algaebiomass.org/wp-content/gallery/2012-algae-biomass-summit/2010/06/Berberoglu-Murphy1.pdf>.

3.4.2. Fotobiorreatores

Os fotobiorreatores são sistemas fechados e suas principais configurações são em painéis planos ou em uma série de tubos, espirais ou serpentinadas. Os fotobiorreatores tubulares são feitos com materiais que permitem a passagem de luz como tubos de vidro, plástico ou policarbonato. Os tubos têm um diâmetro aproximado de 0,10 metros para garantir a total penetração da luz, e é por eles que a solução com microalgas e nutrientes como água, CO₂ e outros insumos flui continuamente (Borges, 2010).

A grande vantagem dos fotobiorreatores é o controle das condições de cultivo, como temperatura, iluminação, concentração de nutrientes, pH e níveis de CO₂ e O₂ (Borges, 2010). Por ser controlado e isolado do meio ambiente, a contaminação do meio de cultura por outros microrganismos é rara, o que confere segurança ao processo (Arceo, 2010). A segurança deste processo é um grande incentivo para investidores, apesar dos custos elevados com instalação dos fotobiorreatores e com consumo de energia elétrica (Figura 8).



Figura 8. Planta de fotobiorreatores tubulares
Fonte: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25767679>

Os fotobiorreatores tubulares têm um consumo energético elevado, entre 2000 e 3400 W/m³segundo dados estimados por Sierra et al. (2008), sendo compostos por bombas para manter o fluido em movimento e evitar sedimentação da biomassa, injetores de ar comprimido e outros instrumentos de controle. Uma preocupação envolvendo os fotobiorreatores tubulares expostos à luz solar natural está na sazonalidade desta radiação solar, que varia ao longo do ano, principalmente em regiões localizadas na zona temperada e altas latitudes. No caso do Brasil, o país ocupa uma das regiões no planeta que mais recebem radiação solar ao longo do ano, o que aumenta o potencial desta tecnologia.

3.4.3. Comparação entre fotobiorreatores e *RacewayPonds*

Conforme já mencionado, os fotobiorreatores têm uma produtividade de biomassa de microalgas muito superior às lagoas abertas *RacewayPonds*. Tomando como base uma produção de 100 toneladas de biomassa para cada sistema, e um consumo equivalente de CO₂ para ambos, concluiu-se que a produtividade volumétrica dos fotobiorreatores (1,535 kg/m³.dia) é 13 vezes maior que a de lagoas *RacewayPonds*(Chisti, 2007). Ainda segundo este autor, outra vantagem dos fotobiorreatores é que eles requerem uma área 30% menor que as lagoas abertas. Os fotobiorreatores também consomem muito menos energia na etapa de separação da biomassa, por ser esta 30 vezes mais concentrada que nos tanques de lagoas abertas (Molina Grima et al., 2003).

O custo estimado de produção de biomassa algal reportado por Chisti (2007), considerando uma planta de capacidade instalada de 100 toneladas e produtividade de

1,54 g/L.dia para fotobiorreatores e 0,12 g/L.dia para lagoas abertas, é de respectivamente, US\$ 2,95/kg e de US\$ 3,80/kg. Estes valores não consideram os custos com consumo de CO₂. Segundo outro autor, Alibi et al. (2009), o custo de produção de biomassa seca em fotobiorreatores é cerca de US\$ 7/kg.

3.5. Produção de bioetanol de terceira geração

O processo de produção de bioetanol de microalgas é similar ao realizado a partir de materiais lignocelulósicos. Os açúcares das microalgas estão também armazenados na forma de polissacarídeos e protegidos por uma parede celular rígida. Para se obter os açúcares na forma de glicose deve-se converter os carboidratos presentes no interior das células em açúcares simples, por meio de reações químicas ou enzimáticas de quebra de macromoléculas em moléculas de baixo peso molecular em presença de água, denominadas de hidrólise (Ho et al., 2013). Contudo, a parede celular das microalgas, composta por polissacarídeos e proteínas, é uma barreira praticamente intransponível à difusão de enzimas ou agentes químicos que convertem carboidratos em açúcares simples. Desse modo, diferentes métodos físicos, térmicos e/ou mecânicos, tem sido testado para rompimento destas barreiras.

3.5.1. Pré-tratamento com Moinho de bolas

O moinho de bolas é um equipamento que usa tensão de cisalhamento e força de impacto entre as bolas e o material a ser triturado, liberando uma grande quantidade de energia. É um tipo de operação que reduz significativamente a cristalinidade da parede celular de plantas e tem sido aplicado com sucesso para romper a parede celular de microalgas, danificando sua estrutura e possibilitando assim a extração dos compostos intracelulares (Lee et al., 2008). Na figura 9 ilustra-se um moinho de bolas industrial.



Figura 9. Moinho de bolas industrial

Fonte: <http://www.metso.com.br/produtos/moagem/moinho-de-bolas/>.

3.5.2. *Hidrólise enzimática*

Hidrólise enzimática consiste em reações químicas catalisadas por enzimas em meio aquoso que quebram uma molécula de elevado peso molecular em moléculas menores (Fu et al., 2010). Após o rompimento da parede celular das microalgas por pré-tratamento físico, a biomassa moída é imersa em uma solução aquosa composta por amilases ou outras enzimas do complexo celulolítico. O processo é comumente agitado e submetido a temperaturas próximas a 50 °C. Os carboidratos são expostos à ação das enzimas e são convertidos em glicoses, galactoses e outros açúcares simples. Os rendimentos das reações estão geralmente entre 70% e 95% (Ho et al., 2013).

Outro pré-tratamento muito aplicado para a extração de açúcares é a hidrólise ácida, que consiste geralmente na utilização de H_2SO_4 como reagente (Chen et al., 2012). A hidrólise ácida é um processo mais rápido e mais barato que a hidrólise enzimática. Porém, o uso de ácidos pode provocar decomposição dos açúcares em compostos indesejáveis que inibem o processo fermentativo, comprometendo a produção de etanol (Chen et al., 2012).

3.5.3. *Fermentação alcoólica*

A fermentação alcoólica é um processo biológico no qual açúcares simples como glicose, galactose e sacarose são convertidos em energia na forma de ATP, com liberação de etanol e CO_2 como resíduos. O processo é realizado por microrganismos que realizam respiração anaeróbica, na ausência de oxigênio. Os microrganismos mais comumente usados são as leveduras *Saccharomyces cerevisiae* e certas espécies de bactérias, como a *Zymomonasmobilis* (Scholz et al., 2013).

Uma solução de açúcares simples, processada na etapa de hidrólise enzimática, passa por etapas de purificação e é encaminhada a tanques chamados dornas de fermentação, onde ocorre o processo fermentativo. Leveduras ou outros microrganismos capazes de realizar respiração anaeróbica são inseridos na solução e convertem os açúcares em etanol e CO₂. Ao final do processo, que dura diversas horas, a solução presente nas dornas tem uma nova composição, passando a ser chamada de vinho fermentado, contendo leveduras ou outros microrganismos, açúcar não-fermentado e etanol (Bai et al., 2008).

Em seguida, o vinho é encaminhado para a etapa de destilação, na qual o etanol é separado da mistura. Nesta etapa, o vinho é fracionado em colunas de destilação, por meio de evaporação seguida por condensação. O etanol hidratado é então dissociado do vinho, tendo uma composição de 96 GL, pronto para ser usado como etanol combustível (Scholz et al., 2016).

As etapas de hidrólise e fermentação podem ocorrer separadamente, em tanques distintos, ou simultaneamente, no mesmo tanque. Ambos os métodos são denominados *SeparatedHydrolysisandFermentation* (SHF) e *SimultaneousSaccharificationandFermentation* (SSF), respectivamente (Ho et al., 2013).

3.5.4. Comparação entre métodos SHF e SSF

A principal vantagem do processo SHF é que as etapas de hidrólise enzimática e fermentação, por ocorrerem separadamente, podem ser mantidas em suas respectivas condições ótimas de operação. Contudo, isto pode se transformar em uma desvantagem. Um acúmulo elevado de açúcares simples em um curto período de tempo inibe a atividade das enzimas, diminuindo assim o rendimento da hidrólise enzimática ao longo do tempo, apesar da produção otimizada de açúcares no início do processo (Santos et al., 2010).

O processo SSF foi proposto como uma forma de evitar a inibição enzimática. As etapas de hidrólise enzimática e fermentação ocorrem no mesmo tanque, sob as mesmas condições. Assim que os primeiros açúcares simples são liberados no meio, estes são rapidamente consumidos por microrganismos e convertidos em etanol. Ou seja, não há acúmulo de substratos no processo, impedindo assim um efeito inibitório sobre a hidrólise enzimática e aumentando a produtividade de açúcares simples nesta etapa. O processo SSF requer condições intermediárias de temperatura para as

enzimas e as leveduras ou quaisquer outros microrganismos utilizados, já que as temperaturas ótimas para hidrólise enzimática e fermentação são, em geral, diferentes (Santos et al., 2010).

No estudo de Ho et al. (2013), verificou-se o rendimento do processo de produção de bioetanol a partir de biomassa de microalga em ambos os métodos SHF e SSF. Conforme ilustrados na Tabela 4, o processo de hidrólise enzimática pelo método SSF pode alcançar concentração de etanol de 4,27 g/L, com um rendimento aproximado de 90% nas etapas de sacarificação e de fermentação.

Tabela 4. Comparação da produtividade de etanol de terceira geração em diferentes métodos de hidrólise

Hidrólise	Insumos		Tipo	Co g/L)	Glicose (g/L)	Etanol (g/L)	Yg etanol/g biomassa	Referências
Enzimática	Celulases Amilases	+	SHF	50	-	-	0,08	Eshaq et al. (2010)
Enzimática	Amilases Glucanases Xilanases	+	SHF	22	8,6	-	-	Marsalkova et al. (2010)
Enzimática	Amilases		SHF	50	-	11,73	0,235	Sim et al (2010)
Enzimática	Celulases Xilanases Amilases	+	SHF	100	23,3	-	-	Rodrigues and Bon (2011)
Enzimática	Celulases Amilases	+	SHF	20	7,78	3,55	0,178	Ho et al (2013)
Enzimática	Celulases Amilases	+	SSF	20	-	4,27	0,214	Ho et al (2013)
Ácida	Ácido sulfúrico		SHF	50	28,5	14,6	0,292	Nguyen et al.(2009)
Ácida	Ácido sulfúrico		SHF	50	23,6	11,66	0,233	Ho et al (2013)

Co é Concentração inicial de biomassa algal; Fonte: Ho et al. (2013)

3.6. Análise Econômica

Nesta fase do projeto são estimados o investimento de capital e os custos operacionais do projeto, ou seja, os valores esperados para os investimentos fixos, capital de giro e custos operacionais, de forma a estimar a receita bruta, fluxos de caixa e a taxa interna de retorno, descritos nos itens a seguir.

3.6.1. Orçamento capital

Define-se orçamento capital como o montante destinado a cobrir custos com a instalação da infraestrutura da planta e com a operação e é estimado pela soma dos

custos de investimento fixo, capital de giro e custos de partida da planta (Perlingeiro, 2005).

3.6.1.1. Investimento fixo

Investimento fixo representa o recurso necessário para a construção da planta, incluindo aquisição de máquinas e equipamentos de processo, materiais, fundações e estruturas, engenharia básica, montagem, estocagem de matérias-primas e produtos, compra de terreno e equipamentos, instalação de unidades paralelas ao processo e obras de infraestrutura (Stanford ResearchInstitute).

3.6.1.2. Custos de partida da planta

Os custos de partida da planta incluem despesas com estudos de pré-investimento e pesquisa, capacitação e adestramento e gastos ou perdas operacionais que ocorram durante período de testes de operação da instalação (House, 2014). Neste trabalho, foi estipulado que os custos de partida da planta seriam equivalentes a 10% do investimento fixo, com base em Perlingeiro (2005).

3.6.1.3. Capital de Giro

Capital de giro é o capital requerido para financiar a continuidade das operações da empresa, como recursos para manter estoques, recursos para pagamento de matérias-primas e fornecedores, recursos para financiamento aos clientes e recursos para pagar pessoal (SEBRAE, 2017). Assim, neste trabalho, foi estipulado que o capital de giro seria igual a 15% do investimento total da planta, com base em Perlingeiro (2005).

3.6.2. Custos Operacionais

Podem ser separados em custos fixos e custos variáveis. Custos variáveis são compreendidos por gastos com matérias-primas, utilidades, insumos e manutenção, e são diretamente proporcionais à produção. Já os custos fixos são representados pelos custos de caixa, que englobam despesas com pessoal, na forma de salários e encargos adicionais, e pelos custos não-caixa, na forma de depreciação, que é um montante que a empresa tem que salvar ano a ano para poder substituir os equipamentos defeituosos. Os custos fixos não são proporcionais à produção (Portal de Contabilidade).

- Custos variáveis = CMP + CUT, sendo que CMP = Custo com matérias-primas e CUT = Custo com utilidades.
- Custos fixos (caixa) = $n \cdot SB \cdot 12 \cdot (1+e)$, sendo que SB = Salário base de um cargo, e = percentual relativo aos encargos trabalhistas e n = número de empregados no cargo. Considerou-se neste trabalho que e = 106%.
- Depreciação = 10% do orçamento capital, neste trabalho.

3.6.3. Receita

Representa a arrecadação da planta com a venda de produtos. Neste estudo são analisadas as receitas bruta e líquida. A receita bruta representa o produto da venda de bens nas operações sem considerar os impostos não-cumulativos cobrados e acrescentados ao preço do bem ou serviço (Receita Federal, 2017).

A receita líquida é equivalente à receita bruta descontada de devoluções e vendas canceladas, de descontos concedidos incondicionalmente e dos impostos e contribuições incidentes sobre vendas (Receita Federal, 2017).

3.6.4. Taxa Interna de Retorno (TIR)

A taxa interna de retorno é a taxa requerida para igualar o valor de um investimento com fluxos de caixa periódicos, e representa a taxa de retorno de um projeto (Nauss, 1988).

Para a TIR ser considerada aceitável, ela deve ser comparada com a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Caso a TIR do projeto seja superior à TMA, significa que o investimento tem potencial econômico aceitável (Prates, 2017; Nauss, 1988). A equação da TIR está exibida abaixo (Eq 3). O somatório de todos os fluxos de caixa em um dado período deve ser igual a zero para o investimento a ser pago.

$$\sum_{n=0}^{\infty} \frac{F_n}{(1 + TIR)^n} = 0 \quad (\text{Eq.3})$$

3.7. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade é uma importante ferramenta para verificar o efeito da incerteza sobre o resultado do dimensionamento e sobre o desempenho futuro do processo (Rudd, D.F. e Watson, C.C., 1968). A análise é baseada em variáveis de dimensionamento que são calculadas com parâmetros específicos do processo. Como

o presente trabalho é uma análise econômica, parâmetros de processo como temperatura, pH, intensidade de luz e outros permaneceram inalterados nesta análise.

4. METODOLOGIA

4.1. Microalga selecionada e composição da biomassa

Para estimativa de custos durante o cultivo da microalga, utilizou-se os dados obtidos no laboratório Bioetanol-IQ/UFRJ, em meio de cultivo modificado por Souza (2016). A microalga utilizada neste trabalho seria a *Chlorellasorokiniana*, caracterizada por sua cor esverdeada que denota uma elevada concentração de clorofila. Conforme visto na tabela 1, a *Chlorellasorokiniana* tem altas concentrações de proteínas, lipídios e carboidratos em sua composição. Além disso, há estudos que reportam uma elevada concentração de astaxantina, um carotenóide de alto valor comercial agregado (Raman e Mohamad, 2012). O preço de venda da astaxantina no mercado internacional pode superar os US\$ 10.000 por quilo (Rosenberg et al., 2008).

Como esta espécie de microalga foi utilizada como base em outro trabalho desenvolvido pela Escola de Química/UFRJ, estipulou-se que seria prudente empregá-la como microalga base neste trabalho também, devido ao acesso às informações de concentrações relevantes para este projeto. Neste caso, a concentração de carotenóides totais na biomassa foi de 4,5ug de carotenóides gerais/mg de biomassa seca, com concentração de 30% em massa de carboidratos em base seca, com base em dados internos da Escola de Química da UFRJ.

4.2. Análise de cenário, fluxograma e linha do tempo

Para estimar a viabilidade econômica de uma biorrefinaria à base de microalga, produtora de biomassa seca, carotenóides e bioetanol, foi escolhido um cenário composto por 100.000 fotobiorreatores de janela com capacidade de 110 litros cada, totalizando uma capacidade instalada de 11.000.000 litros. Para este cenário base, foram adotados os dados apresentados na tabela 5. Com base nestas informações, estimou-se que o processo de cultivo terá duração aproximada de 62 horas.

Tabela 5. Parâmetros do processo de cultivo

Tipo e capacidade dos fotobiorreatores	Janela, com 110 litros de volume cada	Espinosa et al. (2015)
Produtividade volumétrica diária de biomassa (kg/m ³ .dia)	1,535	Chisti (2007)
Concentração final de biomassa (kg/m ³)	4,00	Chisti (2007)
Produção esperada de biomassa na etapa de cultivo (toneladas/ano)	4.840	-
Concentração de carotenoides (ug/mg biomassa seca)	4,5	Souza (2016)
Concentração de carboidratos na biomassa seca (% em massa)	30%	Souza (2016)

Na figura 10, ilustra-se o fluxograma do processo. Nesta, pode-se observar que, após o cultivo, o meio seria submetido a uma centrifugação seguida de uma de secagem por spray dryer. Logo após, a biomassa seca deveria passar por um pré-tratamento em moinho de bolas antes da extração de carotenoides. A biomassa moída seria então encaminhada para o sistema SFE, de forma a extrair os carotenoides pela técnica de extração supercrítica. A biomassa residual então seria hidrolisada e fermentada pelo método SSF, produzindo bioetanol. A mistura seguiria para uma centrífuga, na qual os sólidos seriam removidos da mistura água e etanol. A mistura água e etanol seguiria para uma coluna de destilação, para remoção da água até as especificações desejadas. A fração sólida (proteína e fibras) passaria por outra etapa de secagem em spray dryer, sendo disponibilizada para venda como co-produto.

A figura 11 exibe a linha do tempo do processo, com o tempo necessário para cada etapa em horas. Para cada quantidade de biomassa coletada por cultivo, seriam necessários 8 dias para a produção de bioetanol. Os carotenoides seriam removidos ao final de 4 dias, enquanto que a biomassa seca residual seria definitivamente coletada após 6 dias. Contudo, apesar de o processo funcionar como batelada, os fotobiorreatores operariam continuamente, garantindo assim que os produtos de interesse pudessem ser coletados a cada 3 dias.

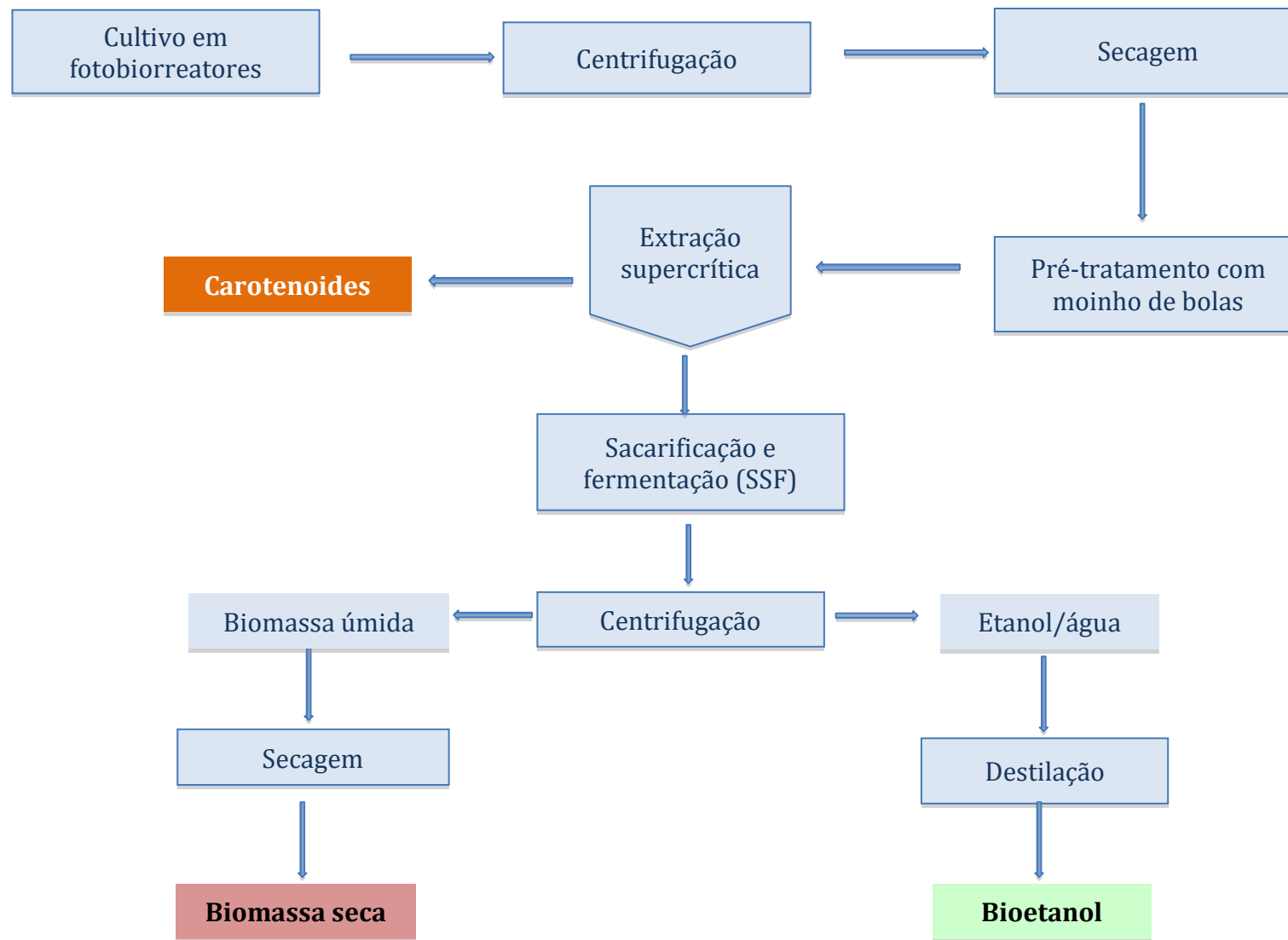


Figura 10. Fluxograma do processo

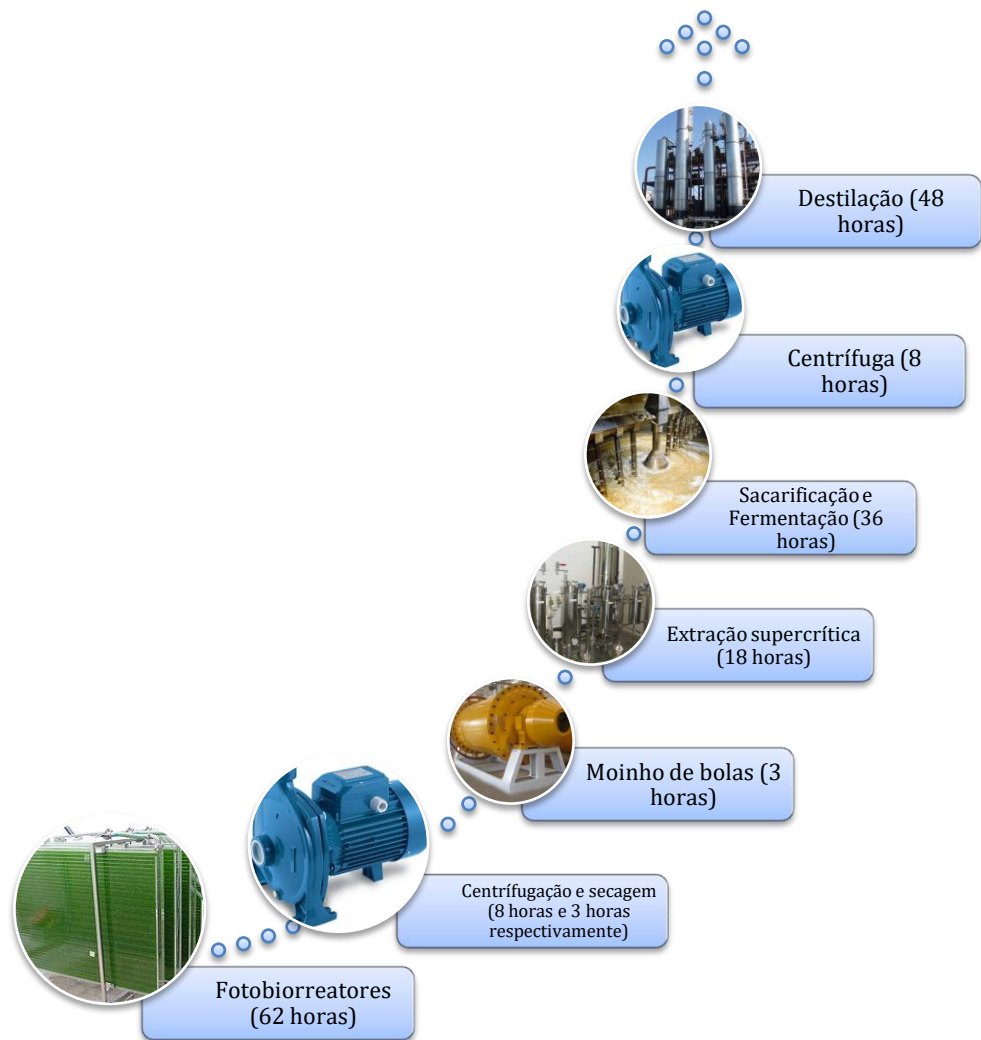


Figura 11. Linha do tempo com a descrição das principais etapas do processo

Na tabela 6 figuram-se as etapas realizadas diariamente até à produção de bioetanol. Esta tabela se refere ao ciclo de biomassa produzida em apenas uma etapa de cultivo. Em todos os dias operacionais, os fotobiorreatores estão funcionando. Contudo, coleta-se a biomassa a cada 3 dias de operação. A partir da segunda semana o processo entra em regime contínuo, ou seja, todos os equipamento irão operar simultaneamente.

Tabela 6. Etapas sequenciais de operação para partida da biorefinaria

Etapas	
Dia 1 a 3	Cultivo em fotobiorreatores
Dia 3	Centrifugação / Secagem da biomassa úmida em <i>spray dryer</i>
Dia 3	Pré-tratamento em moinho de bolas/Extração por CO ₂ supercrítico
Dia 4 a 6	Sacarificação e fermentação
Dia 6	Centrifugação / Secagem da biomassa úmida em <i>spray dryer</i>
Dia 7 a 8	Destilação

4.3. Balanço de massa

Supondo-se uma produção de 1.000 kg de biomassa por etapa de cultivo, foram estimadas as quantidades de todas as correntes de entrada e saída. As principais hipóteses assumidas para os cálculos de custos e receitas estão enumeradas a seguir:

- A concentração final de biomassa no cultivo será igual a 4,0 kg/m³;
- Cerca de 90% da água da etapa de cultivo será reutilizada;
- Assumiu-se perda de 5% de biomassa no moinho de bolas;
- No processo de extração supercrítica, considerou-se a razão S/F = 6,6. Esta é definida pela relação entre a massa de CO₂ e a massa de biomassa por extração (Prado, 2009);
- No processo de extração supercrítica, considerou-se que a quantidade de etanol utilizado como co-solvente foi igual a 1% da massa de CO₂;
- Assumiu-se uma perda de 5% de biomassa na etapa de extração supercrítica;

- Na etapa de sacarificação e fermentação, considerou-se que a concentração de biomassa no tanque seria igual a 20 g/L, baseado no estudo de Ho et al. (2013);
- Assumiu-se rendimento de 90% para a etapa de sacarificação e fermentação;
- Estipulou-se concentração de carboidratos na microalga igual a 30%;
- Considerou-se densidade do etanol anidro igual a 789 g/L;
- Cerca de 90% da água será reutilizada na etapa de produção de bioetanol;
- Estipula-se uma perda de 5% do etanol recirculado para a extração supercrítica ao longo do ano.

A figura 12 ilustra o balanço de massa no fluxograma da biorrefinaria. Uma parte do bioetanol produzido seria recirculado ao processo para a etapa de extração supercrítica. Logo, 79 dos 157 litros de bioetanol produzidos, por 1.000 kg de biomassa, seriam reutilizados no processo. Como se estipulou uma perda de 5% de etanol no reciclo, uma quantidade adicional de etanol, equivalente à perda anual, é captada da produção final. Como 5% de 79 litros equivale a 4 litros, a quantidade total de etanol a ser reciclada seria de 83 litros ao ano, para cada 1.000 kg de biomassa produzida no cultivo. Assim, a produção líquida de bioetanol para comercialização seria igual a 74 litros para cada 1.000 kg de biomassa produzida no cultivo.

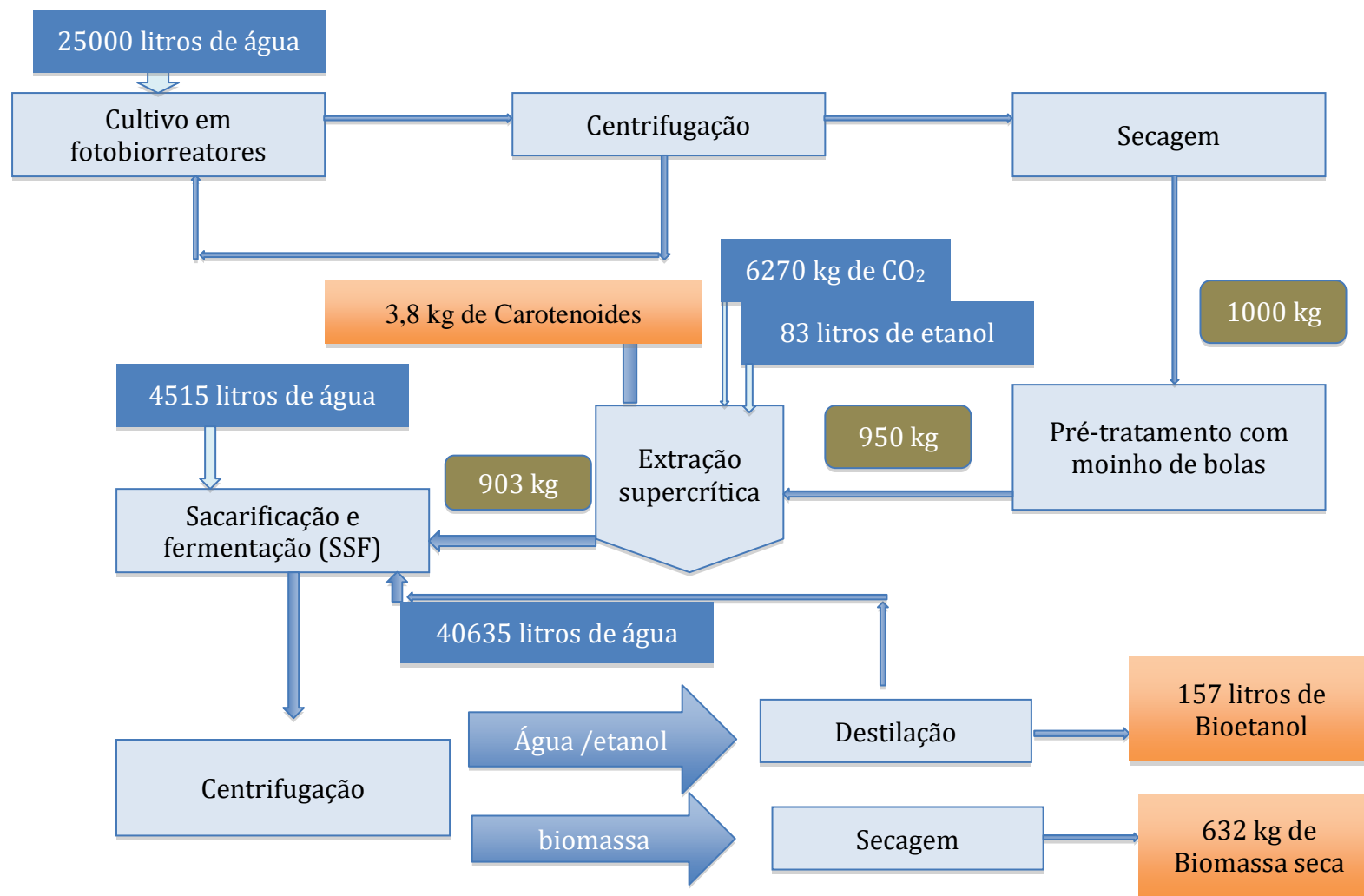


Figura 12. Balanço de massa em fluxograma

4.4. Detalhamento dos equipamentos

As estimativas de custos da maioria dos equipamentos deste estudo foram baseadas em cálculos usando o princípio de economia de escala. Utilizou-se a equação de economia de escala (Eq. 1), com base em Rudd& Watson (1968), para determinar todos os custos no cenário expandido, utilizando-se um fator de escala f_i que varia de acordo com o equipamento. Nesta equação, I_{Ebi} e Q_{bi} representam os respectivos custo e a capacidade do equipamento na escala de referência, enquanto I_{Ei} e Q_i representam o custo e a capacidade do equipamento na escala desejada, respectivamente.

$$I_{Ei} = I_{Ebi} \times (Q_i/Q_{bi})^{f_i} \quad (\text{Eq.1})$$

Na tabela 7 listam-se todos os equipamentos cujos custos foram estimados por meio da equação 1, além de seus respectivos fatores de escala. A única exceção fica por conta dos fotobiorreatores, cujas capacidades foram fixadas em 110 litros cada. Cada fotobiorreator com este volume custa R\$ 1.136,35 (Espinosa et al., 2015).

Tabela 7. Preço base de equipamentos

Equipamentos das etapas de cultivo, secagem e pré-tratamento	Preço base	Referência
Sistema de controle de temperatura(preço para uma capacidade instalada de 1100 litros, para cada 10 fotobiorreatores)	R\$ 5.000,00	Preço de 01/03/2015 de Alquilabor Comercial LTDA EPP
Sistema de controle de pH (preço para uma capacidade instalada de 1100 litros, para cada 10 fotobiorreatores)	R\$ 2.500,00	Preço de 28/02/2015 de Alquilabor Comercial LTDA EPP
Pontos de injeção de ar comprimido(preço para uma capacidade instalada de 1100 litros, para cada 10 fotobiorreatores)	R\$ 2.000,00	Preço de 24/04/2015 de Alquilabor Comercial LTDA EPP
Bombas monofuso de aço inoxidável (preço para uma capacidade instalada de 1100 litros, para cada 10 fotobiorreatores)	R\$ 5.000,00	Espinosa et al. (2015)
Centrífuga contínua (para vazão de 4400 L/h)	R\$ 90.000,00	Espinosa et al. (2015)
<i>Spray Dryer</i> (capacidade de processar 18.000 quilos de biomassa)	R\$ 91.608,00	Panis e Carreon (2016)
Moinho de bolas (modelo laboratorial com	R\$ 89.000,00	Forlab (2017)

capacidade de processar 10 kg/h de biomassa)		
Etapa de extração de carotenoides		
Sistema SFE completo com 2 extratores de 500 litros	US\$ 1.150.000,00	Prado (2009)
Equipamentos para produção de bioetanol (SSF) e biomassa seca		
Tanque de fermentação e sacarificação de 3000 litros	R\$ 3.250,00	Alambiqueiro et al. (2017)
Coluna de destilação (capacidade de processar 220 metros cúbicos por dia)	R\$ 3.000.000,00	Rural MF (2017)
Centrífuga contínua (4400 L/hora)	R\$ 90.000,00	Espinosa et al. (2015)
<i>Spray Dryer</i> (para processar 18.000 quilos de biomassa)	R\$ 91.608,00	Panis e Carreon (2016)

4.5. Dimensionamento dos equipamentos

Para estimativa da capacidade de cada equipamento instalado, levou-se em conta o balanço de massa de todas as correntes, conforme ilustrado na figura 12. Ampliando-se a escala ilustrada no fluxograma de produção na etapa de cultivo de 1.000 kg de biomassa para 4.840.000 kg de biomassa, pode-se dimensionar os principais equipamentos. Na tabela 8 ilustram-se os resultados do balanço de massa para este estudo de caso, considerando-se:

- Capacidade instalada de 11.000 m³ e concentração de biomassa igual a 4,0 kg/m³, obtendo-se 44.000 quilos de biomassa por cultivo;
- No sistema SFE, para um extrator em escala piloto com volume de 5,15 litros, seriam requeridos 4.677 gramas de biomassa (Prado, 2009).;
- O sistema SFE requer 18 horas para processar toda a biomassa presente. Como o sistema é composto por 2 extratores, garantindo assim uma operação contínua, e cada operação é realizada em 3 horas, estimou-se que ocorrerão 6 bateladas por dia;
- Para se calcular o volume útil do tanque de sacarificação e fermentação, multiplicou-se o volume total requerido por batelada por um fator de 1,5;

- Supõe-se que haverá 5 tanques de sacarificação e fermentação. Logo, o volume estimado de cada tanque será o equivalente a um quinto do volume total de água requerida e etanol produzido. Este valor foi multiplicado pelo fator de 1,5 explicitado no tópico logo acima.

Tabela 8. Dados do balanço de massa nas principais correntes do processo para produção de 44.000 quilos de biomassa por cultivo

Parâmetros	Quantidade necessária no presente estudo
Biomassa após cultivo (kg)	44.000
Água requerida na etapa de cultivo (m ³)	11.000
Biomassa residual após prensagem em moinho de bolas (kg)	41.800
Biomassa requerida por extração supercrítica (kg)	6.967
Biomassa residual após extração supercrítica (kg)	39.710
Água requerida na técnica SSF (m ³)	1.986
Etanol produzido na técnica SSF (litros)	6.922
Volume total de água e etanol estimados para os tanques na técnica SSF (m ³)	1.992
Biomassa residual após técnica SSF (kg)	27.797

Por razões estratégicas e econômicas, deve-se garantir o uso contínuo da coluna de destilação. Para este fim, no dia 7, após o término do processo SSF, metade do volume obtido é direcionado para a destilação, enquanto que a outra metade é armazenada em um tanque vedado. Após 48 horas, com a destilação completa do volume inicial, o líquido armazenado é bombeado para a coluna de destilação. A tabela 9 exibe uma linha do tempo com o ciclo de cada etapa do processo, desde o cultivo até a destilação do bioetanol.

A partir dos valores ilustrados na tabela 8 e levando-se em conta as hipóteses operacionais listadas acima, pode-se dimensionar todos os equipamentos. Na tabela 10 lista-se os equipamentos e suas capacidades na escala original (Q_{bi}) e na escala projetada neste estudo (Q_i). Os valores de fator de escala foram coletados do livro Engenharia de Processos (Perlingeiro, 2005).

Tabela 9. Linha do tempo com ciclo de cada processo, desde a etapa de cultivo até etapa de destilação

Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
Etapas de cultivo, centrifugação e secagem									
-	-	44.000 kg	-	-	44.000 kg	-	-	44.000 kg	-
Etapa de pré-tratamento em moinho de bolas									
-	-	-	41.800 kg	-	-	41.800 kg	-	-	41.800 kg
Etapa de extração supercrítica									
-	-	-	-	39.710 kg	-	-	39.710 kg	-	-
Etapa de sacarificação e fermentação SSF (volume processado pelos tanques)									
-	-	-	-	-	1.992 m ³	-	-	1.992 m ³	-
Etapa de centrifugação e secagem de biomassa									
-	-	-	-	-	1.992 m ³ água/etanol + 27.797 kg biomassa seca	-	-	1.992 m ³ água/etanol + 27.797 kg biomassa seca	-
Etapa de destilação									
-	-	-	-	-	-	996 m ³ água/etanol misturados do primeiro cultivo	996 m ³ água e etanol separados do primeiro cultivo	996 m ³ água/etanol misturados do primeiro cultivo	996 m ³ água e etanol separados do primeiro cultivo + 996 m ³ de água/etanol misturados do segundo cultivo

Tabela 10. Dados das capacidades Q_{bi} e Q_i usadas nos cálculos de economia de escala e seus respectivos fatores de escala

Equipamentos das etapas de cultivo, secagem e pré-tratamento	Q_{bi}	Q_i	Fator de escala (fi)
Sistema de controle de temperatura	1100 L	11.000.000 L	0,58
Sistema de controle de pH	1100 L	11.000.000 L	0,69
Pontos de injeção de ar comprimido	1100 L	11.000.000 L	0,69
Bombas monofuso de aço inoxidável	1100 L	11.000.000 L	0,68
Centrífuga contínua	35.200 L / 8 horas	11.000.000 L / 8 horas	0,63
<i>Spray Dryer</i> (cultivo)	18.000 kg biomassa	44.000 kg biomassa	0,55
Etapa de extração de carotenoides			
Sistema SFE completo com 2 extratores	500 L	7.672 L	0,69
Equipamentos para produção de bioetanol (SSF) e biomassa seca			
Tanque de fermentação e sacarificação	3000 L	600.000 L por cada tanque	0,69
Tanque de armazenamento de água e etanol	3000 L	2.000.000 L	0,69
Centrífuga contínua (4400 L/hora)	35.200 L / 8 horas	1.992.922 L / 8 horas	0,63
Coluna de destilação	220 m ³ /dia	2.000 m ³ /dia	0,69
<i>Spray Dryer</i> (após produção de bioetanol)	18.000 kg biomassa	27.797 kg biomassa	0,55

4.6. Considerações para cálculo de custos operacionais

Os custos com meio de cultivo são baseados no meio modificado como proposto por Souza (2016), cuja composição está exibida na tabela 11. As utilidades necessárias para o projeto estão descritas na tabela 12.

Tabela 11. Macronutrientes e composição do meio modificado por Souza (2016), usados como base para custos com matérias-primas estimados neste trabalho

<i>Macronutrientes</i>	Meio modificado (g/L)
NaNO₃	0,25
CaCl₂ . 2H₂O	0,025
MgSO₄ . 7H₂O	0,075
K₂HPO₄ . 3 H₂O	0,098
KH₂PO₄	0,175
NaCl	0,025
<i>Solução EDTA</i>	
EDTA	0,025
KOH	0,015
<i>Solução ácida de Fe</i>	
FeSO₄ . 7H₂O	0,00498
H₂SO₄	0,001

Tabela 12. Utilidades empregadas nas etapas do processo

Equipamentos das etapas de cultivo, secagem e pré-tratamento	Preço	Consumo de equipamentos energéticos	Referência	Consumo anual
Água	R\$ 3,16/m ³	-	Jornal O Dia (2015) - www.odia.ig.com.br/noticia/rio-de-janeiro/2015-01-25	451.880 m ³
Energia elétrica dos fotobiorreatores	R\$ 0,25/kWh	3.400 W/m ³	Sierra et al. (2008)	296.208.000 kWh
Energia elétrica da centrífuga (Westfalia)	R\$ 0,25/kWh	1 kWh/m ³	Molina Grima et al. (1999)	1.210.000 kWh
Energia elétrica do <i>Spray dryer</i> (cultivo)	R\$ 0,25/kWh	2,46 kWh/kg	Panis G. e Carreon J. (2016)	11.906.400 kWh
Energia elétrica do moinho de bolas	R\$ 0,25/kWh	210 kW (capacidades entre 7,5 e 12 ton/h)	Businex (2017)	69.300 kWh
Etapa de extração de carotenoides				
Energia elétrica da extração por sistema SFE(kWh)	R\$ 0,25/kg	314,11 kJ/kg de CO ₂ ¹	Attard, McElroy, & Hunt, (2015)	2.647.843 kWh
Etanol	R\$ 1,36/kg	-	Novacana (2016)	403.344 litros ²
CO ₂	R\$ 4,00/kg	-	Mercado Livre (2016)	576.589 kg
Equipamentos para produção de bioetanol (SSF) e biomassa seca				
Água (sistema SSF)	R\$ 3,16/m ³	-	Jornal O Dia (2015) - www.odia.ig.com.br/noticia/rio-de-janeiro/2015-01-25	23.826 m ³
Enzimas para etapa de hidrólise	US\$ 0,13/L de etanol produzido	-	Novozyme (2010)	761.376 litros de etanol produzido
Leveduras <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	US\$ 86/kg	-	Harun et al. (2010)	10 kg
Energia elétrica da centrífuga (bioetanol)	R\$ 0,25/kg	1 kWh/m ³	Molina Grima et al. (1999)	2.704.611 kWh
Energia elétrica do <i>Spray dryer</i> (bioetanol)	R\$ 0,25/kg	2,46 kWh/kg	Panis G. e Carreon J. (2016)	7.521.868,2 kWh

¹Considerou-se que a energia necessária para esta etapa foi determinada pelo produto entre o tempo de extração, a vazão mássica de CO₂ e a entalpia específica do CO₂ supercrítico. No caso do sistema SFE utilizado, para atingir os valores desejados de pressão e temperatura para o funcionamento ótimo da extração, aproximadamente 400 bar e 60 graus Celsius, a entalpia específica do CO₂ foi estimada em

314,11 kJ/kg, segundo Attard et al. (2015). Sabendo-se que o tempo de extração é de 3 horas e que a vazão mássica de CO₂ é de 4,26 kg/s, pode-se calcular a energia elétrica a ser consumida pelo sistema em kWh.

²Com base em cálculos, a quantidade de etanol necessária para esta etapa seria de 303.468 quilos, equivalente a aproximadamente 384.137 litros de etanol. Contudo, como se considerou uma perda de 5% no reciclo de etanol para a extração supercrítica, multiplicou-se este valor obtido pelo fator de 1,05 para a obtenção do volume necessário de etanol que deve ser recirculado para esta etapa, que nesta escala é igual a 403.344 litros ao ano.

Com relação aos custos fixos, relacionados à mão-de-obra, a tabela 13 especifica número de funcionários que trabalhariam em cada etapa da planta, com seus respectivos salários-base. Cada etapa do processo exige a contratação de analistas, supervisores, administradores e operários/técnicos. Na etapa de cultivo, considerou-se um operário para cada 50 fotobiorreatores. Na etapa de extração supercrítica, considerou-se 10 operários para um extrator. Na etapa de produção de bioetanol, considerou-se 3 operários para cada tanque de sacarificação e fermentação. Cada categoria teria o mesmo salário-base. Todos os empregados receberiam 12 salários e encargos adicionais de 106%.

Tabela 13. Custos-base com mão-de-obra

Etapas de cultivo, secagem e pré-tratamento	Número de funcionários	Salário-Base
Analistas	10	R\$ 2.000,00
Supervisores	3	R\$ 8.723,00
Administradores	3	R\$ 6.102,00
Operários/técnicos	2000	R\$ 1.801,00
Etapa de extração de carotenoides		
Analistas	10	R\$ 2.000,00
Supervisores	3	R\$ 8.723,00
Administradores	3	R\$ 6.102,00
Operários/técnicos	10	R\$ 1.801,00
Etapa de produção de bioetanol (SSF) e biomassa seca		
Analistas	10	R\$ 2.000,00
Supervisores	3	R\$ 8.723,00
Administradores	3	R\$ 6.102,00
Operários/técnicos	15	R\$ 1.801,00

-
-
-

5. RESULTADOS

5.1. Orçamento capital

Os custos com equipamentos, obras e infraestrutura, investimento total e orçamento de capital, para o cenário descrito em materiais e métodos, estão dispostos na tabela 14. Para o cálculo com obras civis e infraestrutura, foi estimada uma área de 15.000 m². O preço do metro quadrado estipulado foi de R\$ 650, segundo o INCC (2016). Os custos com equipamentos foram estimados a partir da equação de economia de escala. O capital de giro foi estimado em 15% do orçamento capital encontrado, com base em Perlingeiro (2005).

Tabela 14. Custos com equipamentos, obras e infraestrutura, investimento total e orçamento capital

Etapas	Equipamentos	
Cultivo de Biomassa	Fotobiorreatores (coluna)	R\$113.635.000,00
	Sistemas de controle de temperatura ou sistema de refrigeração	R\$1.044.648,07
	Sistema de controle de pH - pontos de injeção de CO ₂	R\$1.438.599,84
	Ponto de injeção de ar comprimido	R\$1.150.879,87
	Bombas monofuso de aço inoxidável	R\$2.624.037,30
	Centrífuga contínua	R\$3.357.360,86
	<i>Spray dryer</i>	R\$1.992.488,29
Extração por fluido supercrítico	Moinho de bolas	R\$13.619.422,34
	Complemento do moinho de bolas (+10%)	R\$1.361.942,23
	Sistema SFE-400 de extração por CO ₂ supercrítico	R\$24.445.447,37
Produção de bioetanol	Tanques para fermentação e sacarificação simultâneas (5 tanques para processo SSF com volume de 600 m3 cada)	R\$628.874,61
	Tanque de armazenamento de água e etanol (capacidade de 2000 m3)	R\$381.841,71
	Colunas de destilação	R\$13.758.158,30
	Centrífuga para separar biomassa do mosto	R\$1.301.242,24
	<i>Spray dryer</i> para secar a biomassa oriunda da etapa de fermentação	R\$1.318.225,73
	Valor total de equipamentos	R\$182.058.168,77
	Complementos	R\$9.102.908,44
	Instalação (10% de CE)	R\$18.205.816,88
	Preço Total de Equipamentos instalados	R\$209.366.894,09
	Custos com Obras de Infraestrutura	
	Obras civis	R\$9.000.000,00
	Investimento de capital	
	Investimento fixo	R\$218.366.894,09
	Projeto (15%CE)	R\$27.308.725,32
	Partida (10% IF)	R\$21.836.689,41
	ORÇAMENTO CAPITAL	R\$267.512.308,81
	Capital de Giro (15% do investimento total)	R\$40.126.846,32
	ORÇAMENTO CAPITAL TOTAL (+Capital de Giro)	R\$ 307.518.573,92

5.2. Custos com Meio de Cultivo

Os custos de insumos e meio de cultivo de todos os cenários estudados estão dispostos na Tabela 15. Os preços por quilo de cada componente foram obtidos a partir dos dados de importação no Brasil em 2016, através do site Alice Web. Os dados foram obtidos originalmente em dólar, e convertidos para reais segundo a cotação do dia, que era de R\$ 3,23. Este preço obtido é do mercado internacional. Devido às elevadas taxas de importação existentes no Brasil, considera-se que o preço estimado para estes compostos será o dobro do preço no mercado internacional. Desta maneira, os valores de preço encontrados foram multiplicados por 2 para se ter uma estimativa mais conservadora do preço final a ser encontrado para cada componente.

Tabela 15. Tabela de consumo anual e custo anual com matérias-primas

Macronutrientes	Meio modificado (g/L)	Consumo Total/anual (kg/ano)	*Preço/Kg (R\$/kg)	Despesa anual (original)
NaNO₃	0,25	35750,00	4,10	R\$146.650,08
CaCl₂ . 2H₂O	0,025	3575,00	32,32	R\$115.544,00
MgSO₄ . 7H₂O	0,075	10725,00	1,64	R\$17.598,01
K₂HPO₄ . 3 H₂O	0,098	14014,00	21,18	R\$296.816,52
KH₂PO₄	0,175	25025,00	9,93	R\$248.473,73
NaCl	0,025	3575,00	3,55	R\$12.701,98
Solução EDTA		0,00		
EDTA	0,025	3575,00	11,50	R\$41.108,21
KOH	0,015	2145,00	5,81	R\$12.471,03
Solução ácida de Fe		0,00		
FeSO₄ . 7H₂O	0,00498	712,14	1,49	R\$1.058,10
H₂SO₄	0,001	143,00	0,11	R\$15,33
Solução de B				
H₃BO₃		0,00	1,53	R\$-
Solução elementos-traço				
ZnSO₄ . 7H₂O		0,00	4,85	R\$-
MnCl₂ . 4H₂O		0,00	334,69	R\$-
MoO₃		0,00	70,54	R\$-
CuSO₄ . 5 H₂O		0,00	294,32	R\$-
Co(NO₃)₂ . 6H₂O		0,00	11,37	R\$-
Total				R\$892.436,98

5.3. Custos com Utilidades

Os custos com utilidades estão dispostos na tabela 16. Considera-se que parte do bioetanol produzido pela planta é recirculado para o sistema SFE, tendo-se assim custo zero com o etanol que seria adquirido para esta etapa.

Tabela 16. Custos com utilidades

	Utilidades	Preço por unidade (R\$)	Consumo anual	Despesa anual
Etapa de Cultivo	Água (m ³)	R\$3,16	143000	R\$451.880,00
	Energia elétrica (kWh) dos fotobiorreatores	R\$0,25	296208000	R\$74.052.000,00
	Energia elétrica da centrífuga (kWh)	R\$0,25	1210000	R\$302.500,00
	Energia elétrica do <i>Spray drying</i> de cultivo (kWh)	R\$0,25	11906400	R\$2.976.600,00
Etapa de extração supercrítica	Energia elétrica do moinho de bolas (kWh)	R\$0,25	69300	R\$17.325,00
	Energia elétrica da extração por CO ₂ supercrítico (kWh)	R\$0,25	2647843	R\$661.960,65
	CO ₂ (kg)	R\$4,00	606936	R\$2.427.744,00
	Etanol (kg)	R\$1,36	303468	R\$-
Etapa de Bioetanol	Energia elétrica para centrífuga da etapa de bioetanol	R\$0,25	2704611	R\$676.152,85
	Água para etapa de sacarificação e fermentação (m ³)	R\$3,16	23826	R\$112.935,24
	Enzimas para etapa de hidrólise (R\$/L de etanol produzido)	R\$0,43	761376	R\$323.584,98
	Leveduras para etapa de fermentação (R\$/kg)	R\$277,78	10	R\$2.777,80
	Energia elétrica (kWh) para <i>spray dryer</i> da etapa de bioetanol	R\$0,25	7521868	R\$1.880.467,05
	Total			

5.4. Custos com mão-de-obra

Os custos com mão-de-obra de uma planta produtora de biomassa seca, carotenoides e bioetanol estão ilustrados na Tabela 17.

Tabela 17. Custos com mão-de-obra

	Funções	Pessoal	Salário Base (R\$/mês)	Custo anual (R\$/ano)
Etapa de Cultivo	Analistas de cultivo	10	R\$2.000,00	R\$494.400,00
	Supervisor de etapa de cultivo	3	R\$8.723,00	R\$646.897,68
	Administrador da etapa de cultivo	3	R\$6.102,00	R\$452.524,32
	Operários/técnicos etapa de cultivo	2000	R\$1.801,00	R\$89.041.440,00
Etapa de extração supercrítica	Analistas de extração supercrítica	10	R\$2.000,00	R\$494.400,00
	Supervisor de etapa de extração supercrítica	3	R\$8.723,00	R\$646.897,68
	Administrador de etapa de extração supercrítica	3	R\$6.102,00	R\$452.524,32
	Operários/técnicos da extração de CO ₂	10	R\$1.801,00	R\$445.207,20
Etapa de Bioetanol	Analistas de etapa de bioetanol	10	R\$2.000,00	R\$494.400,00
	Supervisor de etapa de bioetanol	3	R\$8.723,00	R\$646.897,68
	Administrador de etapa de bioetanol	3	R\$6.102,00	R\$452.524,32

Operadores/técnicos da parte de bioetanol	15	R\$1.801,00	R\$667.810,80
Total			R\$94.935.924,00

5.5. Depreciação

A depreciação é igual a 10% do Orçamento Capital. Neste cenário, este valor foi igual a R\$ 26.751.230,88.

5.6. Capital de Giro

O capital de giro é igual a 15% do orçamento capital. Neste cenário, o capital de giro foi igual a R\$ 40.126.846,32.

5.7. Custos de produção de biomassa seca, carotenoides e bioetanol

Na tabela 18 ilustra-se os custos unitários de produção de biomassa seca, carotenoides e bioetanol.

Tabela 18. Custos de produção de biomassa seca, carotenoides e bioetanol

Produto	Custo de Produção
Biomassa seca (R\$/kg)	R\$55,99
Carotenoides (R\$/kg)	R\$248,71
Bioetanol (R\$/litro)	R\$9,43

O preço de custo estimado para a biomassa seca foi superior ao valor reportado no estudo de Alabi et al. (2009), de aproximadamente US\$ 7/kg (R\$ 23/kg). Entretanto, neste estudo os custos com nutrientes foram considerados o dobro dos valores praticados no mercado internacional.

A partir dos valores obtidos, pode-se concluir que a venda do bioetanol a preços competitivos com o etanol de cana de açúcar (cerca de R\$ 2/L) depende dos lucros obtidos com a venda de carotenoides e biomassa proteica residual. Considerando-se que o mercado atual pratica preços bem acima de R\$ 248,71/kg para carotenoides de fontes naturais e ligeiramente superiores para a biomassa de algas, a biorrefinaria proposta apresenta um grande potencial para se tornar economicamente competitiva.

5.8. Análise da Taxa Interna de Retorno (TIR) para a planta produtora de biomassa seca, carotenoides e bioetanol

Supondo-se que há taxaço de 5% sobre a receita total e de 30% sobre o lucro bruto (imposto de renda), e considerando preços de venda de biomassa seca, carotenoides e bioetanol iguais a R\$ 80/kg, R\$ 3.000,00/kg e R\$ 2,00/litro, respectivamente, a taxa interna de retorno para a planta está estimada na tabela 19.

Tabela 19. Taxa Interna de Retorno (TIR) da planta produtora de biomassa seca, carotenoides e bioetanol

Total Investimento	
Custo por kg de carotenoides	R\$ 248,71
Preço de venda por kg de carotenoides	R\$ 3.000,00
Receita de carotenoides	R\$ 62.073.000,00
Custo por kg de biomassa	R\$ 55,99
Preço de venda por kg de biomassa	R\$80,00
Receita de biomassa seca	R\$244.613.600,00
Custo por litro de bioetanol	R\$9,43
Preço de venda por litro de bioetanol	R\$2,00
Receita de bioetanol	R\$716.065,75
Receita Total	R\$307.402.665,75
Taxas (5%)	R\$ 15.370.133,29
Vendas valor líquido	R\$ 292.032.532,46
Custo de produ�o anual	R\$ 206.455.034,10
Lucro Bruto	R\$ 85.577.498,36
Taxa (imposto renda) (30%)	R\$ 25.673.249,51
Lucro líquido	R\$ 59.904.248,85
Deprecia�o	R\$ 26.740.745,56
Capital de giro	R\$ 40.111.118,34
Fluxo de caixa anual	R\$ 86.644.994,41
Ano	Fluxo de caixa
0	-R\$ 307.518.573,92
1	R\$ 86.644.994,41
2	R\$ 86.644.994,41
3	R\$ 86.644.994,41
4	R\$ 86.644.994,41
5	R\$ 86.644.994,41
6	R\$ 86.644.994,41
7	R\$ 86.644.994,41
8	R\$ 86.644.994,41
9	R\$ 86.644.994,41
10	R\$ 100.015.367,19
TIR	25%

Para uma planta produtora de carotenoides e bioetanol a partir de microalgas com produção de 4.840 toneladas de biomassa seca por ano na etapa de cultivo, foram considerados os preços de venda de R\$ 3.000,00/kg, R\$ 80,00/kg e R\$ 2,00/L para carotenoides, biomassa seca e bioetanol, respectivamente. Neste cenário, pode-se alcançar uma TIR de 25%. O preço proposto neste trabalho para venda de carotenoides está dentro da faixa média de preço de mercado, entre US\$ 300,00/kg e US\$ 3.000,00/kg.

A receita gerada com a venda de bioetanol é inferior ao custo requerido pela grande maioria dos equipamentos envolvidos no processo, não chegando nem ao valor de R\$ 1.000.000,00 ao final do ano. Isto é evidenciado pelo custo de produção de bioetanol obtido, superior a R\$ 9,00 por litro, muito acima do valor de mercado do etanol de cana-de-açúcar, que é de R\$ 2,91 por litro (Novacana, 2017). Caso a planta produzisse só bioetanol, ela não seria viável economicamente. Contudo, aplicando-se o conceito de biorrefinaria na planta de microalgas, obtendo-se receitas com vendas de coprodutos como biomassa seca e carotenoides, a planta produtora de bioetanol pode ser viável economicamente, compensando a baixa receita gerada pelo bioetanol nesta escala.

Na figura 13 são ilustradas as oscilações possíveis nos preços de venda de carotenoides e biomassa seca, para esta mesma planta, para se obter uma TIR de 20% ao ano. A capacidade instalada (11.000 m³/dia), a concentração de biomassa (4,0 kg/m³) e a concentração de carotenoides (4,5 µg/mg biomassa seca) permaneceram inalterados. Pode-se observar que, em média, o aumento do preço de venda de biomassa seca em 10 R\$/kg faz o preço de venda de carotenoides cair 1.500,00 R\$/kg para manter a TIR em 20%. Isto ocorre devido à grande produção de biomassa protéica. Dependendo dos carotenoides encontrados na biomassa da *Chlorella sorokiniana*, a planta pode explorar diversos cenários para se tornar viável economicamente.

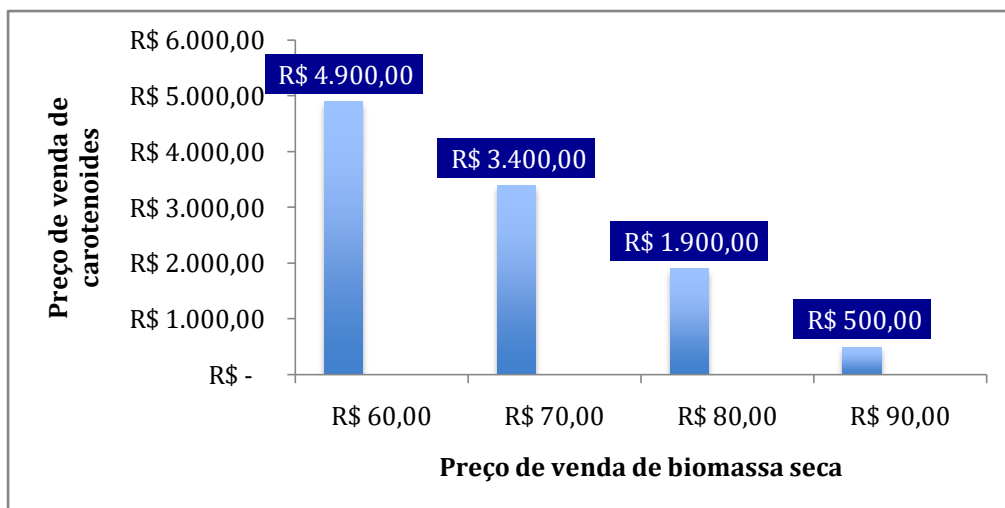


Figura 13. Preços de venda de carotenoides e biomassa seca para TIR igual a 20%

Foi elaborado também um gráfico com os preços de venda de carotenoides e biomassa seca para se obter uma TIR de 30%, como mostrado pela figura 14. A capacidade instalada (11.000 m³/dia), a concentração de biomassa (4,0kg/m³) e a concentração de carotenoides (4,5ug/mg biomassa seca) permaneceram inalterados.

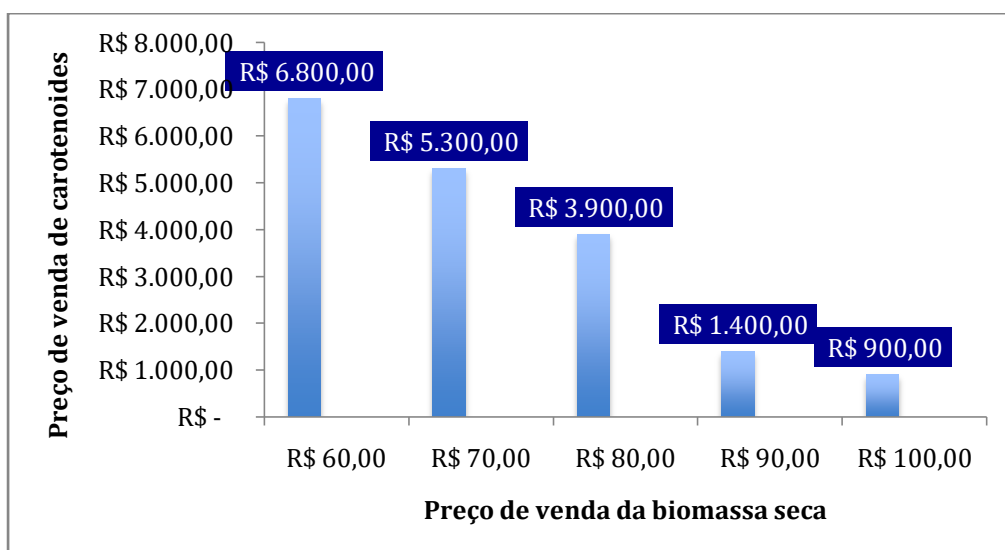


Figura 14. Custos de venda de carotenoides e biomassa seca para uma TIR igual a 30% ao ano

Outro resultado importante está associado ao ponto de nivelamento da planta, que consiste na quantidade mínima de biomassa seca produzida para venda que, na teoria, geraria lucro para a companhia. Estipulando-se as receitas e despesas obtidas como funções da quantidade de bioprodutos comercializados, pode-se elaborar um gráfico com as curvas de despesas e receitas conforme ilustrado na figura 15. No ponto em que ambas as retas se cruzam, encontra-se o ponto de nivelamento. No caso da planta estudada, este valor consiste em 1.301 toneladas de biomassa seca ao ano.

Como nestes cálculos não se considera a inflação, seria sensato afirmar que um valor conservador de produção anual de biomassa pronta para venda seria de aproximadamente 2.000 toneladas. Para isto, seria necessária uma produção de 3.200 toneladas/ano de biomassa na etapa de cultivo, aproximadamente.

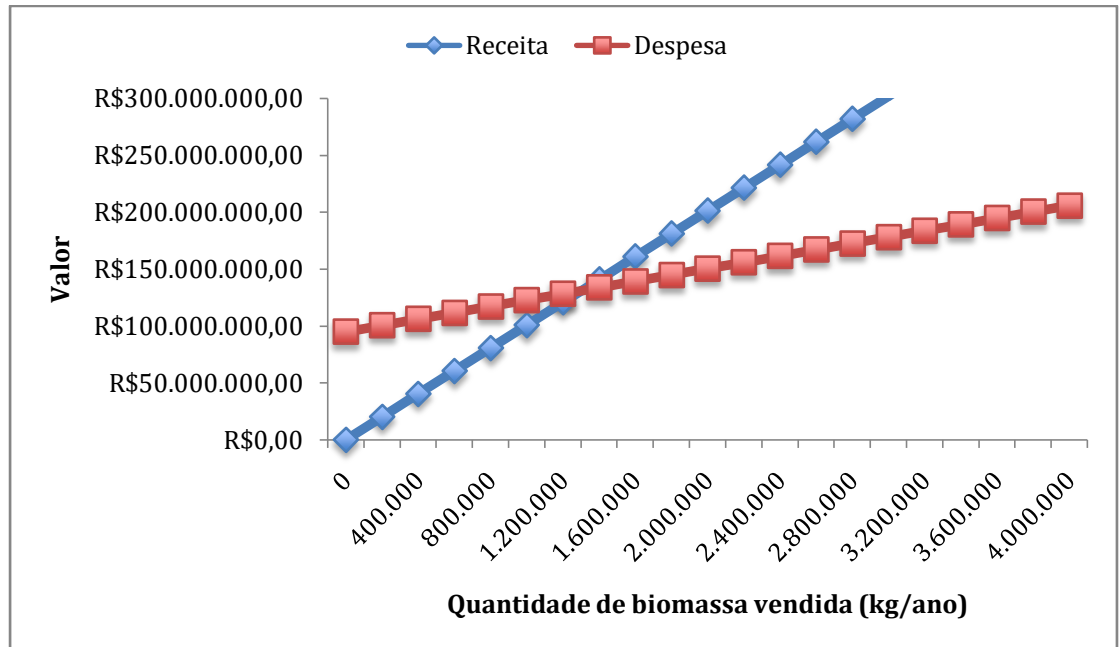


Figura 15. Ponto de nivelamento, cujo valor é de 1.301 toneladas de biomassa seca vendidas por ano

6. ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A variável de dimensionamento usada será a receita obtida pela venda de carotenoides e biomassa seca. Os parâmetros utilizados são o preço de venda da biomassa seca (R\$/kg), o preço de venda de carotenoides (R\$/kg), a concentração de biomassa (kg/m³) e a capacidade volumétrica instalada (m³). O objetivo é determinar qual parâmetro causa maior impacto na arrecadação da planta. Os parâmetros atrelados ao bioetanol, como preço de venda, não foram empregados nesta análise, devido à baixa produção de etanol registrada nesta escala. A receita gerada pela venda de bioetanol seria inferior a 1 milhão de reais, uma fração muito pequena da receita total obtida, sendo então a principal justificativa para não ser utilizada na análise de sensibilidade.

Supõe-se que R é a receita anual com biomassa e carotenoides, pC é o preço por quilo de carotenoides, pB é o preço por quilo de biomassa seca, pBE é o preço por litro de bioetanol, C é a concentração de biomassa no meio e V é a capacidade volumétrica instalada da planta. O número 110 utilizado nas equações abaixo se refere ao número de cultivos que ocorrem anualmente.

$$R = (pC * C * 0,0045 * 0,95 * V * 110) + (pB * C * 0,70 * 0,95 * 0,95 * V * 110) + (pBE * C * V * 110/0,79) * [(0,95*0,95*0,30*0,90*0,51) - 1,05*(0,95*0,01*6,6)]$$

Assumindo que pC = R\$ 3.000/kg, pB = R\$ 80/kg, pBE = R\$ 2,00/litro, C = 4,0 kg/m³ e V = 11.000 m³:

$$R = (3000 * 4 * 0,0045 * 0,95 * 110 * 11000) + (80 * 4 * 0,7 * 0,95 * 0,95 * 110 * 11000) + (2 * 4 * 11000 * 110/0,79) * ((0,95 * 0,95 * 0,3 * 0,9 * 0,51) - 1,05 * (0,95 * 0,01 * 6,6)) = R\$ 307.402.665,75/ano$$

$$S(R; C) = \frac{R(1,01 * C) - R(C)}{R(C)} = 0,0100$$

$$S(R; pC) = \frac{R(1,01 * pC) - R(pC)}{R(pC)} = 0,0020$$

$$S(R; pB) = \frac{R(1,01 * pB) - R(pB)}{R(pB)} = 0,0080$$

$$S(R; V) = \frac{R(1,01 * V) - R(V)}{R(V)} = 0,0100$$

$$S(R; pBE) = \frac{R(1,01 * pBE) - R(pBE)}{R(pBE)} = 0,000023$$

Portanto, nota-se que a capacidade volumétrica instalada e a concentração de biomassa no meio são os fatores que mais impactam o resultado final do processo. Os preços de venda de biomassa seca e carotenoides têm uma influência menor, mas ainda assim são variáveis relevantes. Devido à baixa produção líquida de bioetanol por ano, o preço de venda de bioetanol é um fator que praticamente não interferiu na receita obtida.

6.1. Capacidade volumétrica instalada

A capacidade volumétrica instalada (V) é o parâmetro mais importante a ser considerado na implantação de uma biorrefinaria produtora de bioetanol com base em biomassa de microalgas. Na tabela 20 exibe-se diversos valores de produtividade de biomassa e de taxa interna de retorno de acordo com a capacidade volumétrica escolhida para a planta, expressa também na tabela na forma de número de fotobiorreatores instalados. Fixou-se os valores de pC, pB, C e concentração de carotenoides em R\$ 3.000/kg, R\$ 80/kg, 4,0 kg/m³ e 4,5ug/mg biomassa seca, respectivamente. Para o cálculo da TIR, estabeleceu-se que os custos variáveis oscilariam proporcionalmente com a variação da capacidade volumétrica instalada. Os custos fixos permaneceram inalterados, exceto pela quantidade de operários na etapa de cultivo, que fora estabelecida previamente em 1 funcionário para cada 50 fotobiorreatores.

Tabela 20. Variação da TIR de acordo com o número de fotobiorreatores usados

Número de fotobiorreatores (110 litros cada)	Capacidade volumétrica instalada (m ³)	Produtividade de biomassa na etapa de cultivo (toneladas/ano)	TIR
10.000	1.100	484	1%
20.000	2.200	968	11%
30.000	3.300	1.452	16%
40.000	4.400	1.936	19%
50.000	5.500	2.420	20%
60.000	6.600	2.904	22%
70.000	7.700	3.388	23%
80.000	8.800	3.872	24%
90.000	9.900	4.356	25%
100.000	11.000	4.840	25%

Nota-se que uma variação na quantidade de fotobiorreatores na ordem de 10.000 oscila a TIR em aproximadamente 1 ponto percentual, para mais ou para menos. Esta tabela exhibe, por exemplo, que é perfeitamente possível ter uma planta com metade da capacidade da planta escolhida para o cenário-base do trabalho, ou seja, com 50.000 fotobiorreatores instalados, com uma TIR aceitável, que no caso seria de 20%. Este dado é importante porque grande parte dos custos com investimento residem na aquisição e instalação de fotobiorreatores, sem contar o alto custo energético requerido por cada um, facilitando assim investimentos em uma biorrefinaria deste tipo com capacidades reduzidas.

A tabela 21 abaixo apresenta uma estimativa do orçamento capital necessário para cada escala de planta utilizada, de 10.000 até 100.000 fotobiorreatores de janela de 110 litros cada.

Tabela 21. Orçamento capital total de plantas com variados números de fotobiorreatores de janela de 110 litros cada

Número de fotobiorreatores	Capacidade volumétrica instalada (m ³)	Orçamento capital
10.000	1.100	R\$53.000.000,00
20.000	2.200	R\$86.000.000,00
30.000	3.300	R\$116.000.000,00
40.000	4.400	R\$145.000.000,00
50.000	5.500	R\$173.000.000,00
60.000	6.600	R\$201.000.000,00
70.000	7.700	R\$228.000.000,00
80.000	8.800	R\$255.000.000,00
90.000	9.900	R\$281.000.000,00
100.000	11.000	R\$307.000.000,00

Por esta tabela, nota-se que o investimento para a construção de uma planta de bioetanol a partir de biomassa de microalgas economicamente viável pode ser muito inferior ao orçamento capital calculado anteriormente. Por exemplo, aplicando-se os mesmos preços de venda dos produtos e utilizando-se as mesmas concentrações de biomassa e carotenoides, pode-se obter uma TIR satisfatória de 20% com uma capacidade instalada de 50.000 fotobiorreatores de 110 litros cada, com um investimento de aproximadamente 173 milhões de reais, muito inferior ao montante de 307 milhões de reais calculado para a planta com capacidade de 100.000 fotobiorreatores.

6.2. Concentração de biomassa

A concentração de biomassa (C) é também parâmetro mais importante para a biorrefinaria, já que o aumento da quantidade de biomassa implicaria em maior receitas com a venda dos produtos finais. Na tabela 22 ilustra-se diversos valores de produtividades de biomassa para uma planta com capacidade instalada de 11.000 m³,

como a usada neste estudo, em função da diferentes produtividades volumétricas diárias. A TIR para cada concentração de biomassa foi também estimada, considerando pB, pC e concentração de carotenoides fixados em R\$ 80,00/kg, R\$ 3.000,00/kg e 4,5ug/mg de biomassa seca, respectivamente.

Tabela 22. Capacidade instalada da planta medida em toneladas de biomassa seca por ano, de acordo com produtividade de biomassa adotada, além da TIR.

Concentração de biomassa (kg/m ³)	Capacidade instalada (toneladas de biomassa seca no cultivo/ano)	TIR
3,0	3.630	5%
3,5	4.235	16%
4,0	4.840	25%
4,5	5.445	33%
5,0	6.050	41%
6,0	7.260	55%

Capacidade instalada original inalterada, de 11.000 m³/dia

Observa-se que, nesta escala, uma variação da concentração final de biomassa em 0,5 kg/m³ promoveria uma oscilação de aproximadamente 9 pontos percentuais no valor da TIR, o que denota a extrema importância deste fator para a elaboração do projeto.

6.3. Preço de venda de biomassa seca

Baseada na análise de sensibilidade realizada, na tabela 23 exibe-se novas TIR para diversos preços de venda de biomassa seca, fixando o preço de venda de carotenoides em R\$ 3.000,00/kg e a concentração destes em 4,5ug/mg de biomassa seca, além de manter a concentração final de biomassa inalterada, igual a 4,0 kg/m³.

Tabela 23. TIR para diferentes preços de venda de biomassa seca

Preço de venda por kg de biomassa seca	R\$ 70	R\$ 80	R\$ 90
TIR	17%	25%	33%

Observa-se que o preço de venda de biomassa seca tem uma contribuição significativa para a viabilidade econômica da planta. A variação de preço em R\$ 10,00/kg promove uma oscilação de aproximadamente 8 pontos percentuais no valor da TIR, o que enfatiza a enorme importância do mercado consumidor para a biomassa seca.

6.4. Preço de venda de carotenoides

Esta variável, apesar de impactar a receita em menor escala que o preço de venda da biomassa seca, pode ser muito importante devido elevado valor dos carotenoides de microalgas em particular da *Chlorellasorokiniana*. Para esta análise, exibida na tabela 24, fatores como a concentração de biomassa (4,0 kg/m³), concentração de carotenoides (4,5 ug/mg de biomassa seca) e o preço da biomassa seca (R\$ 80/kg) permaneceram inalterados.

Tabela 24. TIR para diferentes preços de venda dos carotenoides

Preço de venda (R\$/kg)s	R\$ 1.000,00	R\$ 2.000,00	R\$ 3.000,00	R\$ 5.000,00	R\$ 10.000,00
TIR	14%	20%	25%	30%	59%

Pode-se observar que os valores da TIR estão acima do valor médio de TMA no Brasil (12%) em toda a faixa de preço divulgada para os carotenoides, que varia entre aproximadamente R\$ 1.000/kg e R\$ 10.000/kg. A variação de R\$ 1.000,00/kg no preço de carotenoides resulta em uma oscilação de aproximadamente 6 pontos percentuais na TIR.

6.5. Custos de produção de biomassa seca e carotenoides em diversos cenários

Baseando-se na Análise de Sensibilidade realizada, os custos de produção de biomassa seca e carotenoides foram reavaliados em função dos fatores de concentração de biomassa, preço de venda de biomassa seca, preço de venda de carotenoides e capacidade volumétrica instalada.

Para o cálculo do custo de produção de biomassa seca, usaram-se dois destes 3 aspectos: concentração final de biomassa e preço de venda de biomassa seca. Primeiramente, a produtividade foi avaliada. Foram considerados os seguintes cenários para produtividades variando entre 1,0 e 10,0 kg/m³, conforme apresentado pela tabela 25.

Tabela 25. Custos de produção por quilo de biomassa seca para uma planta com capacidade instalada de 11.000.000 litros/dia na etapa de cultivo

Concentração de biomassa (kg/m ³)	Custos de produção de biomassa seca (R\$/kg)
1,0	R\$ 219,18
2,0	R\$ 110,39
3,0	R\$ 74,12
4,0	R\$ 55,99
5,0	R\$ 45,11
6,0	R\$ 37,85
7,0	R\$ 32,67
10,0	R\$ 23,35

Observa-se pelos dados da tabela 25 que os custos de produção de biomassa seca neste projeto de uma planta produtora de bioetanol de microalgas estão muito acima do valor estimado por Chisti (2007), de US\$ 2,95/kg, e por Alabi et al. (2009), de US\$ 7,00/kg.

Para o custo de produção de carotenoides, foram avaliados os seguintes aspectos: concentração de carotenoides na biomassa e concentração de biomassa. Nesta análise, a capacidade instalada da planta continua fixa de 11.000.000 litros/dia na etapa de cultivo. Os teores de carotenoides escolhidos variaram entre 1,0 e 30,0 µg de carotenoides/mg de biomassa seca. As concentrações de biomassa analisadas variaram entre 2,0 e 10,0 kg/m³. Na tabela 26 resume-se os custos de produção nestes cenários. Observa-se ainda, que os custos de produção de carotenoides estão em uma faixa aceitável, dentro e até mesmo inferior à faixa de preços encontrada no mercado, sinalizando que uma biorrefinaria deste tipo com microalgas contendo teores de carotenoides acima de 2,0 µg/mg de biomassa seca é viável economicamente.

Tabela 26. Custos de produção por quilo de carotenoides em função da concentração na biomassa seca e com base na produtividade volumétrica diária de biomassa, em uma planta com capacidade de 11.000.000 litros/dia

Concentração de biomassa (kg/m³)

Concentração de carotenoides em carotenoides/mg biomassa seca	de 2	3	4	5	6	10
1,0	R\$1.570,90	R\$1.047,27	R\$785,45	R\$628,36	R\$523,63	R\$314,18
2,0	R\$785,45	R\$523,63	R\$392,72	R\$314,18	R\$261,82	R\$157,09
3,0	R\$523,63	R\$349,09	R\$261,82	R\$209,45	R\$174,54	R\$104,73
5,0	R\$314,18	R\$209,45	R\$157,09	R\$125,67	R\$104,73	R\$62,84
10,0	R\$157,09	R\$104,73	R\$78,54	R\$62,84	R\$52,36	R\$31,42
30,0	R\$52,36	R\$34,91	R\$26,18	R\$20,95	R\$17,45	R\$10,47

Conforme visto na tabela acima, o custo de produção de carotenoides é inferior a R\$ 1.000/kg nos cenários com concentrações de biomassa e carotenoides superiores a 2,0 kg/m³ e 2,0 ug/mg, respectivamente.

6.6. Estimativa de capacidade volumétrica instalada mínima para uma planta economicamente viável

Para uma planta ser economicamente viável, os custos de produção de seus produtos devem estar abaixo do preço cobrado pelo mercado dos produtos vendidos, tanto da biomassa seca quanto dos carotenoides. Para esta estimativa, deseja-se fixar a capacidade de produção de biomassa e o preço de venda de biomassa seca.

A capacidade de produção de biomassa foi estimada pelo gráfico do ponto de nivelamento, que sugeriu uma produção superior a 2.000 toneladas ao ano de biomassa pronta para venda. Para se estimar o preço de venda de biomassa seca, fez-se uma pesquisa de mercado, que constatou que o quilo de biomassa seca de *Chlorella sp.* é vendido entre R\$ 200 e R\$ 800, de acordo com consulta feita no Mercado Livre. Como provavelmente a biomassa vendida pela Internet já passou por etapas de tratamento não disponíveis nesta planta do presente estudo e supondo que tenha carotenoides em sua composição, o preço de venda a ser escolhido para a biomassa oriunda desta planta deve ser bem inferior ao preço praticado no mercado.

Supondo que o preço médio do quilo de *Chlorella* em pó pronta para venda seja de R\$ 500, estabelece-se um valor fixo de R\$ 100/kg como o preço de venda da biomassa da planta. Assim sendo, os custos de produção de biomassa devem ser inferiores a este valor para que a planta possa existir. Como já foi determinado que a produção mínima de biomassa pronta para venda deve ser de 2.000 toneladas por ano, a concentração mínima de biomassa a ser escolhida para atender esta demanda é de aproximadamente $2,7 \text{ kg/m}^3$, para uma capacidade volumétrica instalada de 11.000 m^3 . A concentração de carotenoides foi fixada em $2,0 \text{ ug/mg}$ de biomassa seca, já que foi mostrado na Tabela 26 que os custos de produção de carotenoides ficam abaixo de R\$ 1.000,00 para concentrações de biomassa e carotenoides acima de $2,0 \text{ kg/m}^3$ e $2,0 \text{ ug/mg}$, respectivamente. Com valores de concentração abaixo de $2,0 \text{ ug/mg}$ de biomassa seca, o custo de produção de carotenoides ficaria muito alto, muito provavelmente acima de R\$ 1.000,00/kg, algo que é indesejável neste projeto.

Assim, ficam definidos os parâmetros para a estimativa da capacidade instalada da planta, medida em número de fotobiorreatores de 110 litros cada. Esses estão descritos novamente abaixo:

- Produção de biomassa superior a 3.200 toneladas por ano na etapa de cultivo, o que resultaria em uma produção de biomassa pronta para venda superior a 2.000 toneladas por ano.
- Custos de produção de biomassa seca inferiores a R\$ 100/kg, valor que foi escolhido com o preço de venda deste produto.
- Custos de produção de carotenoides inferiores a R\$ 1.000,00/kg. Para isto, concentração mínima de carotenoides foi fixada no valor de $2,0 \text{ ug/mg}$ de biomassa seca, devido ao elevado custo de produção de carotenoides para valores de concentração abaixo deste número.

A figura 16 abaixo exhibe a capacidade instalada necessária para a produção de 2.000 toneladas de biomassa seca ao ano, de acordo com a concentração final de biomassa na etapa de cultivo. Os custos de produção de biomassa seca e carotenoides estão exibidos também.

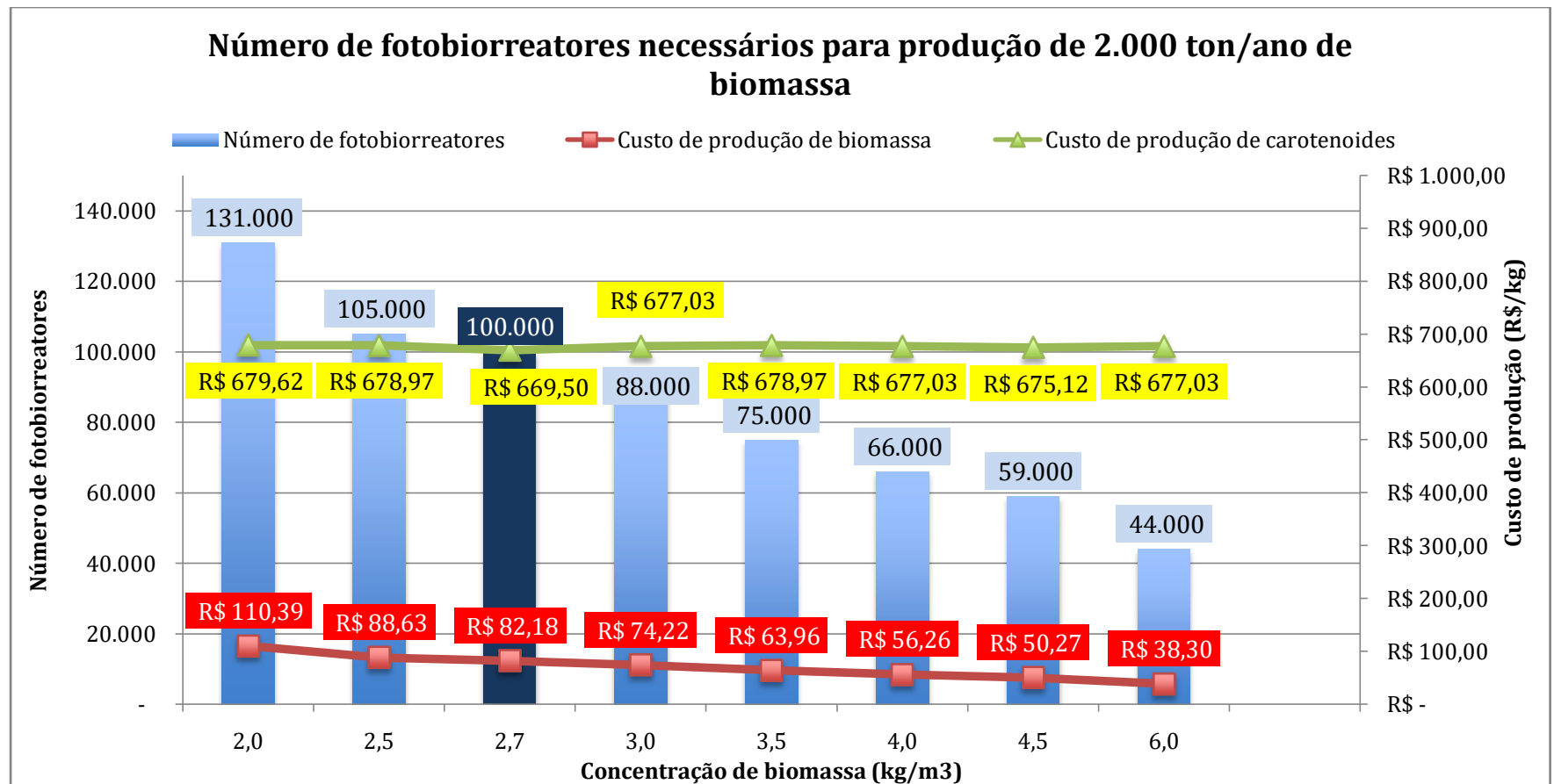


Figura 16. Número de fotobiorreatores necessários para produção de 2.000 ton/ano de biomassa para venda

Conforme evidenciado pela figura 16, os custos de produção de carotenoides e biomassa seca estão abaixo das metas fixadas anteriormente, exceto com o valor de concentração de biomassa igual a $2,0 \text{ kg/m}^3$, o que dá credibilidade à análise.

Para uma capacidade volumétrica instalada máxima é de 11.000 m^3 , ou seja, de 100.000 fotobiorreatores, as respectivas concentrações mínimas de biomassa e carotenoides a ser escolhidas são $2,7 \text{ kg/m}^3$ e $2,0 \text{ ug/mg}$ de biomassa seca, garantindo assim a produção de 2.000 toneladas de biomassa pronta para venda no ano.

7. CONCLUSÕES

Pode-se concluir que uma planta produtora de bioetanol a partir de biomassa de microalgas só pode ser economicamente viável com a venda de coprodutos de valor agregado como biomassa seca e carotenoides. O lucro excedente gerado pelas receitas destes produtos podem cobrir os prejuízos gerados pela planta de produção de bioetanol.

A planta avaliada, utilizando a microalga *Chlorellasorokiniana*, apresentou uma produção de 4.840 toneladas de biomassa na etapa de cultivo, com concentração de biomassa igual a 4,0 kg/m³, capacidade instalada de 11.000 m³ e concentração de carotenoides igual a 4,5ug/mg de biomassa seca, com custos de produção de R\$ 55,99/kg, R\$ 249,70/kg e R\$ 8,95/litro para biomassa seca, carotenoides e bioetanol, respectivamente. Neste caso, obteve-se uma TIR de 25% ao ano com preço de venda de carotenoides igual a R\$ 3.000,00/kg, preço de venda de biomassa seca igual a R\$ 80,00/kg e preço de venda de bioetanol igual a R\$ 2,00/litro. Os preços sugeridos estão próximos aos valores de mercado atual, conferindo credibilidade para o resultado desta análise.

O gráfico do ponto de nivelamento indicou que a planta tem maiores chances de ser viável economicamente com uma produção de biomassa na etapa de cultivo superior a 3.200 toneladas por ano, o que resultaria em uma produção de biomassa seca pronta para venda maior que 2.000 toneladas por ano. O ponto de nivelamento de produção de 1.301 toneladas de biomassa seca para venda representa cerca de 32% da produção prevista, indicando que a biorrefinaria deve ser de grande porte para ser competitiva.

Pela análise de sensibilidade, concluiu-se que os parâmetros mais sensíveis para a produtividade da planta são a capacidade volumétrica instalada, a concentração de biomassa na etapa de cultivo e o preço de venda de biomassa seca. Observou-se relações diretas entre a taxa interna de retorno e estes parâmetros. Nesta capacidade volumétrica instalada utilizada de 11.000 m³, uma variação na concentração de biomassa na etapa de cultivo de 0,50 kg/m³ foi capaz de oscilar a TIR em 9 pontos percentuais, enquanto uma variação no preço da biomassa seca em R\$ 10/kg pode promover uma variação significativa na TIR em até 8 pontos percentuais.

Para se analisar a capacidade mínima a ser instalada por uma planta, definiu-se os custos de produção de biomassa seca e carotenoides para variados valores de concentração. Estipulou-se como metas tornar os custos de produção de biomassa e carotenoides inferiores a R\$ 100/kg e R\$ 1.000,00/kg, respectivamente. Como já se havia definido pelo ponto de nivelamento que a produção deve ser superior a 3.200 toneladas por ano na etapa de cultivo, estabeleceu-se que os valores mínimos de concentração de biomassa e carotenoides seriam de 2,7 kg/m³ e 2,0ug/mg de biomassa seca, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AgBioForum 13(2): The Economics of Microalgae Oil. (2016). Agbioforum.org. Retrieved 15 November 2016, from <http://www.agbioforum.org/v13n2/v13n2a04-richardson.htm>
2. Alambiqueiro, C., Alambiqueiro, C., & completo, V. (2017). Dornas para Fermentação. Tachoealambique.blogspot.com.br. Retrieved 15 January 2017, from <http://tachoealambique.blogspot.com.br/2013/12/dornas-de-fermentacao.html>
3. Alice Web. Aliceweb.mdic.gov.br. N.p., 2017. Web. 23 Jan. 2017.
4. ANÁLISE DE INVESTIMENTOS. (2017). Portaldecontabilidade.com.br. Retrieved 20 January 2017, from <http://www.portaldecontabilidade.com.br/tematicas/analiseinvestimentos.htm>
5. Arctic sea ice is at a record low and could, in spurts, disappear within our lifetimes. (2016). Washington Post. Retrieved 5 December 2016, from https://www.washingtonpost.com/news/capital-weather-gang/wp/2016/10/27/arctic-sea-ice-is-at-a-record-low-and-could-in-spurts-disappear-within-our-lifetimes/?utm_term=.6d8f3ad4a8a7
6. Attard, T., McElroy, C., & Hunt, A. (2015). Economic Assessment of Supercritical CO₂ Extraction of Waxes as Part of a Maize Stover Biorefinery. *International Journal of Molecular Sciences*, 16(8), 17546-17564. <http://dx.doi.org/10.3390/ijms160817546>
7. Bai, F., Anderson, W., & Moo-Young, M. (2008). Ethanol fermentation technologies from sugar and starch feedstocks. *Biotechnology Advances*, 26(1), 89-105. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.09.002>
8. BBC Brasil - Notícias - Entenda a variação nos preços do petróleo. (2016). Bbc.com. Retrieved 9 December 2016, from http://www.bbc.com/portuguese/noticias/2009/01/090123_entenda_petroleo_tc2.shtml
9. Biodiesel de microalgas: avanços e desafios. (2016).
10. Bioetanol. Obtenção e utilização do bioetanol - Brasil Escola. (2016). Brasil Escola. Retrieved 5 December 2016, from <http://brasilecola.uol.com.br/geografia/bioetanol.htm>

11. Biorrefinaria: futuro para o completo aproveitamento da biomassa de cana. (2016).Novacana.com. Retrieved 18 December 2016, from <https://www.novacana.com/estudos/biorrefinaria-futuro-para-o-completo-aproveitamento-da-biomassa-de-cana-241013/>
12. Brown, Steve and Steve Brown. "Whither Oil Prices?". The Steam Oil Production Company ltd. N.p., 2017. Web. 23 Jan. 2017.
13. Budzianowski, W. (2016). High-value low-volume bioproducts coupled to bioenergies with potential to enhance business development of sustainable biorefineries. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.260>
14. Carotenoids Market worth 1.53 Billion USD by 2021. (2017). Marketsandmarkets.com. Retrieved 18 January 2017, from <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/carotenoid.asp>
15. Carrington, D. (2016). 2016 will be the hottest year on record, UN says. the Guardian. Retrieved 5 December 2016, from <https://www.theguardian.com/environment/2016/nov/14/2016-will-be-the-hottest-year-on-record-un-says>
16. Chen, C., Yeh, K., Aisyah, R., Lee, D., & Chang, J. (2011). Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technology*,102(1), 71-81. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.159>
17. Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion And Management*, 51(7), 1412-1421. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.01.015>
18. Chisti, Y. (2007). Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances*, 25(3), 294-306. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biotechadv.2007.02.001>
19. Colorful World Of Microbes: Carotenoids And Their Applications : Figure 2".Hindawi.com. N.p., 2017. Web. 23 Jan. 2017.
20. ecoduna|Microorganisms: Products and Sectors. (2016). Ecoduna.com. Retrieved 5 December 2016, from <https://www.ecoduna.com/produkte-und-branchen.html?lang=en>
21. Espinosa, Lauren et al. "As microalgas como fonte de produção de biodiesel: discussão de sua viabilidade". N.p., 2017. Print.

22. Fu, C., Hung, T., Chen, J., Su, C., & Wu, W. (2010). Hydrolysis of microalgae cell walls for production of reducing sugar and lipid extraction. *Bioresource Technology*, 101(22), 8750-8754. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.100>
23. Ho, S., Huang, S., Chen, C., Hasunuma, T., Kondo, A., & Chang, J. (2013). Bioethanol production using carbohydrate-rich microalgae biomass as feedstock. *Bioresource Technology*, 135, 191-198. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.015>
24. House, Christopher L. "Fixed Costs And Long-Lived Investments". *Journal of Monetary Economics* 68 (2014): 86-100. Web.
25. http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf. (2015) (1st ed.).
26. http://www.mackenzie.br/fileadmin/FMJRJ/coordenadoria_pesq/Revista_CADE_7/giro.doc
27. International Energy Outlook 2016-World energy demand and economic outlook - Energy Information Administration. (2017). Eia.gov. Retrieved 9 January 2017, from <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/world.cfm>
28. JASCO Brasil (2016) (1st ed.). Retrieved from http://www.jasco.com.br/imagem/catalogos/hplc_pu2086_2087.pdf
29. Kobayashi, N., Noel, E., Barnes, A., Watson, A., Rosenberg, J., Erickson, G., & Oyler, G. (2013). Characterization of three *Chlorella sorokiniana* strains in anaerobic digested effluent from cattle manure. *Bioresource Technology*, 150, 377-386. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.10.032>
30. Macías-Sánchez, M., Mantell Serrano, C., Rodríguez Rodríguez, M., Martínez de la Ossa, E., Lubián, L., & Montero, O. (2008). Extraction of carotenoids and chlorophyll from microalgae with supercritical carbon dioxide and ethanol as cosolvent. *Journal Of Separation Science*, 31(8), 1352-1362. <http://dx.doi.org/10.1002/jssc.200700503>
31. Magro et al. (2016) - Produção de Bioetanol Utilizando Microalgas: Uma Revisão. (2016).
32. Market study: Global biofuels market to grow to \$246bn by 2024 | Biofuels International. (2016). Biofuels International. Retrieved 5 December 2016, from http://biofuels-news.com/display_news/10395/market_study_global_biofuels_market_to_grow_to_246bn_by_2024/

33. Maul, A., Wasicky, R., & Bacchi, E. (1996). Extração por fluido supercrítico. *Revista Brasileira De Farmacognosia*, 5(2).
<http://dx.doi.org/10.1590/s0102-695x1996000200006>
34. *Microalgae: An emerging source of energy based bio-products and a solution for environmental issues.* (2016) (1st ed.).
35. *Microalgas, produtos e aplicações.* (2016). Retrieved 3 November 2016, from
36. Mohamad, S. & Raman, R. (2012). Astaxanthin Production by Freshwater Microalgae *Chlorella sorokiniana* and Marine Microalgae *Tetraselmis* sp. *Pakistan Journal Of Biological Sciences*, 15(24), 1182-1186.
<http://dx.doi.org/10.3923/pjbs.2012.1182.1186>
37. Moinho De Bolas/Seixos - Metso. Metso. N.p., 2017. Web. 23 Jan. 2017.
38. Nauss, Robert M. "On The Use Of Internal Rate Of Return In Linear And Integer Programming". *Operations Research Letters* 7.6 (1988): 285-289. Web.
39. O Que É TIR (Taxa Interna De Retorno)? - WR|Prates. WR|Prates. N.p., 2017. Web. 24 Jan. 2017.
40. Os desafios do biodiesel de algas. (2016). *Biodieselbr.com*. Retrieved 3 November 2016, from
<https://www.biodieselbr.com/noticias/colunistas/gazzoni/desafios-biodiesel-algas-060212.htm>
41. Página Inicial. Secretaria da Receita Federal do Brasil. N.p., 2017. Web. 24 Jan. 2017.
42. Panis, G. & Carreon, J. (2016). Commercial astaxanthin production derived by green alga *Haematococcus pluvialis*: A microalgae process model and a techno-economic assessment all through production line. *Algal Research*, 18, 175-190.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.007>
43. Perlingeiro, C. (2005). *Engenharia de processos* (1st ed.). São Paulo : EdgardBlücher.
44. PRADO, J., ASSIS, A., MARÓSTICA-JÚNIOR, M., & MEIRELES, M. (2010). Manufacturing cost of supercritical-extracted oils and carotenoids from amazonian plants. *Journal of Food Process Engineering*, 33(2), 348-369.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1745-4530.2008.00279>
45. Prado, J., Dalmolin, I., Carareto, N., Basso, R., Meirelles, A., & Vladimir Oliveira, J. et al. (2012). Supercritical fluid extraction of grape seed: Process scale-up, extract chemical composition and economic evaluation. *Journal Of*

Food Engineering, 109(2), 249-257.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.10.007>

46. Produção de biomassa por microalgas: Fotobiorreatores x Sistema de lagoas Raceway. (2016). InfoEscola. Retrieved 23 December 2016, from <http://www.infoescola.com/biologia/producao-de-biomassa-por-microalgas-fotobiorreatores-x-sistema-de-lagoas-raceway/>
47. Protein Ingredient Market Size, Share | Industry Report 2024". Gminsights.com. N.p., 2017. Web. 23 Jan. 2017.
48. Ramos de Holanda, L. & de Sousa Ramos, F. (2011). O CULTIVO DE MICROALGAS PARA A GERAÇÃO DE ELETRICIDADE. VII Congresso Nacional De Excelência Em Gestão.
49. Rosenberg, J., Oyler, G., Wilkinson, L., & Betenbaugh, M. (2008). A green light for engineered algae: redirecting metabolism to fuel a biotechnology revolution. *Current Opinion In Biotechnology*, 19(5), 430-436. <http://dx.doi.org/10.1016/j.copbio.2008.07.008>
50. Rudd, Dale F and Charles C Watson. *Strategy Of Process Engineering*. 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 1968. Print.
51. Santos, J., Souto-Maior, A., Gouveia, E., & Martín, C. (2010). comparação entre processos em SHF e em SSF de bagaço de cana-de-açúcar para a produção de etanol por *Saccharomyces cerevisiae*. Retrieved 16 January 2017, from
52. Scholz, M., Riley, M., & Cuello, J. (2013). Acid hydrolysis and fermentation of microalgal starches to ethanol by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Biomass And Bioenergy*, 48, 59-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.10.026>
53. Sierra, E. et al. "Characterization Of A Flat Plate Photobioreactor For The Production Of Microalgae". *Chemical Engineering Journal* 138.1-3 (2008): 136-147. Web.
54. Wan, M., Liu, P., Xia, J., Rosenberg, J., Oyler, G., & Betenbaugh, M. et al. (2011). The effect of mixotrophy on microalgal growth, lipid content, and expression levels of three pathway genes in *Chlorella sorokiniana*. *Applied Microbiology And Biotechnology*, 91(3), 835-844. <http://dx.doi.org/10.1007/s00253-011-3399-8>
55. www.afdc.energy.gov/data (2015)