

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO
MODULAR DE BIODIESEL DE MICROALGAS**

São Bernardo do Campo

2020

BRUNO ALVES DE OLIVEIRA

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO MODULAR
DE BIODIESEL DE MICROALGAS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Centro
Universitário FEI para obtenção do título de Mestre
em Engenharia Mecânica. Orientado pela Prof.^a Dra.
Cláudia Aparecida de Mattos.

São Bernardo do Campo

2020

Oliveira, Bruno Alves de.

Análise da viabilidade técnica e econômica da produção modular de biodiesel de microalgas / Bruno Alves de Oliveira. São Bernardo do Campo, 2020.

75 f. : il.

Dissertação - Centro Universitário FEI.

Orientadora: Prof.^a Dra. Cláudia Aparecida de Mattos.

1. Análise Técnica e Econômica. 2. Biocombustíveis. 3. Simulação Monte Carlo. I. Mattos, Cláudia Aparecida de, orient. II. Título.

Elaborada pelo sistema de geração automática de ficha catalográfica da FEI com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).



APRESENTAÇÃO DE DISSERTAÇÃO
ATA DA BANCA EXAMINADORA

Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu em Engenharia Mecânica

Mestrado

PGM-10

Aluno: Bruno Alves de Oliveira

Matrícula: 218104-8

Título do Trabalho: Análise da viabilidade técnica e econômica da produção modular de biodiesel de microalgas.

Área de Concentração: Produção

Orientador: Profª Drª Claudia Aparecida de Mattos

Data da realização da defesa: 20/02/2020

ORIGINAL ASSINADA

Avaliação da Banca Examinadora:

São Bernardo do Campo, / / .

MEMBROS DA BANCA EXAMINADORA	
Profª Drª Claudia Aparecida de Mattos	Ass.: _____
Profª Drª Fernanda Cristina Vianna	Ass.: _____
Prof. Dr. Jose Juan Barrera Alba	Ass.: _____

A Banca Julgadora acima-assinada atribuiu ao aluno o seguinte resultado:

APROVADO

REPROVADO

VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO

APROVO A VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO EM QUE FORAM INCLUÍDAS AS RECOMENDAÇÕES DA BANCA EXAMINADORA

Aprovação do Coordenador do Programa de Pós-graduação

Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

Dedico este trabalho a todos os professores, pois foi através deles que obtive o conhecimento necessário à realização deste trabalho e, certamente, também através deles, os pesquisadores conseguiram elaborar suas pesquisas que serviram aqui como referência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todo o aprendizado e vitórias adquiridos durante esta jornada.

À minha esposa Manuela e minha filha Clarice pelo amor, paciência e sacrifício. Essa conquista mais do que minha, é de vocês.

Aos meus pais, Glauco e Rose pelo apoio e por nunca me deixarem desistir e acreditarem em mim.

Um especial agradecimento à Prof.^a Dra. Claudia Mattos pelos ensinamentos, pela preciosa orientação, por todo o conhecimento compartilhado e oportunidades.

Aos professores da Unifesp, Flávia, Tatiana e Eduardo pelo incentivo, disponibilidade e entusiasmo com que sempre demonstraram.

Ao meu amigo Anthony Diniz que me incentivou a continuar e me deu força para suportar os momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Juan Alba pelas dicas, sugestões que auxiliaram na melhora do trabalho e por aceitar fazer parte da banca examinadora.

A todos os professores e funcionários da FEI que passaram pela minha pós-graduação, meu grande obrigado. Grande parte desse trabalho também é de vocês.

Agradeço também aos que não foram citados, mas que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta importante etapa acadêmico-profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Let me bring you songs from the wood:
to make you feel much better than you could
know.

Dust you down from tip to toe.

Show you how the garden grows.

Hold you steady as you go.”

Jethro Tull

RESUMO

As microalgas são organismos unicelulares de rápido crescimento e vem sendo amplamente estudadas para a produção de biodiesel. O cultivo de microalgas não requer terra agricultável e pode ser feito utilizando águas residuárias. Após uma extensa revisão bibliográfica, observou-se que a grande parte dos estudos econômicos sobre a produção do biodiesel de microalgas utiliza uma contabilidade tradicional determinística e estima a produção em larga escala, geralmente com processos de biorrefinaria, requerendo altos investimentos e tempo considerável para a operação. Este trabalho conduziu uma análise econômica estocástica para um cenário de produção de biodiesel em pequena escala, aplicando técnicas de Simulação Monte Carlo (SMC) como meio de integrar a análise de risco ao processo de avaliação econômica. Paralelamente, foi proposto um modelo econômico como ferramenta para a tomada de decisões, elaborado a partir da construção detalhada das despesas de capital ou investimento (Capex) e das despesas operacionais (Opex), custeio de cada etapa do processo produtivo e simulação econômica multicenário com um comparativo a partir de dados secundários de produtividade de outras microalgas. Para reforçar a análise, foram utilizadas técnicas de investimento em Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR), e análise de sensibilidade para se identificar as variáveis que exercem maior impacto na produção do biodiesel e conseqüentemente no fluxo de caixa. Este estudo mostra que a produção modular do biodiesel em pequena escala é financeiramente inviável dadas as condições em 2019 e que o maior ofensor econômico para este tipo de projeto é o Capex. No entanto, o trabalho amplia a discussão sobre os resultados das simulações, abordando aspectos econômicos ainda pouco discutidos nos estudos econômicos sobre o tema, tais como o impacto financeiro da adequação do biodiesel ao padrão brasileiro de qualidade regido pela norma RANP 45, os créditos de carbono e as políticas de incentivos e subsídios visando facilitar a viabilização de projetos de baixo impacto ambiental.

Palavras-chave: Análise Técnica e Econômica. Biocombustíveis. Simulação Monte Carlo.

ABSTRACT

Microalgae are fast-growing single-celled organisms and has been widely studied for biodiesel production. The cultivation of microalgae does not require agricultural land and can be done using wastewater. After an extensive bibliographic review, it was observed that most economic studies on microalgae biodiesel production use a deterministic traditional accounting and estimates large-scale production, usually with large-scale production processes, usually with large-scale processes of biorefinery, requiring high investments and considerable time for the operation. This study conducted a stochastic economic analysis for a small-scale biodiesel production scenario, applying Monte Carlo Simulation (MCS) techniques as a means of integrating risk analysis into the economic evaluation process. At the same time, an economic model was proposed as a tool for decision making, elaborated from the detailed construction of Capital Expenditure (Capex) and Operational Expenditure (Opex), costing each stage of the production process and multiscenario economic simulation. To reinforce the analysis, Net Present Value NPV and Intern Rate of Return (IRR) investment techniques were used, and sensitivity analysis to identify the variables that have the greatest impact on biodiesel production and consequently on cash flow. This study shows that the modular production of small-scale biodiesel is financially unfeasible given the conditions in 2019 and that the largest economic offender for this type of project is Capex. However, the work expands the discussion on the results of simulations, addressing economic aspects still little discussed in economic studies on the subject, such as the financial impact of biodiesel adequacy to the Brazilian quality standard governed by RANP 45, carbon credits and incentive and subsidy policies to facilitate the feasibility of low environmental impact projects.

Keywords: Technic and economic analysis. Biofuels. Monte Carlo Simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ilustração esquemática do potencial de aplicação das microalgas.....	15
Figura 2 – Matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil.....	17
Figura 3 – Processo conceitual para a produção de biodiesel de microalgas	18
Figura 4 – Exemplos de microalgas com potencial para biocombustíveis.....	19
Figura 5 – Sistema aberto de cultivo de microalgas.....	21
Figura 6 – Fotobiorreatores de placas planas	22
Figura 7 – Fotobiorreator em colunas	23
Figura 8 – Fotobiorreatores tubulares.....	24
Figura 9 – Fotobiorreatores Soft-frame	25
Figura 10 – Fotobiorreator híbrido	26
Figura 11 – Biomassa sendo recolhida após centrifugação	28
Figura 12 – Reação de transesterificação básica	31
Figura 13 – Número de artigos publicados por ano	34
Figura 14 – Mapa de termos das principais palavras nos artigos a partir de 2012.....	35
Figura 15 – Fluxograma do modelo de avaliação de risco	41
Figura 16 – Processo de produção de biodiesel.....	45
Figura 17 – Unidade modular de produção de biodiesel de microalgas.....	48
Figura 18 – Preços do petrodiesel ao consumidor final (média Brasil), em R\$/L	50
Figura 19 – Modelo econômico de produção de biodiesel algal	51
Figura 20 – Análise de sensibilidade do modelo econômico	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as plantas oleaginosas e as microalgas	16
Tabela 2 – Teor lipídico das microalgas.....	20
Tabela 3 – Fatores de decisão dos sistemas produtivos de microalgas	26
Tabela 4 – Padrões de qualidade do biodiesel	32
Tabela 5 – Entradas do modelo econômico.....	48
Tabela 6 – Variáveis de despesas de capital (Capex).....	49
Tabela 7 – Variáveis de despesas operacionais (Opex).....	50
Tabela 8 – Dados do Modelo.....	55
Tabela 9 – Produtividade de diferentes tipos de algas.....	58
Tabela 10 Suplementar – Dados operacionais do sistema de cultivo de microalgas	71
Tabela 11 Suplementar – Premissas e entradas do modelo econômico	72
Tabela 12 Suplementar – Despesas de capital (Capex).....	73
Tabela 13 Suplementar – Despesas operacionais (Opex).....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
Capex	<i>Capital Expenditure</i> (despesas de capital ou investimento)
FAME	<i>Fatty Acid Methyl Esters</i> (ésteres metílicos de ácidos graxos)
Opex	<i>Operational expenditure</i> (despesas operacionais)
PBR	<i>Photobioreactor</i> (fotobiorreator)
pH	Potencial hidrogeniônico
PUFA	<i>Poly Unsaturated Fatty Acids</i> (ácidos graxos poli-insaturados)
SMC	Simulação Monte Carlo
TIR	Taxa Interna de Retorno
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	ASPECTOS TÉCNICOS DA PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DA BIOMASSA DE MICROALGAS	15
2.1.1	Seleção da microalga e meio de cultivo	198
2.1.2	Técnicas de cultivo	19
2.1.2.1	<i>Sistema aberto</i>	20
2.1.2.2	<i>Fotobiorreator de placas planas</i>	21
2.1.2.3	<i>Fotobiorreator em colunas</i>	22
2.1.2.4	<i>Fotobiorreator tubular</i>	23
2.1.2.5	<i>Fotobiorreator Soft-frame</i>	24
2.1.2.6	<i>Fotobiorreator híbrido</i>	25
2.1.3	Colheita	27
2.1.4	Extração de lipídios	29
2.1.4.1	<i>Produção de biodiesel: reação de transesterificação</i>	30
2.1.4.2	<i>Padrões de qualidade do biodiesel</i>	31
2.2	RENOVABIO E POLÍTICAS NACIONAIS PARA OS BIOCOMBUSTÍVEIS.....	33
2.3	ESTUDOS TÉCNICO-ECONÔMICOS	34
2.4	ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE AVALIAÇÃO ECONÔMICA	40
3	METODOLOGIA	45
3.1	DESCRIÇÃO DO SISTEMA	45
3.1.1	Etapa 1 - Cultivo	46
3.1.2	Etapa 2 - Colheita e Secagem	46
3.1.3	Etapa 4 - Pré-tratamento	47
3.1.4	Etapa 3 - Extração de lipídios	47
3.1.5	Etapa 4 - Reação de transesterificação	47
3.1.5	Sistema modular	47
3.2	MODELO ECONÔMICO.....	48
4	RESULTADOS	53
4.1	AVALIAÇÃO TÉCNICA	53
4.2	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	54

5	DISCUSSÃO	56
5.1	CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS	59
5.2	CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS.....	59
6	CONCLUSÕES	60
	REFERÊNCIAS	61
	ANEXO A – DADOS SUPLEMENTARES	70

1 INTRODUÇÃO

A demanda mundial por água potável e energias limpas é crescente. O aquecimento global e a poluição das águas são fatores que intensificarão as restrições ambientais e as imposições legais nas próximas décadas. A introdução de práticas sustentáveis nos modelos de negócios, não apenas traz vantagens competitivas às empresas, como também é positiva ao meio ambiente. Uma alternativa à melhoria da qualidade da água, bem como ao elevado consumo de combustíveis fósseis e emissões de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera, é o uso dos recursos renováveis, em especial a biomassa de microalgas (RÖTTIG *et al.*, 2010; GALLAGHER, 2011; CHISTI, 2013).

As microalgas são organismos unicelulares de rápido crescimento e eficientes fixadores de CO₂ atmosférico, cujo cultivo não necessita de grandes extensões de terra. A literatura pertinente mostra o potencial de utilização de microalgas na redução de nutrientes (p.ex. nitrogênio, fósforo e potássio) em sistemas de tratamento de águas residuárias, promovendo assim o tratamento terciário dessa água (MARTINEZ *et al.*, 2000; DE-BASHAN *et al.*, 2002; ASLAN; KAPDAN, 2006; LI *et al.*, 2010, NAGABALAJI *et al.*, 2017).

Estudos também relatam o potencial de produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas, uma vez que estes organismos podem armazenar grandes quantidades de lipídios em suas células (CHISTI, 2007a; BRENNAN; OWENDE, 2010; HALIM; DANQUAH; WEBLEY, 2012; MILANO *et al.*, 2016). A produção de biogás, rico em metano (CH₄), a partir da digestão anaeróbica da biomassa, é considerada uma outra alternativa, integrando-se o biogás a outros processos como o tratamento de água ou à produção de biodiesel (SIALVE; BERNET; BERNARD, 2009; WARD; LEWIS; GREEN, 2014; GONZALEZ-FERNANDEZ; SIALVE; MOLINUEVO-SALCES, 2015). Outros compostos presentes na biomassa algal, como carboidratos, proteínas, vitaminas, minerais, carotenoides, ômega-3 de longa cadeia, fitonutrientes etc., podem ser interessantes do ponto de vista industrial (CHEN *et al.*, 2016).

Apesar dos biocombustíveis a partir de microalgas serem promissores, ainda existem obstáculos que precisam ser superados. A integração dos processos, a exemplo da digestão anaeróbica e do tratamento de efluentes, permite a redução de custos, ampliando a competitividade no mercado frente aos baixos preços dos combustíveis fósseis (JANKOWSKA; SAHU; OLESKOWICZ-POPIEL 2017).

Neste contexto sobre os biocombustíveis, as questões técnicas vêm sendo amplamente exploradas, mas destaca-se também os estudos econômicos da produção de biocombustíveis os quais vêm crescendo nos últimos anos, evidenciando a importância da abordagem não só

técnica mas também econômica, porém autores como Batan, Graff e Bradley (2016), Chu *et al.* (2017) e Ou-Yang *et al.* (2018) relatam lacunas ou limitações importantes que necessitam serem exploradas e que foram consideradas no presente trabalho.

Batan, Graff e Bradley (2016) mostram que a maioria dos estudos de avaliação econômica apresentam uma contabilidade tradicional de custos e investimentos de capital, onde os resultados entre estes estudos são divergentes e de difícil cruzamento de informações de modo que os custos são considerados como constantes. Isto é reforçado por Santibañez-Aguilar *et al.* (2016), cuja abordagem foi realizada de maneira probabilística.

Chu *et al.* (2017), também avalia a viabilidade financeira da produção de combustível renovável. No entanto, a avaliação não é relacionada às microalgas e sim plantas oleaginosas. A análise Monte Carlo foi utilizada para avaliar a robustez do desempenho financeiro em termos de Valor Presente Líquido (VPL) e considerando as principais incertezas. Xia e Tang (2017) mostra a necessidade da utilização de modelos estocásticos para as análises de viabilidade econômica, pois parâmetros constantes fogem à realidade.

Ou-Yang *et al.* (2018) correlacionam a avaliação econômica com a escala de biorrefinaria, que é um outro aspecto que pode ser considerado, tal que obviamente quanto maior o seu porte, são necessários maiores investimentos de capital e de tempo para a operação.

A sustentabilidade de processos descentralizados e em menor escala é maior quando comparados aos processos centrais de larga escala, isto deve-se à possibilidade de reutilização local e direta de água e nas reduções na emissão de CO₂ através da menor movimentação de transporte (BRUINS; SANDERS, 2012, ABATE, 2015; CLAUSER, 2018).

Portanto, o objetivo deste trabalho é avaliar a viabilidade econômica da escala modular da produção de biodiesel a partir de microalgas através do desenvolvimento de um modelo econômico probabilístico para o processo de tomada de decisão e um estudo comparativo a partir de dados secundários de produtividade de outras algas.

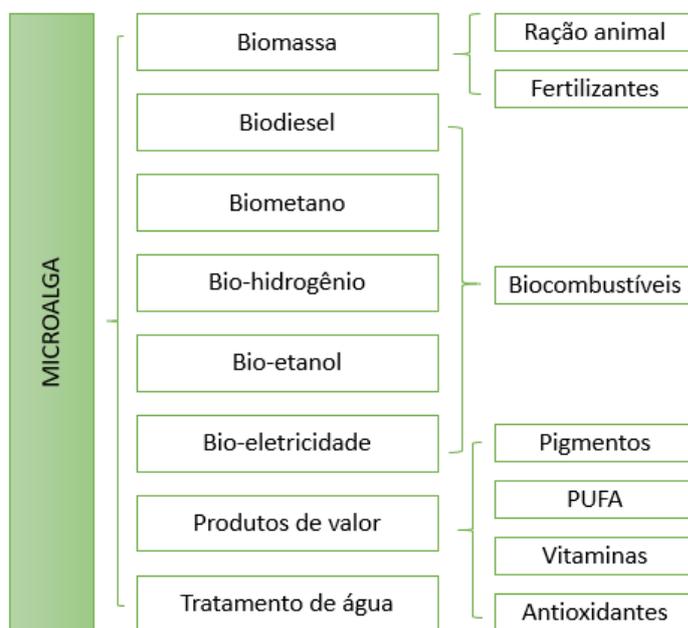
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesse capítulo são apresentados os conceitos relevantes referentes a esta pesquisa: os aspectos técnicos da produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas; os estudos econômicos da produção de biodiesel de microalgas e os conceitos de avaliação econômica, trazendo a discussão para o contexto dos riscos.

2.1 ASPECTOS TÉCNICOS DA PRODUÇÃO DE BODIESEL A PARTIR DA BIOMASSA DE MICROALGAS

As microalgas são organismos unicelulares capazes de produzir rapidamente grandes quantidades de biomassa, em pequenas áreas e com inúmeras aplicações, conforme revisão realizada por Enamala *et al.* (2018). A Figura 1, a seguir, é uma ilustração esquemática do potencial de aplicação das microalgas.

Figura 1 – Ilustração esquemática do potencial de aplicação das microalgas



Fonte: Autor “adaptado de” Enamala *et al.*, 2018, p. 63

A partir da biomassa das microalgas, que *in natura* pode servir de insumo animal (ração) e fertilizante, é possível obter biodiesel, biometano (biogás rico em metano), bio-hidrogênio, bio-etanol e bio-eletricidade. Além disso, as algas promovem parte do tratamento de águas

residuárias e podem também servir para a extração de produtos de alto valor agregado, tais como vitaminas, antioxidantes e PUFA (ácidos graxos poli-insaturados).

As microalgas também são precursoras de vários outros bioprodutos de alto valor que já estão sendo comercializados, por exemplo o β -caroteno, Astaxantina, Luteína, Ficobiliproteína, β -glucano, Ácido docosaexaenoico (DHA), Ácido eicosapentaenoico (EPA), anticorpos, hormônios, Clorofila, vitaminas, minerais e suplementos alimentares (KOLLER, 2015).

A produtividade das microalgas em termos de biomassa é expressivamente superior à de qualquer outra planta terrestre. A Tabela 1 é uma comparação entre as principais plantas oleaginosas e as microalgas, com base no trabalho de revisão realizado por Sajjadi *et al.* (2018).

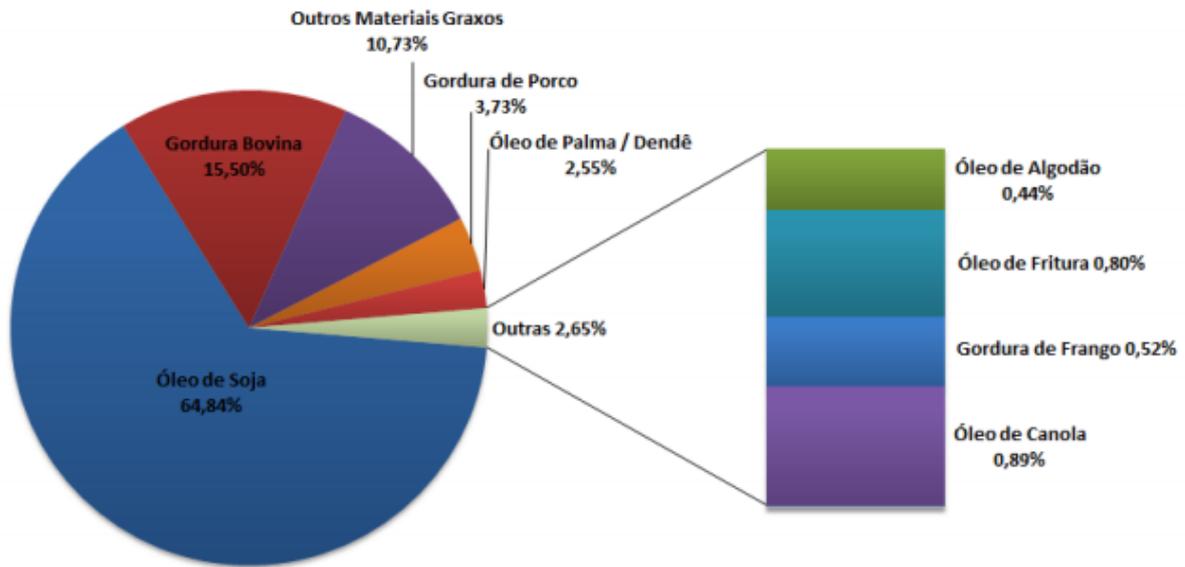
Tabela 1 – Comparativo entre as plantas oleaginosas e as microalgas

Planta oleaginosa	Biodiesel (L hectare ⁻¹)	Referência
Óleo de Palma (<i>Elaeis guineensis</i>)	5.706	Matsimbe <i>et al.</i> (2015)
Soja (<i>Glycine max</i>)	430	Vattem e Maitin (2015)
Milho (<i>Zea mays</i>)	168	Vattem e Maitin (2015)
Microalga de baixo teor de óleo	58.696	Moreau e Kamal-Eldin (2015)
Microalga de médio teor de óleo	97.796	Moreau e Kamal-Eldin (2015)
Microalga de alto teor de óleo	136.895	Moreau e Kamal-Eldin (2015)

Fonte: Sajjadi *et al.*, 2018, p. 201

No entanto, no Brasil, além da biomassa vegetal (soja, palma, dendê, algodão e canola), o biodiesel é extraído de gordura animal (bovina, suína e frango), como na Figura 2.

Figura 2 – Matérias-primas para produção de biodiesel no Brasil

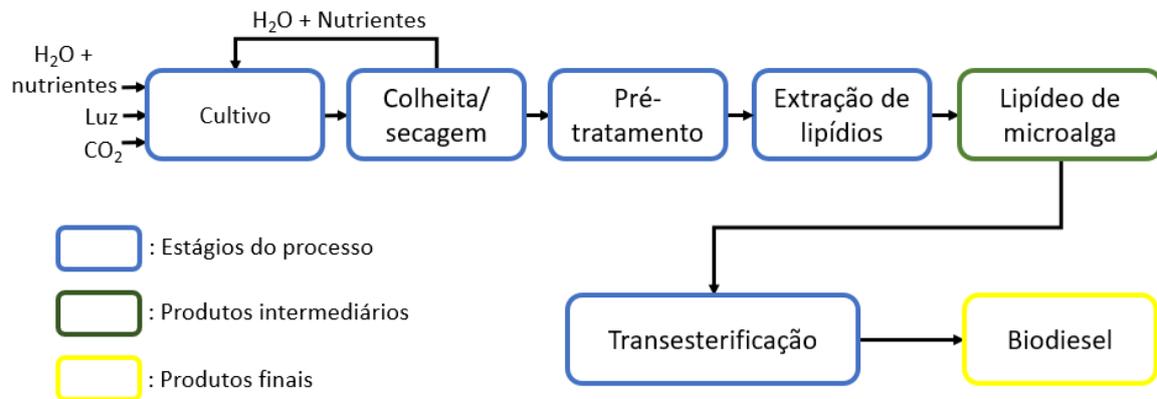


Fonte: ANP, 2017

O processo conceitual para a produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas é da seguinte forma, ilustrado na Figura 3:

- na fase de cultivo, água, nutrientes inorgânicos, CO₂ e luz são fornecidos às microalgas;
- na fase de colheita/secagem, as células suspensas no meio líquido são separadas da água e dos nutrientes residuais, que são então reciclados para a fase inicial de produção de biomassa;
- o Pré-tratamento consiste numa etapa adicional em que se realiza a quebra (lise) da parede celular para facilitar a extração dos lipídios (óleo);
- na extração de lipídios, o lipídio de microalga (óleo) presente na biomassa é recuperado para posterior conversão em biodiesel através da reação de transesterificação.

Figura 3 – Processo conceitual para a produção de biodiesel de microalgas



Fonte: Autor “adaptado de” Kang, Heo e Lee, 2019, p. 945

2.1.1 Seleção da microalga e meio de cultivo

O cultivo de microalgas, bem como o de microrganismos em geral requer, antes de tudo, o seccionamento adequado das estirpes de microalgas que possuem as características desejadas ao processo produtivo.

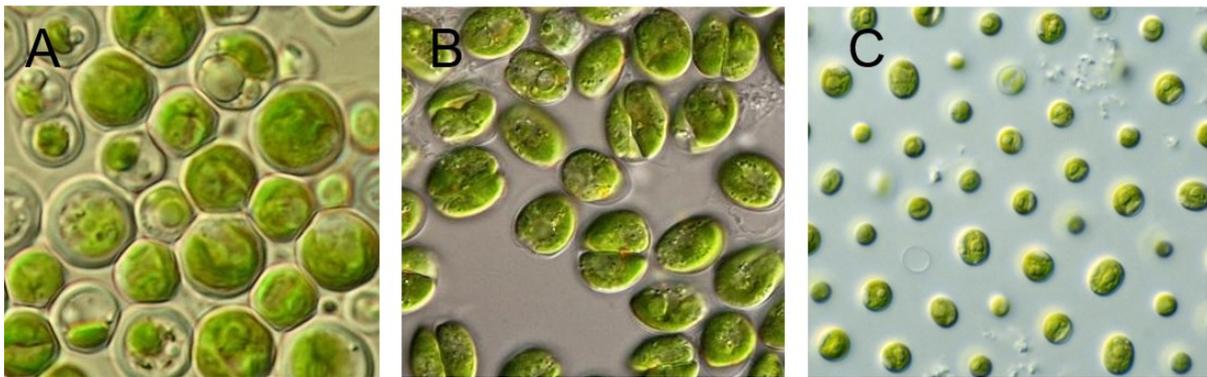
Para a seleção adequada destas estirpes, é importante considerar os aspectos econômicos relevantes como a disponibilidade da cepa da espécie desejada (facilidade de obtenção), custos de aquisição da cepa e da manutenção do cultivo (meios de cultivo, condições de cultivo, etc.), além de aspectos biológicos ou metabólicos analisados simultaneamente pois interferem diretamente nos custos da produção, tais como (ANDRADE; COLOZZI FILHO, 2014):

- a) exigência nutricional da cepa, preferencialmente com meios de cultivos de baixo custo;
- b) resistência da espécie aos fatores físico-químicos;
- c) produtividade da biomassa, que é o ganho de massa em um determinado volume e tempo;
- d) conteúdo lipídico o qual indica o percentual de lipídios presentes na biomassa (p.ex. % em peso seco);
- e) produtividade lipídica, que é o ganho de massa lipídica em um determinado volume e tempo;
- f) composição dos lipídios, importante para se saber o percentual de cada ácido graxo presente na biomassa em relação aos ácidos graxos totais na mesma biomassa;
- g) genética do material que deve ser estável e manter conservadas as características desejáveis após sucessivas produções.

2.1.2 Técnicas de cultivo

Após o selecionamento de cepas e determinação do meio de cultivo, a primeira etapa do processo de produção da biomassa a partir de microalgas é o cultivo. Esta etapa pode ser feita com diferentes gêneros/espécies de microalgas bem como diferentes sistemas de cultivo, os quais serão melhor descritos adiante. O estudo de Kang, Heo e Lee (2019) revela três tipos de microalgas *Chlorella vulgaris*, *Tetraselmis* sp. e *Nannochloropsis* sp., promissoras para a comercialização de biocombustíveis. A Figura 4 mostra essas três espécies vistas ao microscópio ótico.

Figura 4 – Exemplos de microalgas com potencial para biocombustíveis



(A) *Chlorella vulgaris* | \varnothing = ~5|

(B) *Tetraselmis* sp. | \varnothing = ~10,7|

(C) *Nannochloropsis* sp. | \varnothing = ~2,5|

Fonte: Algae Research Supply, 2017

Existe um elevado número de espécies de algas no mundo disponíveis em diferentes cores e formas, mas nem todas são adequadas à produção de biodiesel. A seleção de algas dependerá de fatores como taxa de crescimento, características e os produtos desejados. O teor lipídico (óleo) de algumas microalgas é fornecido na Tabela 2. Existem espécies com alto teor lipídico, atingindo quase 50% de sua massa total e estas são consideradas ideais para a produção de biodiesel (CHISTI, 2007a).

Tabela 2 – Teor lipídico das microalgas

Microalga	Teor lipídico (% peso seco)
<i>Botryococcus braunii</i>	25 - 75
<i>Chlorella</i> sp.	28 - 32
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	20
<i>Cylindrotheca</i> sp.	16 - 37
<i>Dunaliella primolecta</i>	23
<i>Isochrysis</i> sp.	25 - 33
<i>Monallanthus salina</i>	> 20
<i>Nannochloris</i> sp.	20 - 35
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31 - 68
<i>Neochloris oleoabundans</i>	35 - 54
<i>Nitzschia</i> sp.	45 - 47
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	20 - 30
<i>Schizochytrium</i> sp.	50 - 77
<i>Tetraselmis sueica</i>	15 - 23

Fonte: Chisti, 2007a, p. 296

2.1.2.1 Sistema aberto

O sistema aberto ou *open raceway pond*, representado na Figura 5, permite o cultivo das microalgas ao ar livre, com menor custo relativo, podendo ser utilizado em áreas não-agricultáveis, com baixa demanda de energia e manutenção simples (BRENNAN; OWENDE, 2010). Todavia, a produtividade deste sistema em termos de biomassa é baixa, necessitando de grandes áreas, limita-se ao cultivo de poucas cepas de algas no mesmo sistema, elevadas taxas de evaporação de água e alto risco de contaminação devido à exposição ao ambiente (SAEID; CHOJNACKA, 2015).

Figura 5 – Sistema aberto de cultivo de microalgas



Fonte: MicroBio Engineering, 2012

Já os sistemas fechados, em geral, apresentam menores quantidades de perdas de CO₂ e água, se comparados aos sistemas abertos. Com isso, reduzem a probabilidade de contaminação e permitem um controle mais rigoroso das condições de cultivo e de crescimento. Os sistemas em fotobiorreatores permite o cultivo da maioria das cepas de microalgas e com maiores produtividades de biomassa por aérea e volumétrica (UGWU; AOYAGI; UCHIYAMA, 2008).

2.1.2.2 Fotobiorreator de placas planas

Os fotobiorreatores de placas planas (Figura 6) são dispositivos cujo corpo é construído em pequenos módulos retangulares, com materiais transparentes e iluminado com lâmpadas de LED (TAMBURIC *et al.*, 2011). O seu desenho permite uma larga iluminação superficial adequada para o cultivo exterior, flexibilidade de configurações, baixos requisitos mecânicos (SUN *et al.*, 2016) e baixo consumo de energia (GUO; YAO; HUANG, 2015). Além disso, possuem alta produtividade de biomassa quando comparados a outros tipos de fotobiorreatores, mesmo enquanto alguns problemas de entupimento provocada pela biomassa sedimentada ou

até mesmo vazamentos são verificados (POSTEN; WALTER, 2012; OZKAN *et al.*, 2012; YADALA; CREMASCHI, 2014; JUNG *et al.*, 2014; DE MOOIJ *et al.*, 2016; HUANG *et al.*, 2017).

Figura 6 – Fotobiorreatores de placas planas



Fonte: Acién *et al.*, 2017. p. 25

2.1.2.3 Fotobiorreator em colunas

Os fotobiorreatores em colunas (Figura 7) são dispositivos onde em cada coluna existe um sistema de injeção de ar ou CO₂ capaz de gerar um processo de suspensão. Este tipo de reator permite uma configuração modular simples bastando conectar os tubos ou combinando outras técnicas como o processo por membranas (CHANG *et al.* 2016).

Segundo Mirón *et al.* (1999), uma grande vantagem deste tipo de reator é a alta transferência de massa que, por outro lado, exhibe uma área moderada de iluminação requerendo luz interna. Outra facilidade neste tipo de construção é a fácil mistura da cultura (YADALA; CREMASCHI, 2014).

Apesar de fácil montagem e operação, maior aprisionamento de gás (ar ou CO₂), boa exposição aos ciclos de claro:escuro e baixo problema de incrustação, os reatores em colunas tem um alto custo de mistura e a iluminação diminui na medida em que se aumenta o tamanho da coluna (LÓPEZ *et al.*, 2006; POSTEN; WALTER, 2012; VO *et al.*, 2019).

Figura 7 – Fotobiorreator em colunas



Fonte: Ación *et al.*, 2017. p. 25

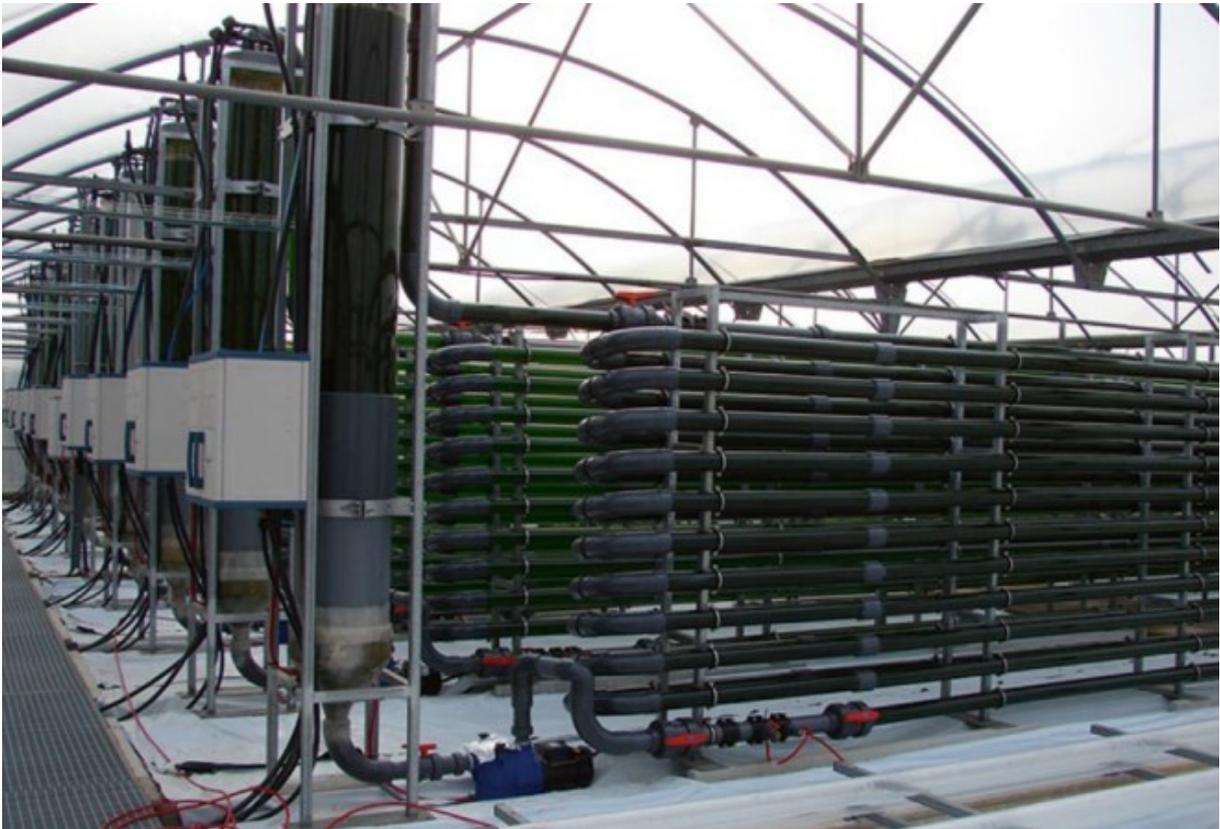
2.1.2.4 *Fotobiorreator tubular*

Um fotobiorreator tubular (Figura 8) consiste em uma matriz de tubos transparentes feitos de plásticos, acrílicos ou vidro, dispostos em horizontal paralelamente uns aos outros, muitas vezes organizados como uma cerca, para aumentar o número de tubos que podem ser acomodados em uma determinada área.

Os tubos são coletores solares que geralmente possuem menos do que 10 cm de diâmetro. O diâmetro do tubo é limitado, pois a luz não penetra tão profundamente no caldo denso da cultura, o que é necessário para garantir uma alta produtividade da biomassa no reator. A superfície embaixo do coletor solar é geralmente pintada de branco para aumentar a refletância.

Este tipo de reator oferece grande área superficial iluminada, fácil construção, manutenção e limpeza, alta transferência de massa e baixo consumo de energia. Porém, requer numerosos módulos para o aumento de escala, pode haver incrustações nos tubos, superaquecimento e alto custo de operação (LÓPEZ *et al.*, 2006; POSTEN; WALTER, 2012; SLEGERS *et al.*, 2013; YADALA; CREMASCHI, 2014; SAEID; CHOJNACKA, 2015).

Figura 8 – Fotobiorreatores tubulares



Fonte: Acién *et al.*, 2017. p. 17

Os fotobiorreatores tubulares podem ser indicados para culturas ao ar livre, produzem boa quantidade de biomassa, porém requerem grandes áreas e necessidade do controle do pH (ACIÉN *et al.*, 2017).

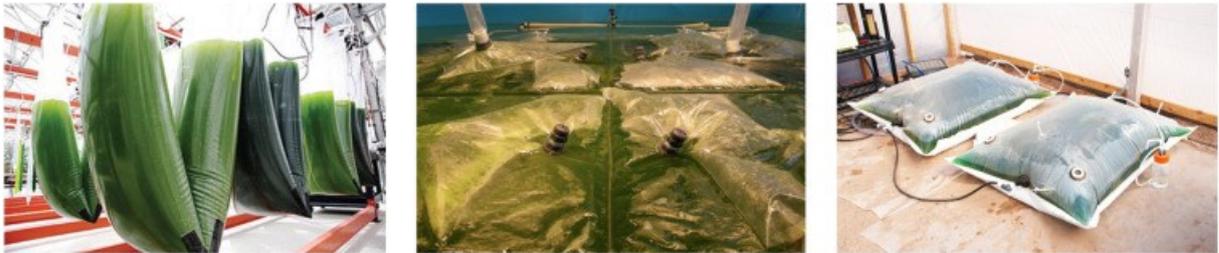
2.1.2.5 *Fotobiorreator Soft-frame*

Enquanto a maioria dos fotobiorreatores são projetados e construídos com materiais rígidos e fixados permanentemente durante o seu ciclo de vida operacional, os fotobiorreatores *Soft-frame* (que quer dizer “estrutura flexível” em português), conforme a Figura 9, são transportáveis, dobráveis, móveis e substituíveis (HAMANO *et al.*, 2017).

Este tipo de reator pode ser projetado de muitas formas e configurações diferentes, sendo apoiado em outras estruturas móveis, ou de forma flutuante em água ou até mesmo no chão. Além disso, podem ser construídos a partir de uma alta variedade de materiais, tais como o Etileno Acetato de Vinila/Polietileno de Baixa Densidade (EVA/LDPE) e politetrafluoretileno

(PTFE). Porém, o material de alto custo destes reatores é considerado frágil e pode ser facilmente danificado, com vazamento de cultura e, além disso, esse tipo de reator oferece dificuldade em promover a mistura do meio de cultivo devido à formação de zonas mortas no seu interior (HAMANO *et al.*, 2017; HOM-DIAZ *et al.*, 2017).

Figura 9 – Fotobiorreatores *Soft-frame*



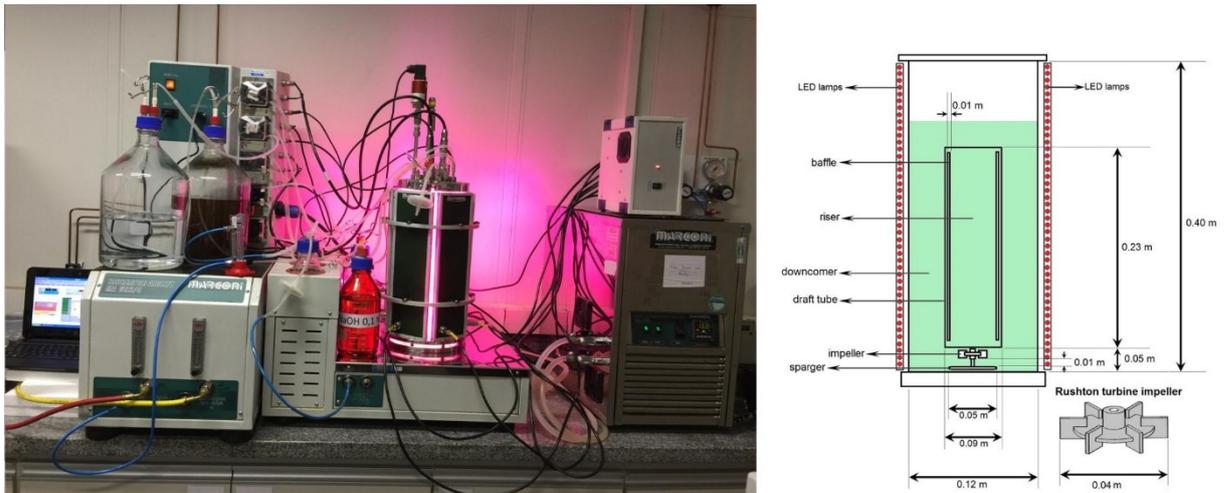
Fonte: Algasol Renewables, 2018

2.1.2.6 Fotobiorreator híbrido

Segundo revisão de Vo *et al.* (2019) os fotobiorreatores híbridos são definidos como a combinação e/ou integração dos outros reatores mencionados com outras tecnologias (por exemplo, processo de membrana) resultando em redução do seu volume, maior rendimento de biomassa e eficácia de remoção de poluentes. Os fotobiorreatores híbridos, conforme Figura 10 (abaixo), foram desenvolvidos explorando as características proeminentes dos tipos tradicionais (MARBELIA *et al.*, 2014; JESUS; FILHO, 2017; SHENG *et al.*, 2017).

Soman e Shastri (2015) combinaram a vantagem dos reatores em placas planas com os tubulares, resultando em um novo desenho. A zona tubular foi operada no núcleo cilíndrico de um tubo retangular enquanto dois defletores circundantes foram conectados ao tubo e serviram como um mecanismo de placa plana onde o fluxo desceu.

Figura 10 – Fotobiorreator híbrido



Fonte: Jesus e Filho, 2017. p. 284

Xu *et al.* (2017) propuseram um reator com operação baseada em capilaridade, no qual os nutrientes e a água alimentam o reator via tubos capilares de microfibras de poliéster. Este fotobiorreator alcançou biomassa com elevado teor de carboidratos e menores quantidades de proteína, sendo por isso, segundo estudo, possível de ser aplicável à produção de biocombustíveis.

A Tabela 3 mostra a comparação entre os fatores de decisão (positivos e restrições) de cada um dos sistemas de cultivos de microalgas descritos acima.

Tabela 3 – Fatores de decisão dos sistemas produtivos de microalgas

			(continua)
Sistema	Positivos	Restrições	Referência
Aberto	Baixo custo	Baixa produção de biomassa	Brennan; Owende (2010)
	Fácil manutenção e limpeza	Requer grandes áreas	---
	Não requer áreas agricultáveis	Limita-se a algumas cepas de algas	---
	Baixa energia necessária	Baixa mistura de luz e CO ₂	---
		Contaminação	---
Placas Planas	Grande área superficial iluminada	Necessitam de espaço e disponibilidade de terras	Yadala; Cremaschi (2014)
	Adequado para o cultivo exterior	Fotoinibição	Posten; Walter (2012)
	Alto rendimento em biomassa	Formação zonas escuras	Jung <i>et al.</i> (2014)
	Configuração modular	Altos custos de construção e energia	de Mooij <i>et al.</i> (2016)
	Preferível em arquitetura baseada em PB	---	Ozkan <i>et al.</i> (2012)

Tabela 3 – Fatores de decisão dos sistemas produtivos de microalgas

			(conclusão)
Sistema	Positivos	Restrições	Referência
Colunas	Alta transferência de massa	Área de iluminação moderada, prefere iluminação interna	Mirón <i>et al.</i> (1999)
	Fácil mistura	Baixa superfície/volume	Yadala; Cremaschi (2014)
	Compacto e fácil de operar	Alto custo de mistura	López <i>et al.</i> (2006)
	Maior aprisionamento de gás	O aumento da coluna diminui a superfície iluminada	Posten; Walter (2012)
	Melhor exposição aos ciclos de luz:escuro	---	---
	Fácil montagem	---	---
	Baixo problema de incrustação	---	---
Tubular	Grande área superficial iluminada	Requer um número de módulos para aumentar a escala	Slegers <i>et al.</i> (2013)
	Fácil construção, manutenção e limpeza	Incrustação	Posten; Walter (2012)
	Alta transferência de massa	Superaquecimento	Saeid; Chojnacka (2015)
	Baixo consumo de energia	Custo de operação	Yadala; Cremaschi (2014) López <i>et al.</i> (2006)
<i>Soft-frame</i>	Flexível	O material é facilmente danificado	Hamano <i>et al.</i> (2017)
	Dobrável	Mistura insuficiente devido à formação de zona morta	Hom-diaz <i>et al.</i> (2017)
	Substituível	Vazamento de cultura	Vo <i>et al.</i> (2019)
	Menor espaço requerido	Alto custo de material	---
Híbrido	Reduz o tamanho do reator	Incrustações de membrana	Sheng <i>et al.</i> (2017)
	Opera com maior taxa de diluição	---	Marbelia <i>et al.</i> (2014)
	Biomassa com elevado carboidrato e baixa proteína	Balanco energético negativo	Vo <i>et al.</i> (2019)
	Reduz o problema de lavagem	---	---
	Baixo custo de operação e manutenção	---	---

Fonte: Autor

2.1.3 Colheita

Existem variados métodos para a colheita das microalgas, que é o processo de separação das algas da água. Como exemplo, existem métodos de espessamento como a floculação, autofloculação/biofloculação, sedimentação gravimétrica, flotação e eletroflotação. Existem também métodos de desidratação da biomassa, como a filtração e centrifugação, que aumentam a concentração de biomassa a ser processada.

Os dois principais processos de recuperação de biomassa são a centrifugação e a floculação. A centrifugação é o método mais utilizado, mesmo sendo caracterizado pelo alto consumo de energia elétrica e difícil escalonamento (LEITE *et al.* 2013, MENEGAZZO; FONSECA, 2019). Este método envolve a aplicação de aceleração centrípeta para separar o meio de crescimento de algas em regiões de maior e menor densidade. Uma vez separadas, a biomassa pode ser removida (HARUN *et al.*, 2011). A Figura 11 mostra a biomassa sendo recolhida após centrifugação.

Figura 11 – Biomassa sendo recolhida após centrifugação



Fonte: Algae Industry Magazine, 2013

Por outro lado, a floculação oferece vantagens quanto ao baixo custo operacional e energético, facilidade no escalonamento e baixa influência no conteúdo de lipídios (MENEGAZZO; FONSECA, 2019). A floculação ocorre quando partículas menores agregam a partículas maiores através de agentes floculantes, fazendo com que as partículas sedimentem. Este método é bastante utilizado na indústria (cerveja, mineração, tratamento de água e efluentes) (CHEN *et al.*, 2016). Em geral, a floculação utilizada com microalgas é bastante similar à floculação em tratamento de água (BANERJEE *et al.*, 2013). A escolha do agente floculante deve ser feita considerando a interferência na biomassa, eficácia em baixas

concentrações e custo. Polímeros orgânicos como a quitosana e amido modificado são aceitáveis com menores dosagens e reduzido impacto na biomassa e conteúdo lipídico, se comparado aos sais metálicos (JAPAR; TAKRIFF; YASIN, 2017).

2.1.4 Extração de lipídios

O conteúdo de lipídios das microalgas depende dos parâmetros de cultivo (p.ex. estresse de nitrogênio e intensidade de luz). O rendimento lipídico está diretamente relacionado ao tipo/espécie a ser cultivado, aos sistemas de recuperação da biomassa e essencialmente aos sistemas de extração dos lipídios (ruptura celular e extração) (MENEGAZZO; FONSECA, 2019).

As microalgas fornecem, entre outros compostos, lipídios que são usados na produção de biodiesel. Para a extração desses lipídios podem ser usados solventes orgânicos, fluidos supercríticos, ultrassom com solventes orgânicos e micro-ondas com solventes orgânicos (HARUN *et al.*, 2011; HALIM; DANQUAH; WEBLEY, 2012; ACIÉN *et al.*, 2017).

O método de extração por solventes orgânicos envolve o uso de produtos químicos, tais como benzeno, acetona e hexano e quando a biomassa entra em contato com o produto químico, provoca a ruptura da parede celular e os conteúdos são removidos. Este método se destaca dentre os outros pois apresenta maiores rendimentos de recuperação, medidas mínimas de extração e envolve a utilização de solventes menos tóxicos (ACIÉN *et al.*, 2017).

Existem quatro formas mais comuns de pré-tratamento: Homogeneização a alta pressão; Trituração; Lise enzimática; e Eletroporação (DICKINSON *et al.*, 2017):

- a) Homogeneização a alta pressão: esta forma de pré-tratamento consiste na aplicação de alta pressão nas células que forçam a ruptura da parede celular. Apesar do alto rendimento de extração lipídica e da fácil escalabilidade, existe um alto consumo de energia;
- b) Trituração: neste método, são utilizados grânulos que maceram as células provocando o rompimento da parede. A trituração oferece também um alto rendimento de extração baixa complexidade, porém não é escalável;
- c) Ruptura enzimática: Neste método, o rompimento da parede celular é provocado por enzimas. O rendimento de extração é moderado e possui um alto custo de operação;
- d) Eletroporação: Neste método, é utilizado um campo elétrico que provoca a ruptura da parede celular. É escalável, requer pouca energia, porém possui baixo rendimento de extração.

2.1.4.1 Produção de biodiesel: reação de transesterificação

Após o óleo ser extraído e purificado, as cadeias de ácidos graxos são submetidas à transesterificação que produz os ésteres metílicos de ácidos graxos ou FAME (do inglês *Fatty Acid Methyl Esters*). A produção convencional de biodiesel se dá por transesterificação, podendo ser catalisada por meio de processos homogêneos e heterogêneos ou enzimáticos. (MARCHETTI *et al.*, 2007).

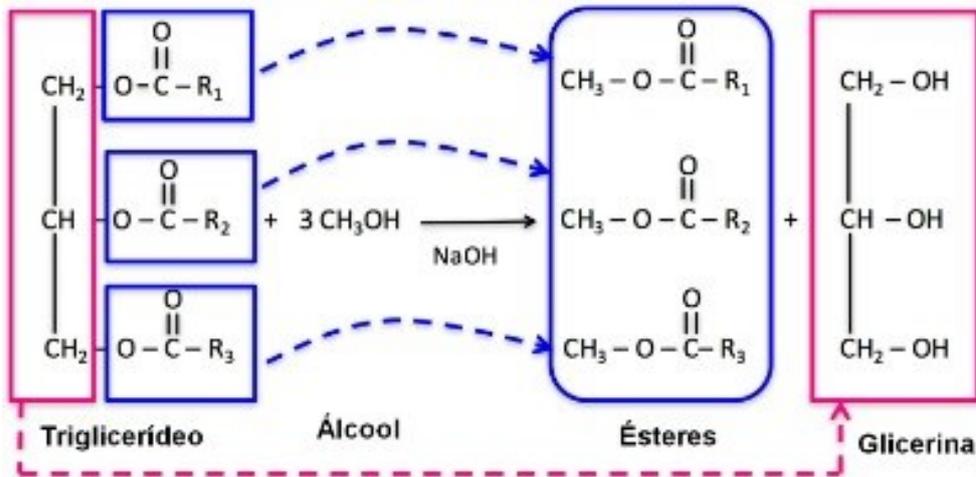
A reação de transesterificação ocorre preferencialmente com álcoois de baixa massa molecular (p.ex. metanol, etanol, propanol, etc.). A utilização do metanol é mais frequente em virtude do menor custo e vantagens físicas e químicas (como a polaridade, menor cadeia de carbono, reação rápida com o triacilglicerídeo e fácil dissolução do catalisador) (MA; HANNA, 1999). O metanol também permite a separação simultânea do glicerol, no entanto, a mesma reação usando etanol é mais complicada, pois requer um álcool anidro, bem como um óleo com baixo teor de água para levar à separação do glicerol (SCHUCHARDT; SERCHELI; VARGAS, 1998).

Entre os catalisadores básicos estão os hidróxidos de metais alcalinos, carbonatos e alcóxidos de metais alcalinos (metóxido de sódio, etóxido de sódio, propóxido de sódio e butóxido de sódio). A maior parte das publicações publicadas emprega catalisadores básicos, tais como KOH e NaOH onde foram observados maior rendimento e seletividade (PINTO *et al.*, 2005).

Os processos homogêneos, todavia, podem acarretar alguns problemas de corrosão de equipamento e questões ambientais relativas à separação e disposição dos catalisadores residuais (ARZAMENDI *et al.*, 2008). O uso de catalisadores heterogêneos pode minimizar estas questões devido à sua capacidade de reutilização. Estes facilitam a separação do produto, proporcionando um melhor grau de pureza, uma vez que a lavagem com água pode ser eliminada, além de um rendimento em torno de 80% (TAUFIC-YAP *et al.*, 2011). Os catalisadores heterogêneos mais estudados são o óxido de cálcio, óxido de magnésio, óxido de estrôncio, óxidos mistos e hidrotalcita (BORGES; DÍAZ, 2012).

A Figura 12 mostra que os grupos metanol “CH₃OH” ligam-se às cadeias de ácidos graxos do extrato e transformam-se em FAME. O éster metílico produzido a partir desta reação é conhecido como biodiesel bruto. Em seguida, o biodiesel precisa ser lavado, desidratado e descontaminado, de modo que toda a água e as partículas dentro do biodiesel sejam removidas (XU; MIAO; WU, 2006).

Figura 12 – Reação de transesterificação básica



Fonte: Autor

Legenda: Utilizando *software* Chem4Word® (versão 3.0)

2.1.4.2 Padrões de qualidade do biodiesel

Os padrões de qualidade do biodiesel foram estabelecidos em vários países, como nos Estados Unidos (ASTM D6751), União Europeia (EN 14214) e Brasil (RANP 45). Estas normas servem como diretrizes para o desenvolvimento de padrões e garantia da qualidade e características do biodiesel. Entre os parâmetros instituídos pelas normas, são encontrados aqueles provenientes da normatização do diesel mineral (ou fóssil) e os que foram originados de análises de os óleos vegetais, comumente utilizados na indústria (LÔBO *et al.*, 2009). Parâmetros como viscosidade cinemática, ponto de fulgor e cinzas sulfatadas, embora tenham origem na normatização do diesel mineral, fornecem resultados esclarecedores quanto à qualidade do biodiesel.

Para cada característica, representado na Tabela 4 (a seguir) existem métodos analíticos para avaliação da qualidade do biodiesel. Tais métodos se dividem entre análises para determinação de contaminantes provenientes da matéria-prima; avaliação do processo produtivo; avaliação das propriedades inerentes às estruturas moleculares; e monitoramento da qualidade do biodiesel durante o processo de estocagem.

Tabela 4 – Padrões de qualidade do biodiesel

Característica	Unidade	ASTM D6751	EN 14214	RANP 45
Aspecto	---	---	---	Límpido e sem impurezas
Massa específica	kg/m ³	---	860 – 900 a 15 °C	850 – 900 a 20 °C
Viscosidade cinemática a 40 °C	mm ² /s	1,9 – 60,0	3,5 – 5,0	3,0 – 6,0
Teor de água, máx.	mg/kg	500	500	200
Contaminação total, máx.	mg/kg	---	---	24
Ponto de fulgor, mín.	°C	130	120	100
Teor de éster, mín.	% massa	---	96,5	96,5
Cinzas sulfatadas, máx.	% massa	---	0,02	0,02
Enxofre total, máx.	mg/kg	50	10	10
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	---	5	5
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	---	5	5
Fósforo, máx.	mg/kg	10	10	10
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C	---	1	1	1
Número Cetano	---	47 (mín.)	51 (mín.)	Anotar
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx.	°C	---	(*)	(*)
Índice de acidez, máx.	mg KOH/g	0,5	0,5	0,5
Glicerol livre, máx.	% massa	0,02	0,02	0,02
Glicerol total, máx.	% massa	0,24	0,25	0,25
Monoacilglicerol, máx.	% massa	---	0,8	0,7
Diacilglicerol, máx.	% massa	---	0,2	0,2
Triacilglicerol, máx.	% massa	---	0,2	0,2
Metanol e/ou Etanol, máx.	% massa	---	0,20	0,20
Índice de lodo	g/100g	---	120 (máx.)	Anotar
Estabilidade à oxidação a 110 °C, mín.	hora	6	6	12

Fonte: Autor

Nota: (*) Varia por região

A norma brasileira RANP 45 estabelece que a determinação das características do biodiesel deverá ser feita mediante o emprego das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), das normas internacionais da *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *International Organization for Standardization* (ISO) e *Comité Européen de Normalisation* (CEN).

Para verificar a qualidade e características do biodiesel, além de cumprir os regulamentos, são necessárias várias análises, muitas vezes caras e demoradas, exigindo grandes quantidades de amostras. Por exemplo, o teor de fósforo e enxofre é importante devido

a estes serem considerados venenos de catalisadores (afetando os conversores catalíticos) e a imposição do seu limite máximo tem relação com emissões de particulados e lubricidade do óleo.

Em alguns trabalhos, foi verificado que existe uma predominância de cadeias carbônicas entre C14 e C24 no perfil de ácidos graxos em microalgas, mas em diferentes composições, determinando diferentes características do biodiesel (DOAN; SIVALOGANATHAN; OBBARD, 2011; NASCIMENTO *et al.*, 2013; SOARES *et al.*, 2014). Isso sugere que cada microalga fornece uma composição única de biodiesel, influenciada pelas características de seu perfil de ácidos graxos.

2.2 RENOVABIO E POLÍTICAS NACIONAIS PARA OS BIOCOMBUSTÍVEIS

Este tópico destaca a iniciativa nacional de incentivo à produção de combustíveis renováveis, que se diferencia de outras políticas, pois não visa a criação de impostos e sim o estímulo à concorrência com os combustíveis não-renováveis em termos de preço e qualidade ao consumidor final.

Segundo a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2016),

O RenovaBio é a Política Nacional de Biocombustíveis, instituída pela Lei nº 13.576/2017, com os seguintes objetivos:

- Fornecer uma importante contribuição para o cumprimento dos compromissos determinados pelo Brasil no âmbito do Acordo de Paris;
- Promover a adequada expansão dos biocombustíveis na matriz energética, com ênfase na regularidade do abastecimento de combustíveis; e
- Assegurar previsibilidade para o mercado de combustíveis, induzindo ganhos de eficiência energética e de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa na produção, comercialização e uso de biocombustíveis.

O principal instrumento do RenovaBio é o estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, de forma a incentivar o aumento da produção e da participação de biocombustíveis na matriz energética de transportes do país.

Por meio da certificação da produção de biocombustíveis, serão atribuídas notas diferentes para cada produtor e importador de biocombustível, em valor inversamente proporcional à intensidade de carbono do biocombustível produzido. A nota refletirá exatamente a contribuição individual de cada agente produtor para a mitigação de uma quantidade específica de gases de efeito estufa em relação ao seu substituto fóssil (em termos de toneladas de CO₂ equivalente).

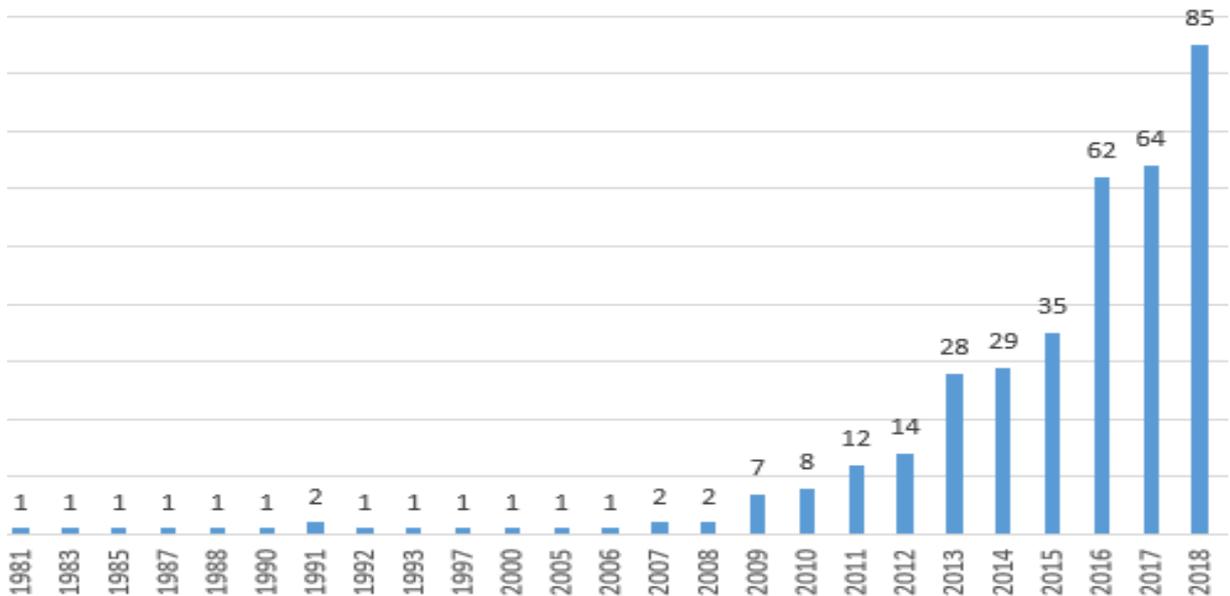
Os produtores e importadores de biocombustíveis que desejem aderir ao programa contratarão firmas inspetoras credenciadas na ANP para realização da Certificação de Biocombustível e validação da Nota de Eficiência Energético-Ambiental. O Certificado de Produção Eficiente de Biocombustíveis terá validade de três anos, contados a partir da data de sua aprovação pela ANP, e somente poderá ser emitido pela firma inspetora após a aprovação do processo pela ANP. Os produtores e importadores de biocombustíveis que aderirem voluntariamente ao programa poderão, a partir dessa produção certificada, comercializar esses créditos.

No entanto, a quantificação monetária da descarbonização incentivada pelo RenovaBio é ainda altamente complexa e dependem de uma robusta modelagem matemática envolvendo inúmeras variáveis, como mostra o trabalho de Coelho (2018). Portanto, esta iniciativa não será considerada no presente trabalho.

2.3 ESTUDOS TÉCNICO-ECONÔMICOS

Os estudos técnico-econômicos da produção de biocombustíveis a partir da biomassa de microalgas vêm crescendo nos últimos anos. Uma busca por artigos nas bases *Scopus* e *Web of Science* através das palavras-chaves “*economic*” ou “*economics*” ou “*economical*” no título e “*microalgae*” em todos os parâmetros, revela que os estudos econômicos começaram a ser publicados a partir do ano de 1981 com um artigo publicado, até 2018 com 85 artigos publicados. A Figura 13, a seguir mostra a evolução da produção científica relacionada ao tema.

Figura 13 – Número de artigos publicados por ano



Fonte: Autor

As revistas que mais publicaram sobre o tema foram a *Bioresource Technology* (47 artigos), *Algal Research* (20 artigos), *Applied Energy* (20 artigos), *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* (15 artigos), *Journal of Cleaner Production* (11 artigos) e *Energy* (10 artigos). Nota-se, portanto, que o tema está sendo abordado nas revistas especializadas em biocombustíveis, e onde é comum encontrar a palavra “microalgae”, por exemplo. No entanto, observa-se que o tema não é abordado nas revistas especializadas em Economia.

produção de algas foi estimado usando a simulação e os intervalos de valores para variáveis críticas foram usados para definir as distribuições de probabilidade para essas variáveis. Este modelo simulou 500 vezes a distribuição dos prováveis custos de produção de óleo, estimando assim as funções de densidade de probabilidade e variáveis chave de saída, a exemplo do melhoramento das cepas e eficiência na colheita. As variáveis estocásticas avaliadas pelos autores foram: taxa de evaporação; taxa de produção; dias de produção; teor de óleo; uso de CO₂; custo da água; custo da biomassa; e custo da eletricidade.

Uma abordagem probabilística foi conduzida por Soratana, Harper Jr. e Landis (2012), onde combinaram o estudo do ciclo de vida da produção de biocombustíveis a partir de microalgas com a simulação Monte Carlo, todavia, com o propósito de avaliar o potencial de aquecimento global (GWP, do inglês *Global Warming Potential*), a eutrofização do ambiente, a destruição da camada de ozônio e ecotoxicidade. A análise Monte Carlo foi realizada para calcular as distribuições de probabilidade para os impactos ambientais da produção biodiesel de microalgas e o coeficiente de correlação de Tornado foi usado para identificar os parâmetros com alta contribuição para os impactos totais. As principais variáveis analisadas foram: (a) Energia para centrífuga; (b) Conteúdo lipídico e; (c) Disponibilidade de Nitrogênio.

Outra pesquisa conduzida por Richardson, Johnson e Outlaw (2012) usou um modelo de viabilidade financeira de vários anos em simulação Monte Carlo para estimar os custos de produção e a chance de sucesso econômico para instalações de biocombustível de algas de tamanho comercial. No estudo, foram comparados os sistemas abertos com os sistemas fechados (fotobiorreatores), em que a viabilidade econômica foi maior para os sistemas abertos. Destaca-se que o estudo utiliza dados de produtividade em larga escala e em termos de Capex e Opex.

Em outros trabalhos em sequência, de comparação de sistemas abertos e fechados, Richardson *et al.* (2014a e 2014b) fizeram uma análise econômica probabilística estimando em 10 anos a produção, preço e riscos financeiros que as fazendas produtivas enfrentariam. O estudo considerou as diferenças em termos de produtividade de biomassa, conteúdo lipídico e custos de extração e secagem da biomassa. As variáveis de entrada analisada pelos autores foram: Despesas de Trabalho; Produção de Gás natural; Eletricidade; Manutenção; Seguro; Juros e Dividendos. As variáveis de saída analisadas foram: Valor presente líquido (VPL); Probabilidade de sucesso econômico; Retorno no ano 10; Patrimônio líquido final; Custo total do lipídio (\$ gal⁻¹) e; Custo total de biomassa. Neste estudo, os autores concluíram que nenhum dos sistemas de cultivo ofereciam uma probabilidade razoável de sucesso econômico, mas que

para o aumento na produção de biomassa, o aumento da receita era maior para sistemas fechados.

Richardson e Johnson (2014 e 2015) compararam diferentes tecnologias (p.ex. algas geneticamente modificadas, sistemas de cultivo híbridos, recuperação de biomassa por hidrotermal liquefação-catálise) utilizando modelo de risco e simulações de custo probabilístico da produção de lipídios de algas bem como a viabilidade econômica e alternativas para fazendas de microalgas. Este estudo, apesar de utilizar dados estocásticos, também é realizado em escala de biorrefinarias e não avaliou a conversão do óleo em biodiesel.

Souza, Gopal e Seabra (2015) também realizaram um estudo econômico probabilístico com dados estocásticos com o objetivo de estimar a redução nas emissões de CO₂ integrando o cultivo de microalgas em uma biorrefinaria de cana-de-açúcar. No sistema proposto pelos autores do estudo, as algas consomem o CO₂ produzidos durante a fermentação da cana, a energia térmica é produzida pela queima do bagaço da cana e a glicerina da usina de biodiesel serve como substrato nutritivo às algas. As incertezas foram estimadas através de simulação Monte Carlo e a integração dos processos nesse sistema pode diminuir as emissões de CO₂ entre 10 a 50%.

Cheali *et al.* (2016) também realizaram um extenso trabalho de avaliação do risco econômico através de comparações de oito diferentes conceitos de biorrefinarias de produção de biocombustíveis e bioprodutos. No estudo são comparadas biomassa lignocelulósica e não-lignocelulósica (algas) e tecnologias de conversão (bioquímica e termoquímica). As variáveis econômicas analisadas foram: Pré-tratamento; Hidrólise; Fermentação; Separação; Instalação; Utilidades; Capital de giro; Custo de matéria-prima; Custo de Utilidade. O estudo revela que o bioetanol lignocelulósico não é economicamente viável (TIR negativo) em períodos de baixa nos preços do petróleo. Os autores recomendam que para uma análise abrangente de risco econômico seja utilizada a técnica de Monte Carlo.

Batan, Graff e Bradley (2016) utiliza um modelo probabilístico com base em Monte Carlo para fazer projeções dos preços e custos, desempenho financeiro e lucro de um sistema fechado de cultivo de microalgas com produção anual de 37,85 milhões de litros de biodiesel. A análise é feita em termos investimento de capital e custo de operação. As variáveis analisadas referentes ao Capex foram: custos diretos instalados; produtividade de lipídios; material e instalação de PBR; sistema de distribuição de CO₂; sistema de colheita de algas; sistema de extração por centrífuga; sistema de abastecimento (utilidades); maquinaria geral; taxa inicial de água; produtividade de biodiesel; planta de hidrotratamento (diesel); custos indiretos instalados; desenvolvimento de site; armazém; despesas no campo; *home office* e construção; contingência;

outros custos; capital de giro (25% dos custos operacionais); capital não depreciável; e custos da terra. As variáveis analisadas referentes ao Opex foram: produção de lipídios; consumo de energia; nutrientes (N, P); fornecimento de CO₂; consumo de solvente; manutenção do PBR (reposição – 5 anos); eliminação de resíduos; utilitários (água de resfriamento, vapor); trabalho e despesas gerais; manutenção, impostos e seguro; planta de hidrotratamento (diesel); consumo de hidrogênio; consumo de vapor; trabalho e despesas gerais; e manutenção, impostos, seguros. Os resultados deste trabalho indicam que os altos custos de produção dos reatores podem ser compensados com a produção de coprodutos de maior valor do que biodiesel bem como a utilização de novas tecnologias que aumentem a produtividade e/ou reduzam os custos de produção.

Outro estudo de caráter técnico-econômico probabilístico foi conduzido por Heo, Lee e Lim (2016). No entanto, o estudo tem aplicação na reforma de CO₂ em aterros de médio porte. Os autores utilizaram uma análise de sensibilidade para identificar os principais fatores econômicos e para determinar o custo de produção de gás H₂. As análises de probabilidade foram realizadas com base em simulação Monte Carlo para determinação das incertezas e curvas de probabilidades cumulativas. Os autores utilizaram como variáveis de Capex: Reator; Módulo de membrana; Absorvente; Compressor e Suplemento. Como variáveis de Opex: Reagente; Gás; Eletricidade; Trabalho, Reposição de membrana; Gás natural para caldeiras; e Manutenção.

Santibañez-Aguilar *et al.* (2016) realizaram uma abordagem estocástica para avaliação econômica da rede de suprimentos de uma biorrefinaria. O objetivo do estudo foi apresentar um desenho logístico ótimo em termos de impactos ambientais e econômicos da produção de biomassa. O impacto ambiental foi avaliado por meio de indicadores e o aspecto econômico foi determinado através do lucro líquido anual, considerando a incerteza no preço da matéria-prima e pela geração estocástica de cenários baseado em Simulação Monte Carlo (SMC). O estudo mostrou que o comportamento probabilístico dos valores de lucro não está associado ao comportamento do preço da matéria-prima e que também a cadeia de suprimentos pode ser afetada pela incerteza no preço da matéria-prima, ou seja, a importância de uma abordagem probabilística na investigação dos riscos nos modelos de negócios é muito importante.

Chu *et al.* (2017) avaliaram a viabilidade econômica e análise de riscos da produção de biocombustível de aviação a partir de plantas oleaginosas. A análise Monte Carlo foi utilizada para examinar a robustez do desempenho financeiro levando-se em consideração os principais parâmetros de incerteza (p.ex. custos de capital, teor de óleo das sementes e preços de matéria-prima, gás, eletricidade, água etc.). As variáveis analisadas, em ordem decrescente de impacto

na viabilidade econômica foram: Preço do óleo bruto; Preço da matéria-prima; Custo de capital; Preço da refeição; Teor de óleo; Preço de hidrogênio; Preço da água; Preço da eletricidade e; Preço do gás natural. Com isso, o estudo conseguiu prever em termos de probabilidade qual tipo de oleaginosa obteve maior desempenho financeiro.

Xia e Tang (2017) realizaram um estudo técnico-econômico da produção de biodiesel. As variáveis analisadas foram o preço do biodiesel, custo de capital, taxa de juros, custo operacional, preço de matéria-prima, manutenção, eficiência de conversão do biodiesel e o preço do subproduto glicerol. Todos estes fatores se traduzem como incertezas do processo e fixam valores a si mesmos significando maiores distorções nos resultados. O estudo considerou como indicadores financeiros a viabilidade econômica, um parâmetro que considera que a probabilidade de que o lucro total, período de retorno e valor presente líquido da produção de biodiesel ou um ou dois deles não satisfaçam os requisitos preestabelecidos. O estudo revelou que o preço do biodiesel, preço da matéria-prima, eficiência de conversão do biodiesel e custo operacional tem efeitos significativos na viabilidade econômica, ao passo que os custos de capital, manutenção, taxa de juros e preço do glicerol tem efeitos desprezíveis.

Baudry, Macharis e Vallée (2018) avaliaram a contribuição do biodiesel a partir de microalgas nos objetivos de sustentabilidade no setor de transportes da França em cenário projetado para 2030. O que os autores fizeram foi comparar biocombustíveis de primeira, segunda e terceira geração e como o biodiesel de microalga pode contribuir para a sustentabilidade no setor de transportes francês com base em análises multicritério. O método de Monte Carlo foi utilizado para a elaboração de cenários considerando as incertezas sobre a evolução do contexto e dos impactos dos biocombustíveis até 2030, sugerindo que o biodiesel de microalgas pode contribuir com os objetivos de sustentabilidade no setor de transportes na França.

Ou *et al.* (2018) quantificaram as incertezas de composição e de modelo na produção de açúcar a partir da hidrólise da biomassa de palha de milho misturada com gramíneas e restos de grama. O estudo mostra a importância da mensuração de incertezas através de dados estocásticos em um projeto de biorrefinaria.

Ou-Yang *et al.* (2018) utilizaram a simulação Monte Carlo para analisar o valor da cadeia de bioenergia de algas cultivadas em fotobiorreatores e captura de gás carbônico produzidas em uma central elétrica a carvão. O estudo revelou que é possível capturar 231,4 toneladas de CO₂ por ano para cada hectare de produção de algas. As variáveis analisadas foram: a receita da produção de biocombustível; receita da produção de enzima hidrolisada; custo da produção de biocombustível; custo da produção de enzima hidrolisada e; lucro

associado. A simulação Monte Carlo mostrou-se importante para o desenvolvimento do sistema para além da escala de laboratório e objetivando a comercialização da proposta.

Pérez-López *et al.* (2018) também avaliaram o desempenho econômico e ambiental por indicadores e de forma simultânea da produção de biocombustíveis de microalgas em biorrefinarias. Para realizar a avaliação econômica e ambiental simultaneamente, o estudo compreende dois modelos padronizados combinados que fornece uma ferramenta de simulação integrada para a obtenção dos indicadores de avaliação. A simulação Monte Carlo foi utilizada para análise da influência dos dados variáveis de saída, das incertezas dos modelos e das correlações entre os diferentes resultados. O estudo revelou alta probabilidade de um favorável desempenho ambiental quando o preço mínimo de venda do galão de biodiesel está compreendido entre 11 e 110 dólares americanos e os parâmetros que mais influenciam na variação do processo é a produtividade de biomassa e teor lipídico.

Racz *et al.* (2018) realizaram um extensivo e abrangente estudo sobre a produção de biodiesel a partir da soja, colza e palma. O método de avaliação foi realizado através de análise multicritério de decisão e a simulação Monte Carlo foi utilizada para garantir a robustez dos dados de entrada. O objetivo dos autores foi comparar estas fontes em termos abrangentes como análise Política, Econômica, Social, Tecnológica, Legal e Ambiental (denominado PESTLE, tendo como referência as iniciais das palavras em inglês). O resultado do estudo mostra uma maior pontuação para o biodiesel a partir da colza, considerando a região europeia.

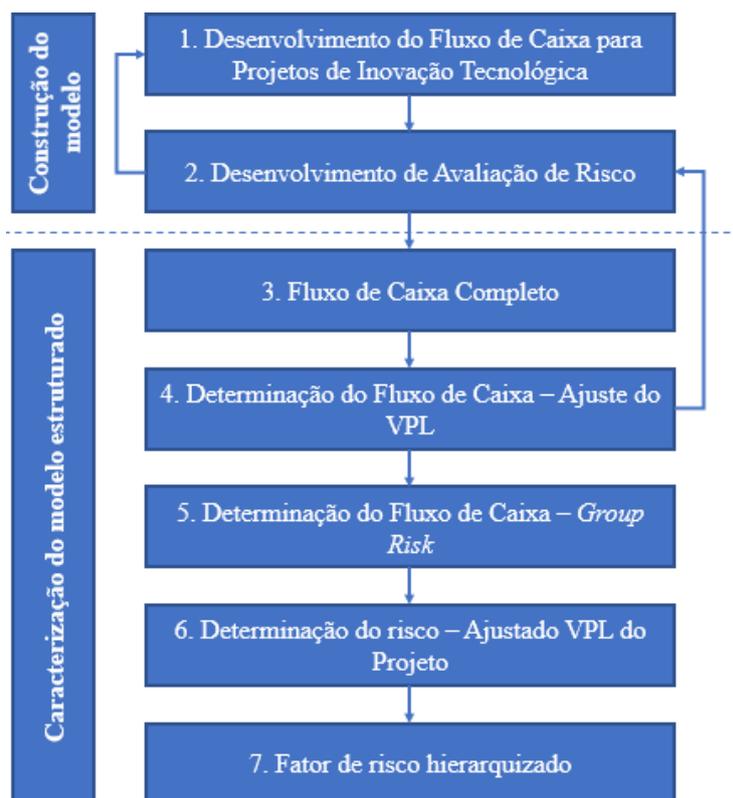
A partir destes vários estudos é possível verificar que as abordagens probabilísticas ainda são escassas em comparação aos métodos tradicionais de avaliação econômica e que mesmo assim os trabalhos que utilizam dados estocásticos remetem à larga escala “de biorrefinaria”. Portanto, o presente trabalho visa contribuir na ampliação do entendimento sobre o desempenho econômico de um sistema modular de menor escala aplicado a regiões com restrição de área.

2.4 ASPECTOS TEÓRICOS SOBRE AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Miorando (2010) apresentou a aplicação de um modelo (Figura 15) econômico-probabilístico para incorporar a análise de risco no processo de avaliação econômica em projetos de Inovação Tecnológica. O modelo proposto pelo autor integra risco e análise econômica por meio da quantificação tanto do valor quanto da probabilidade de ocorrência de desvios de fluxo de caixa, resultando assim em uma análise econômico-probabilística dos retornos esperados.

A primeira fase é a construção do modelo, onde se desenvolve um fluxo de caixa inicial e o desenvolvimento de avaliação de risco, considerando-se as distribuições de probabilidade das variáveis. Após isto, é feita a estruturação completa do modelo, onde completa-se o fluxo de caixa seguido de determinações do fluxo de caixa (ajustando o Valor Presente Líquido (VPL) concomitantemente às etapas anteriores de desenvolvimento do fluxo de caixa e da avaliação de risco), dos grupos de risco e do VPL associado ao risco. Por fim a construção de um modelo onde o fator de risco esteja hierarquizado, permitindo calcular valores ajustados ao risco para os grupos de fluxo de caixa e projetar o VPL através da simulação estocástica. Como resultado, o modelo fornece tanto retorno econômico do projeto ajustado ao risco, como a distribuição de probabilidades associada com o VPL e a variabilidade que cada um dos fatores de risco no retorno gera no projeto.

Figura 15 – Fluxograma do modelo de avaliação de risco



Fonte: Miorando, 2010, p. 56

Segundo Andersson, Skoogh e Johansson (2011) e Chou (2011), a simulação tem se mostrado uma ferramenta excelente para se modelar e analisar o desempenho de sistemas de manufatura. Isso porque o método de simulação é muito mais flexível, uma vez que responde por variação de processo e tem sido aplicado repetidamente para examinar os riscos do projeto

com relação às estimativas de custos. O uso da simulação em estimativa de custos e receitas fornece aos tomadores de decisões um resumo completo das atividades de produção, juntamente com contabilização de incertezas de custos relacionados conforme o projeto caminha através do sistema.

A simulação é a implementação de um modelo estocástico ao longo do tempo. O risco é inerente em estimativas específicas de custo do sistema. São algumas das vantagens de simulação:

- a) modelos baseados em simulação são mais abrangentes e de fácil compreensão do que uma equação matemática de forma fechada;
- b) simulação pode ser usada para situações complexas, reais ou condições que não podem ser incluídas em modelos analíticos;
- c) períodos podem ser simulados em um curto espaço de tempo;
- d) o custo é menor e é mais prático para a construção de um modelo de computador em um sistema do que construir um sistema físico para experimentação;
- e) simulação permite uma análise (*what-if* ou de sensibilidade) de forma simples;
- f) simulação permite uma maior flexibilidade na representação do sistema e pode ser dimensionada conforme a necessidade;
- g) simulação tem menos hipóteses subjacentes e condições de contorno do que um modelo analítico.

A parte fundamental de um processo de simulação é a construção do modelo. A definição dos valores e eventos incertos e de como eles se relacionam é tarefa do analista e é determinante fundamental da qualidade do resultado.

Para o desenvolvimento de modelo de finanças, a aplicação da Simulação de Monte Carlo apresenta-se como uma técnica eficaz em análises envolvendo riscos. Ela consiste em um experimento de amostragem que tem como objetivo estimar a distribuição de variáveis de saída e entrada, fornecendo soluções através de testes de amostragens estatísticas. É incorporada aos modelos de finanças, fornecendo como resultado aproximações para as distribuições de probabilidade dos parâmetros que estão sendo estudados, permitindo a identificação dos riscos mais significativos que implicam em um estudo de mitigação (WANHUA; RUIYU, 2008; ZHANG, 2015).

Melhorar a “relação risco-retorno” é um ponto central no processo de tomada de decisões de negócios conforme mencionam Floricel e Ibanescu (2008). Assim, trazer a discussão sobre riscos para inovações de produto e processos consiste em ponto relevante que permite capturar a volatilidade do projeto.

A Simulação de Monte Carlo (SMC) é o termo dado aos modelos de simulação que tem uma ou mais variáveis estocásticas. A técnica Monte Carlo permite gerar aleatoriamente centenas de valores amostrais dessas distribuições para calcular os impactos de diferentes valores para as variáveis de risco na viabilidade econômica do sistema simulado. Este procedimento é reforçado por Cheali *et al.* (2016) que propuseram utilizar a técnica Monte Carlo para a caracterização das incertezas de entrada, amostragem, avaliações de modelos e análise das incertezas. Samanez (2009), define a SMC como um método de ensaios estatísticos, em que os valores são estabelecidos por meio de uma seleção aleatória, na qual a probabilidade de escolher determinado resultado entre todos os possíveis é obtida a partir de uma amostragem aleatória de identificação de eventos. Na análise de risco, é possível calcular uma distribuição de probabilidades associada a um resultado do fluxo de caixa (VPL e TIR). Com a distribuição probabilística é possível se calcular as chances do projeto se tornar inviável, fornecendo subsídios para decidir entre as alternativas que possuem diferentes graus de risco. As técnicas usuais de se trabalhar com o risco são:

- a) distribuição de probabilidades;
- b) simulação do fluxo de caixa;
- c) árvore de decisão.

O método de Monte Carlo é uma técnica alternativa promissora para estimar um valor esperado. A ideia é estimar a distribuição de uma estatística extraíndo amostras aleatórias de uma população e observar o comportamento da estatística sobre as amostras. O método possui muitas aplicações, como por exemplo calcular integrais ou simular alguns eventos discretos.

Quando se utiliza a simulação no modelo de controle de estoque de uma loja, verifica-se que ela fornece um meio para estimar o ganho esperado da loja até certo tempo fixo e determina uma boa política de gerenciamento do estoque visando um ganho maior. Uma outra característica dessa aplicação é que o modelo pode ser ajustado para incluir outros eventos, para outras lojas, podendo ser adaptado para o controle de vários produtos em um estoque.

Outra aplicação é quantificar o ganho esperado em uma opção de compra de ações, pois fornece um meio para verificar se vale ou não a pena possuir uma opção de compra com base em uma determinada política de exercício dessa opção.

Ao utilizar a SMC para o risco de uma empresa de produção de biodiesel, verifica-se que o modelo é bem abrangente, podendo ser ajustado para incluir novos eventos e para diferentes produtos. Ele serve tanto para avaliar a situação de uma empresa ao final de um certo período de tempo, como pode ser usado para avaliar o risco da abertura de uma nova empresa

de biodiesel, isto é, dadas as condições iniciais pode-se prever se um novo negócio tem probabilidade de ter sucesso ou não, com uma certa confiança.

Richardson, Johnson e Outlaw (2012) recomendam que a modelagem dos sistemas de produção com microalgas substitua as estimativas pontuais (ou suposições) para as variáveis de risco com distribuições de probabilidade, diferentemente da abordagem tradicional como realizada por Chisti (2007b).

Portanto, justifica-se o presente trabalho para agregar conhecimento com base nas lacunas encontradas a partir da investigação das publicações descritas neste tópico, tais como o estudo em menor escala trazendo resultados diferentes, uma abordagem probabilística na análise econômica e o aprofundamento da discussão sobre as políticas de incentivos a projetos de baixo impacto ambiental.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem natureza aplicada e faz uma abordagem quantitativa através de modelagem e simulação numérica. Os procedimentos técnicos para o seu desenvolvimento são constituídos das seguintes etapas: Modelagem econômica e Simulação Monte Carlo. Os dados para o estudo econômico foram obtidos a partir de dados já publicados na literatura científica.

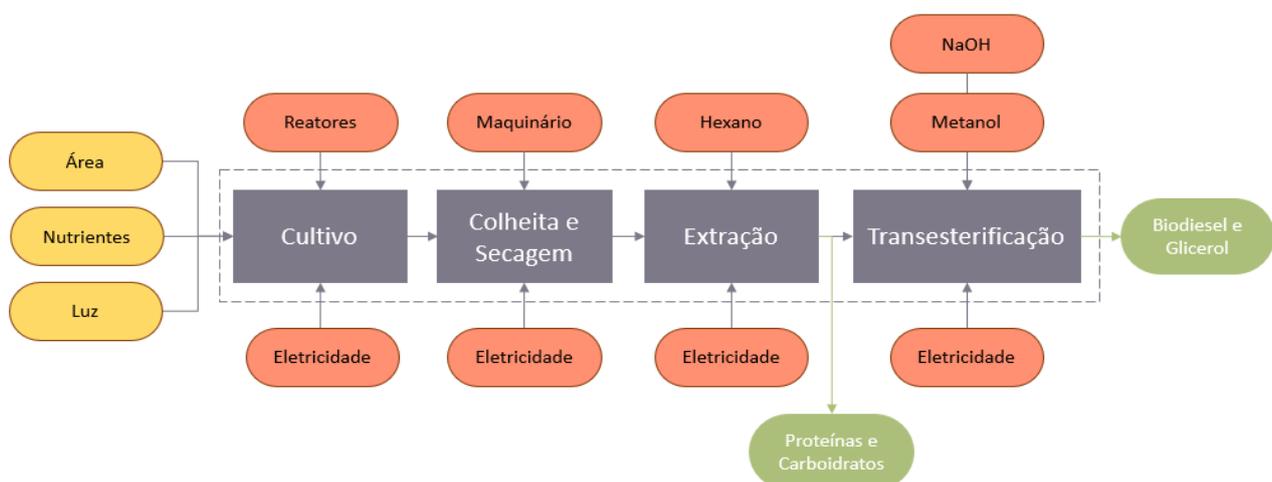
3.1 DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A análise econômica realizada neste trabalho foi feita com base em múltiplos cenários do processo de produção de biodiesel (Figura 16) subdividido em cinco etapas:

- a) cultivo;
- b) colheita e secagem;
- c) pré-tratamento;
- d) extração de lipídios;
- e) reação de transesterificação.

Além disso, foram considerados custos adicionais para o padrão de qualidade estipulado pela norma brasileira RANP 45. Os dados foram obtidos de duas formas: primeiramente a partir de um estudo piloto realizado por Mendes (2016) no laboratório no Departamento de Ciências do Mar da Universidade Federal de São Paulo e; segundo por dados publicados em artigos científicos.

Figura 16 – Processo de produção de biodiesel



Fonte: Autor

3.1.1 Etapa 1 - Cultivo

A partir dos ensaios realizados por Mendes (2016), na Universidade Federal de São Paulo, na etapa de cultivo, foi utilizada a cepa de microalga marinha *Tetraselmis* sp. (cepa 72) – cedida gentilmente pelo Banco de Microrganismos Aidar & Kutner (BMA&K) do Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP), avaliada em triplicata em meio “Guillard F2” (GUILLARD; RYTHER, 1962), à temperatura de 22°C, salinidade 36 g L⁻¹, fotoperíodo 12:12 horas (claro:escuro) e pH 8,0. A escolha deste gênero de alga deve-se ao cultivo poder ser feito em água salobra ou salgada reduzindo-se a dependência por água doce. A *Tetraselmis* sp. apresenta algumas características promissoras quando comparadas às microalgas comuns. A biomassa gerada a partir desta microalga pode ser concentrada através de sedimentação natural, fazendo reduzir o volume total de cultura de 100% para 20% em apenas 6 horas (PEREIRA, *et al.* 2018). Esta propriedade é importante para diminuir custos de colheita, que é considerada uma das etapas mais caras do processo (MATOS *et al.*, 2013).

Para a realização da modelagem econômica, o sistema de produção do biomassa foi escalado para uma operação em fotobiorreator tubular horizontal composto de tubos de polimetilmetacrilato (PMMA) e capacidade de 100 m³, que representa um módulo similar ao reportado por Pereira *et al.* (2018), com área de implantação de 400 m² e operação semicontínua, isto é, com a colheita realizada a cada 14 dias retirando-se 70% do volume total da cultura enquanto a cultura restante é renovada com meio de cultivo fresco.

Neste sistema, não foi considerada a inoculação de nutrientes (p.ex. N e P). O Complexo Estuarino de Santos é uma região eutrofizada devido ao lançamento de águas residuárias, atividades industriais e portuárias (AZEVEDO; BRAGA, 2011; APRILE; SIQUEIRA, 2012; SEABRA PEREIRA *et al.*, 2014). Esta característica faz com que a água do estuário forneça todos os nutrientes necessários ao cultivo de microalgas, eventualmente necessitando de fontes suplementares.

3.1.2 Etapa 2 - Colheita e Secagem

Ao final do crescimento, isto é, ao término da fase exponencial (15^o dia), os cultivos foram filtrados à vácuo em papel de filtro de 3,0 µm acoplado a funil de Büchner, à vácuo. O papel de filtro com o material retido foi seco em estufa a 60 °C para obtenção da biomassa de microalgas. No sistema proposto, considera-se a colheita/secagem sendo realizada através de

sedimentação natural, que reduz o volume da cultura em 80% para este tipo de alga, sendo o restante centrifugado e seco em estufa.

3.1.3 Etapa 4 - Pré-tratamento

O pré-tratamento para a ruptura foi realizado pelo método de maceração, por se tratar da escala de laboratório (nesta etapa) e pelo seu baixo custo.

3.1.4 Etapa 3 - Extração de lipídios

A extração dos lipídios foi realizada com o solvente hexano na proporção de 1:100 (m/v), durante 1 h à temperatura ambiente. Ao final desse período, o frasco contendo o extrato lipídico foi deixado para secar totalmente em estufa a 80 °C. Após resfriamento, o extrato resultante foi pesado para cálculo do rendimento percentual da fração lipídica em relação à massa inicial de microalga.

3.1.5 Etapa 4 - Reação de transesterificação

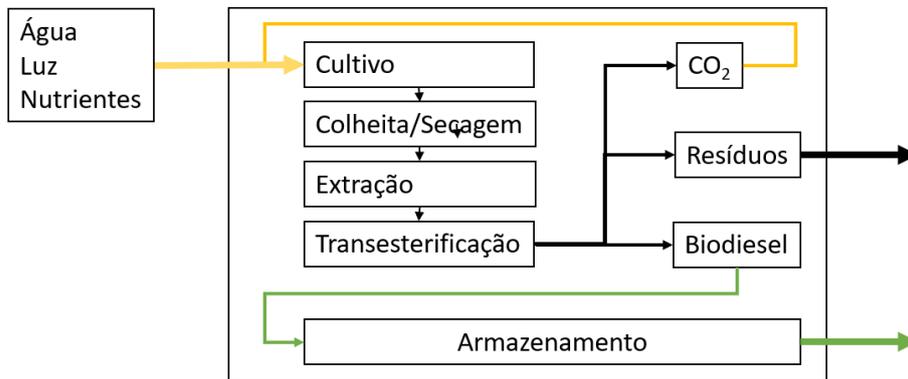
Para a reação de transesterificação básica com metanol foi estimada um rendimento de 80%, o que representa um número otimista com base no estudo realizado por Pereira *et al.* (2018). Os mesmos autores, relatam que é possível produzir biodiesel a partir da microalga *Tetraselmis* sp. em conformidade com a maioria das normas de qualidade, tanto a EN14214 quanto a ASTM D6751.

Além do custo da etapa de pré-tratamento, foi considerado também um custo adicional para a realização das amostragens, testes analíticos e enquadramento dos produtos biodiesel e glicerol às especificações nacionais RANP 45.

3.1.6 Sistema modular

O sistema modular avaliado neste trabalho consiste na produção de biodiesel em pequenas unidades capazes de serem multiplicadas ao serem acopladas umas às outras. Um modelo esquemático destes módulos pode ser visualizado na Figura 17, a seguir.

Figura 17 – Unidade modular de produção de biodiesel de microalgas



Fonte: Autor

3.2 MODELO ECONÔMICO

O modelo econômico desenvolvido neste trabalho busca inicialmente identificar as principais variáveis de custo e as respectivas receitas identificadas no processo de produção de biodiesel, assim como as variáveis de risco do modelo. Estudo piloto a partir dos dados experimentais e pesquisas em campo realizadas por Mendes (2016), foi feita a modelagem econômica de todo o processo de produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas.

Inicialmente foram levantados os custos de construção e operação de um processo em escala modular de microalgas através de premissas e dados obtidos na literatura (CARLSON *et al.*, 2010; DAVIS; ADEN; PIENKOS, 2011; BATAN; GRAFF; BRADLEY, 2016), tal como uso de valores reais do preço do litro do biodiesel no mercado (Tabela 5).

Tabela 5 – Entradas do modelo econômico

Dados Operacionais	Valor
Tamanho da planta (m ²)	400
Volume do fotobiorreator (m ³)	100
Tempo de operação (dias)	360
Biomassa (kg m ⁻³)	0,6349
Produtividade de biomassa (g L ⁻¹ d ⁻¹)	0,045
Biodiesel (kg m ⁻³)	0,062
Teor lipídico médio	9,8%
Biodiesel (L m ⁻³)	0,0384
Rendimento da transesterificação médio	80%

Fonte: Autor

Na análise do Capex, foram consideradas as seguintes variáveis dispostas na Tabela 6. O custo do fotobiorreator foi elaborado a partir de orçamentos de peças necessárias ao projeto de construção e obtidos por empresas nacionais e internacionais. O sistema de bombeamento de água utilizado é simples, suficiente para obtenção da água. Os tanques de sedimentação possuem capacidade volumétrica para 70 m³ e centrifugas necessárias à concentração de biomassa presente nos 14 m³ (20% da cultura previamente sedimentada).

Para a extração lipídica, foi considerada a quantidade de solvente necessária para a quantidade de biomassa recuperada e os respectivos materiais, bem como para a reação de transesterificação e padrão de qualidade.

Tabela 6 – Variáveis de despesas de capital (Capex)

Unidade do processo	Variável
<i>Custo direto instalado</i>	
Cultivo	Fotobiorreator Tubular (100 m ³)
	Sistema de bombeamento de água
	Sistema de injeção de CO ₂
	Sistema de circulação cultivo
	Sistema de iluminação
	Ar condicionado
Colheita/Secagem	Centrífuga
	Decantadores
	Estufa
Pré-tratamento	Armazenamento
Extração	Materiais para a ruptura celular
Transesterificação	Materiais para extração lipídica
	Materiais
Outros custos diretos	Armazenamento
	Tratamento para adequação do biodiesel à norma brasileira RANP 45
<i>Custo indireto instalado</i>	
Desenvolvimento de site	Plataforma de negócios (divulgação, compra e venda)
Mão-de-obra	Trabalhadores
Trabalho e construção	Ferramentas de trabalho, transporte, alimentação, etc.
<i>Capital não depreciável</i>	
Custo da área (ano)	Ex.: Área no Porto de Santos (CODESP)

Fonte: Autor

Na análise do Opex foram consideradas as seguintes variáveis dispostas na Tabela 7.

Tabela 7 – Variáveis de despesas operacionais (Opex)

Processo	Variável
Produção de lipídio	Injeção de CO ₂
	Consumo de solvente
	Manutenção reator (10 anos para reposição de tubos)
	Utilidades (refrigeração, água etc.)
	Trabalho e despesas gerais
	Manutenção, impostos e seguro
Produção de Biodiesel (Transesterificação e Padrão de Qualidade)	Reagentes
	Utilidades (refrigeração, água etc.)
	Trabalho e despesas gerais
	Manutenção, impostos e seguro

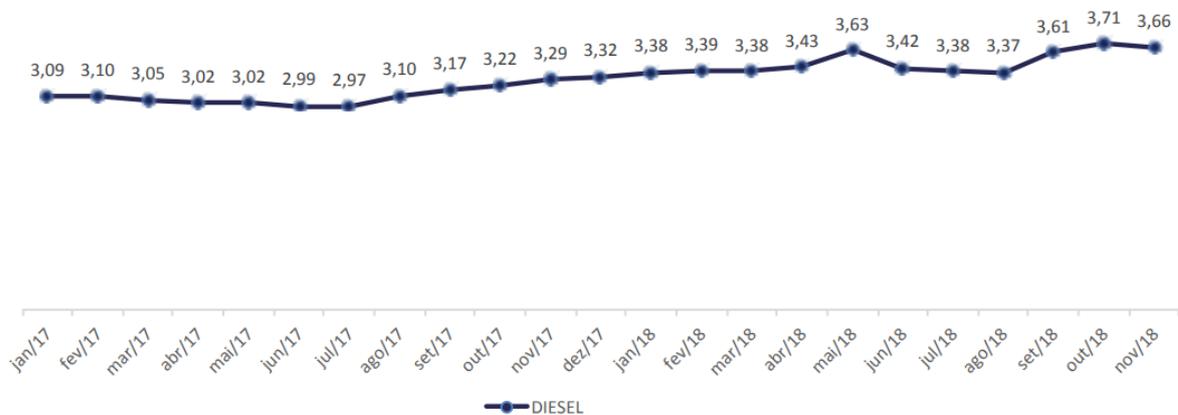
Fonte: Autor

O valor da receita pode ser calculado conforme a Equação 1, onde o preço do petrodiesel refere-se ao encontrado nos postos de combustíveis do estado de São Paulo e o volume de biodiesel produzidos mensalmente a partir da planta de microalgas.

$$\text{Receita} = \text{Preço Petrodiesel} * \text{Volume Biodiesel} \quad (1)$$

Sendo, o Preço do petrodiesel (como mostra a Figura 18) e o Volume de Biodiesel variáveis estocásticas.

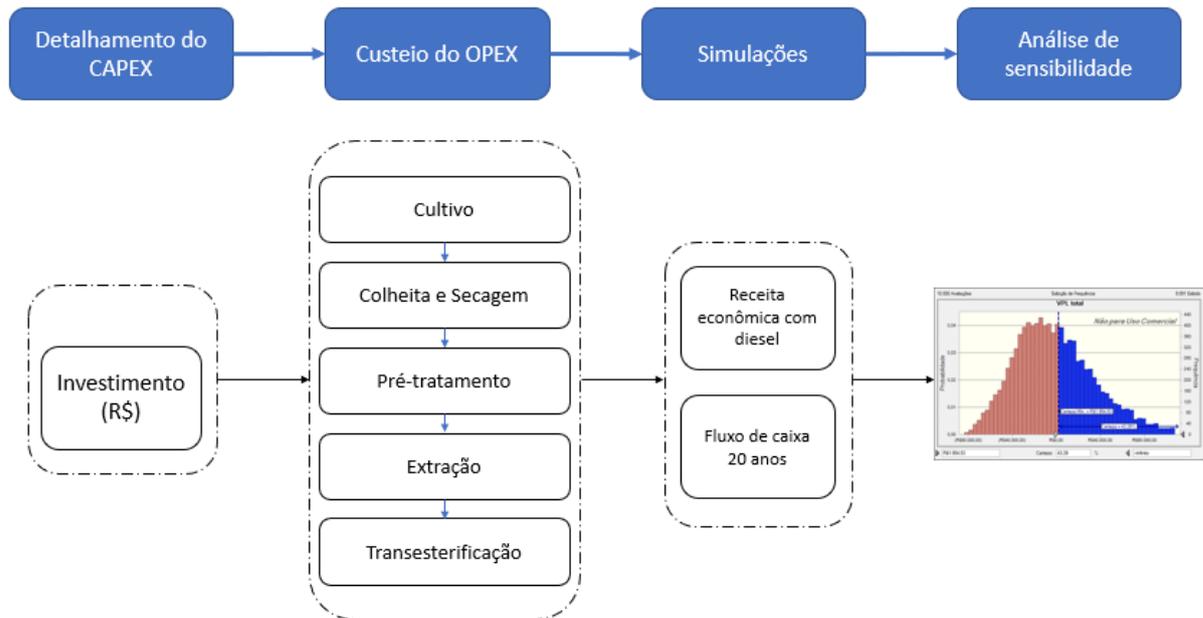
Figura 18 – Preços do petrodiesel ao consumidor final (Brasil), em R\$/L



Fonte: ANP, 2019

O modelo econômico (Figura 19) de produção de biodiesel desenvolvido neste trabalho foi feito com base na construção detalhada do Capex, no custeio de cada etapa do processo de produção do biodiesel, nas simulações econômicas com diferentes cenários e, por fim, a análise de sensibilidade visando responder quais são as variáveis mais importantes neste tipo de projeto.

Figura 19 – Modelo econômico de produção de biodiesel algal



Fonte: Autor

A análise econômica foi feita aplicando técnicas de simulação Monte Carlo, através do software Oracle Crystal Ball® como meio de integrar a análise de risco ao processo de avaliação econômica. Para reforçar a análise, foram utilizadas técnicas de investimento (Valor Presente Líquido - VPL e Taxa Interna de Retorno - TIR) e análise de sensibilidade, identificando as variáveis que exercem maior impacto na produção do biodiesel e consequentemente no fluxo de caixa.

$$VPL = \sum_{j=1}^n F_j \quad (2)$$

Onde, “F” é o fluxo de caixa, “j” é o período de cada fluxo de caixa.

As simulações Monte Carlo foram realizadas com 10.000 execuções (determinadas através de um estudo de convergência), com tempo de projeto para 20 anos e mercado potencial para a venda do biodiesel. Mais detalhes sobre o fluxo de caixa estão no Anexo A.

4 RESULTADOS

A análise técnica e econômica realizada neste trabalho foi conduzida através de pressupostos econômicos bem como de dados primários obtidos por meio de ensaios em laboratório, informações publicadas em artigos científicos e considerando-se as variações nas distribuições de probabilidade das variáveis de custo. O fluxo de caixa projetado para 20 anos para a produção de biodiesel em uma pequena escala modular, com reator de 100 m³, área de 400 m² e utilizando fontes alternativas de nutrientes mostrou-se inviável dadas as condições em 2019.

4.1 AVALIAÇÃO TÉCNICA

A produtividade de biomassa utilizada como base neste trabalho, de 0,045 g L⁻¹d⁻¹, mostrou-se abaixo do reportado em outros estudos que mostram o cultivo da mesma alga e em condições semelhantes (PEREIRA, *et al.* 2018; KANG; HEO; LEE, 2019). Por exemplo, Pereira *et al.* (2018) obtiveram uma produtividade de biomassa de 0,080 g L⁻¹d⁻¹ em fotobiorreator tubular horizontal e Kang, Heo e Lee (2019) uma produtividade de 0,063 g L⁻¹d⁻¹, utilizando sistema aberto de cultivo. Todavia, esta baixa produtividade é apenas um fator que pode ser melhorado através de mudanças nas etapas de cultivo e colheita/secagem.

A injeção de CO₂ puro poderia contribuir para o aumento da produtividade da biomassa. No entanto, quando o cultivo realizado na escala de laboratório, o CO₂ puro é dispensável. O carbono é o nutriente essencial para o cultivo, sendo sua concentração preponderante, pois é um constituinte básico para a formação de todas as substâncias orgânicas sintetizadas pela célula, por exemplo, proteínas, carboidratos, ácidos nucleicos, vitaminas e lipídios (LOURENÇO, 2006). No entanto, altas concentrações de CO₂ no cultivo pode diminuir o pH, o que pode inibir o crescimento das algas (HUANG *et al.*, 2017).

A produtividade de biomassa também está relacionada a temperatura. Pereira *et al.* (2018) realizaram o cultivo de *Tetraselmis* sp. sob temperatura variando próximo a 20 °C e relataram uma diminuição de cerca de 15% quando a temperatura variou abaixo de 15 °C.

As microalgas, sob condições normais de crescimento, isto é, com o fornecimento adequado de nutrientes, direcionam seu metabolismo para a produção de carboidratos como reserva energética ao invés de lipídios (DICKINSON *et al.*, 2017). Quando o cultivo é feito em depleção nutricional, recomenda-se que esta seja realizada em duas fases, sendo a primeira com o cultivo em condições nutricionais, adequadas para atingir uma alta densidade de células e

uma segunda fase via estresse ambiental (depleção de nutrientes, salinidade, temperatura e irradiação) para uma elevação na quantidade de lipídios.

O método de colheita considerado neste trabalho foi realizado através de filtração e secagem em estufa, conforme descrito na seção anterior 3.1.2. Apesar destes métodos serem eficientes, quando aumentada a escala, eleva-se ainda mais os custos de produção devido à necessidade de recorrentes substituições dos filtros e do alto consumo de energia nas estufas quando comparados aos métodos usuais de colheita e secagem através de centrífugas (que também possuem elevado consumo de energia) e secagem natural (LEITE *et al.* 2013, MENEGAZZO; FONSECA, 2019). Uma alternativa aos altos custos nesta etapa do processo é a floculação, que possui menor custo operacional e energético, facilidade no escalonamento e baixa influência no conteúdo de lipídios (BANERJEE *et al.*, 2013; CHEN *et al.*, 2016; JAPAR; TAKRIFF; YASIN, 2017).

Como descrito anteriormente, o pré-tratamento para a ruptura da parede celular foi realizado pelo método de maceração, por se tratar da escala de laboratório (nesta etapa) e pelo seu baixo custo. Ressalta-se que este método não é adequado para grandes quantidades de biomassa. Existem, portanto outros métodos mais comuns para maiores escalas, tais como a homogeneização a alta pressão, a ruptura enzimática e a eletroporação (DICKINSON *et al.*, 2017).

4.2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Os dados de Capex e Opex estão apresentados na Tabela 8. Esta tabela foi estruturada com base nas informações expostas no Anexo A (Tabelas Suplementares 12 e 13, respectivamente para Capex e Opex). As despesas referentes às análises de verificação e ajustes de atendimento à norma RANP 45 foram incorporadas no Opex – Transesterificação.

O fluxo de caixa foi projetado para 20 anos de projeto, com taxa de desconto de 6,5%, mostrou-se inviável para implementação em 2019, com VPL negativo de R\$ 880.901,76.

Tabela 8 – Dados do modelo econômico

Capex (R\$)		234.537,40	
Dados Operacionais			
RENDIMENTO LIPÍDIO	10%		
Preço Petrodiesel	3,358		
Produção de biomassa (kg) (anual)	1142,19		
Lipídio (L)	111,04		
Reação (fator de conversão)	0,80		
Biodiesel (kg)	88,83		
Volume de biodiesel (L)	70,18		
Rendimento da transesterificação	0,79		
Opex - Produção de lipídio			
Injeção de CO ₂ (kg)		R\$	20.000,00
Consumo de solvente		R\$	10.000,00
Manutenção reator (5 anos reposição de tubos)		R\$	8.000,00
Utilidades (refrigeração, água etc.)		R\$	15.000,00
Trabalho e despesas gerais		R\$	12.000,00
Manutenção e seguro		R\$	5.000,00
Opex - Transesterificação			
Reagentes		R\$	1.700,00
Utilidades (refrigeração, água etc.)		R\$	850,00
Trabalho e despesas gerais		R\$	12.000,00
Manutenção, impostos e seguro		R\$	4.000,00

Fonte: Autor

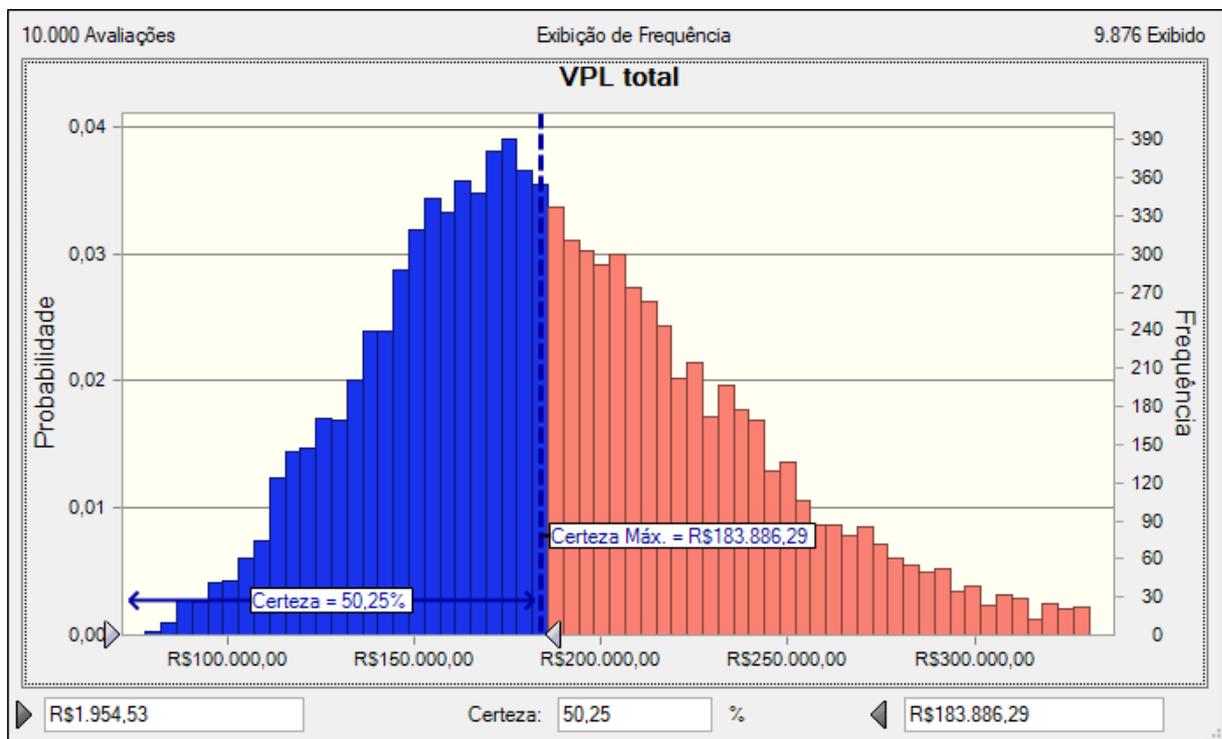
5 DISCUSSÃO

Entre as pesquisas atuais, o biodiesel ganha destaque como uma das alternativas de substituição ao petrodiesel, sendo fundamental estudos técnicos-econômicos para fundamentar sua produção e comercialização.

Para validar o modelo de risco e ampliar o entendimento sobre a viabilidade econômica do processo de produção do biodiesel neste estudo, foi realizada uma análise de sensibilidade elevando-se virtualmente em 200 vezes o valor de produtividade em óleo, que é o valor quando as receitas superam as despesas. Os resultados das simulações desta análise de sensibilidade estão representados na Figura 20.

A Figura 21 representa a distribuição de probabilidade para o Valor Presente Líquido (VPL). O simulador que gera esta curva de distribuição de probabilidade do VPL fez 10.000 interações, combinando em cada uma delas os valores de cada variável estocástica, dando como resultado um valor de VPL e a sua chance de ocorrência.

Figura 20 – Análise de sensibilidade do modelo econômico



Fonte: Autor

Por exemplo, ele calcula o VPL com um preço de petrodiesel combinado a um valor de produtividade e inflação. No caso, a inflação corrige a receita. Como estes três valores variam

com o tempo, pode-se realizar inúmeras combinações com diferentes resultados para o VPL. Através desta curva pode-se estimar um valor de VPL atrelado a um percentual de certeza, no caso da imagem, com uma certeza de 50,25%, o VPL é R\$ 183.886,29. Ou seja, existe uma chance de 50% de ocorrência deste valor de VPL, cabendo aos gestores decidirem qual é um valor aceitável para o projeto.

Retomando a discussão sobre a viabilidade do projeto, para que o projeto se tornasse viável seria necessário um valor de produtividade 200 vezes maior do que a obtida em laboratório no trabalho realizado por Mendes (2016). Isso mostra que o alto investimento de capital, especialmente o custo do fotobiorreator tubular, é muito elevado em relação as receitas obtidas ao longo dos 20 anos de operação da planta.

Com base no resultado exposto acima, identificou-se que não seria necessário incorporar no modelo econômico a probabilidade de valores nas variáveis, sendo consideradas estocásticas o preço do petrodiesel e a produtividade em óleo dos dados obtidos por Mendes (2016). Vale destacar algumas especificidades em relação as premissas estabelecidas para análise em estudo. O Capex foi dimensionado nas condições atuais dos custos dos equipamentos e construção, assim como o Opex não considerou possíveis reduções de custo em cenários de maior escala. Destaca-se ainda a inclusão das despesas com o pré-tratamento da biomassa para a extração lipídica, o que é recomendado para a produção em larga escala, aumentando a eficiência de extração, conforme revisão realizada por Dickinson *et al.* (2017) e ainda as despesas com as análises e enquadramento do biodiesel na norma RANP 45, o que eleva ainda mais o Capex e Opex, sendo este procedimento desconsiderado nas principais publicações como foi mostrado na Seção 2.2 deste trabalho.

Foi criado um cenário comparativo com a produtividade de outros tipos de algas com base em dados da literatura (TSUKAHARA; SAWAYAMA, 2005; BRENNAN; OWENDE, 2010; LEE *et al.*, 2010; COSTA; DE MORAIS, 2011; KHOO *et al.*, 2011; THANG *et al.*, 2011; MENDES, 2016), como mostra a Tabela 9, com destaque para o tipo de alga com o maior volume anual de biodiesel (em vermelho) comparando com a base deste estudo (em verde).

Tabela 9 – Produtividade de diferentes tipos de algas

Microalga	Biomassa (g L ⁻¹)	Produtividade (g L ⁻¹ dia ⁻¹)	Produção anual de biomassa (kg)	Rendimento lipídico Anual (L)	Volume anual diesel (L)
<i>Arthrospira</i>	2,37	1,15	2068,85	144,82	91,53
<i>Arthrospira platensis</i>	6,00	2,70	4857,3	3400,11	2148,87
<i>Botryococcus braunii</i>	0,40	0,05	89,95	71,96	45,48
<i>Chlorella sorokiniana</i>	1,50	1,47	2644,53	925,59	584,97
<i>Chlorella vulgaris</i>	---	0,07	125,93	27,70	17,51
<i>Haematococcus pluvialis</i>	7,00	0,41	737,59	221,28	139,85
<i>Nannochloropsis</i> sp.	0,50	0,27	485,73	145,72	92,09
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	---	1,90	3418,1	1025,43	648,07
<i>Porphyridium cruentum</i>	3,00	1,50	2698,5	377,79	238,76
<i>Scenedesmus</i> sp.	---	0,07	125,93	88,15	55,71
<i>Spirulina platensis</i>	---	0,42	755,58	68,00	42,98
<i>Tetraselmis</i> sp.	1,70	0,63	1142,19	111,04	70,18

Fonte: Autor

Como comparativo, o fluxo de caixa foi alterado substituindo o valor de produtividade da alga com base no tipo de alga *Arthrospira platensis* que possui o maior volume anual de biodiesel, mostrando-se também inviável economicamente e com um VPL negativo de R\$ 874.075,60. Ou seja, mesmo considerando uma alga bastante produtiva, o VPL variou menos de 1%. Isso quer dizer que a viabilidade econômica do processo de produção do biodiesel dentro dos parâmetros descritos neste trabalho independe do tipo de alga. É importante destacar que cada tipo de alga requer mudanças em todo o processo de produção do biodiesel e, obviamente, mudanças em todo o custeio da produção. Porém, como o intuito foi apenas para a validação do modelo econômico, estas mudanças não foram consideradas ficando apenas a alteração da produtividade.

Retomando o estudo desenvolvido por Miorando (2010), foi elaborado um modelo econômico-probabilístico para incorporar a análise de risco no processo de avaliação econômica em projetos que envolvem a Inovação Tecnológica. Partindo-se do fluxo de caixa determinístico e do mapeamento de riscos, pode ser trabalhada a abordagem probabilística do projeto biodiesel. Para cada variável que envolve risco ou incerteza, foram definidos os possíveis valores com uma distribuição de probabilidade. O tipo de distribuição que se seleciona foi baseado nas condições circundantes a essa variável.

Apesar de o projeto ser economicamente inviável, destaca-se a importância da discussão sobre envolvendo as variáveis. O investimento no biodiesel algal, considerando este produto como única saída do modelo econômico, ainda não é atrativo mesmo que haja políticas de subsídios que reduzam as despesas de capital, como corrobora os estudos de Richardson *et al.*

(2014a e 2014b); Batan, Graff e Bradley (2016); Santibañez-Aguilar *et al.* (2016); e Xia e Tang (2017).

5.1 CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS

Este trabalho amplia o entendimento sobre a produção de biodiesel a partir de microalgas no Brasil partindo de uma produção em pequena escala, o que produz um conjunto de resultados diferentes de quando se estuda a produção de biodiesel de algas em larga escala, como visto na grande parte dos estudos já publicados sobre o tema. A principal contribuição deste estudo foi o desenvolvimento de um modelo econômico estocástico incorporando a avaliação de risco para cada etapa do processo para tomada de decisão.

O trabalho também aprofunda a discussão sobre os aspectos técnicos e econômicos sobre possíveis reduções do Capex e Opex e, sobretudo, sobre políticas que facilitem a implantação de projetos de pequeno porte que visem a produção de biocombustível ambientalmente mais amigável. O modelo proposto pode ainda servir para estudos futuros, tanto na tentativa de aprofundar o conhecimento sobre este tema como também para outras investigações em outros projetos, matérias-primas, processos e produtos. Por exemplo, dado que o biodiesel não é rentável neste tipo de projeto, poderia se investigar a utilização da biomassa para lipídios de alto valor comercial e utilização em fármacos, alimentação humana e animal, estendendo-se também para as proteínas de valor comercial encontradas na biomassa das microalgas.

O estudo evidencia a necessidade de formulação de políticas públicas (programas, ações e atividades desenvolvidas pelo Estado) que possam facilitar a implantação de projetos de baixo impacto ambiental e livres de carbono.

5.2 CONTRIBUIÇÕES PRÁTICAS

Apesar das limitações técnicas, o trabalho contribui com o desenvolvimento de um modelo probabilístico como ferramenta de gestão e avaliação de riscos, auxiliando na tomada de decisão, não somente na produção de biodiesel a partir de microalgas, mas como também projetos semelhantes com outros produtos. O modelo econômico é de fácil atendimento e possibilita identificar os principais ofensores econômicos do sistema produtivo.

6 CONCLUSÕES

Os biocombustíveis a partir da biomassa de microalgas são promissoras alternativas em um futuro onde o petróleo tende a se esgotar. A partir de uma extensa revisão bibliográfica, foi constatado que grande parte dos estudos técnico-econômicos abordam projetos de grande escala (p.ex. biorrefinarias) e usam uma contabilidade tradicional determinística.

O trabalho reúne uma série de informações técnicas sobre a produção do biodiesel a partir do cultivo de microalgas em pequenas escalas visando a implementação deste tipo de projeto em locais onde há restrições de área. Fazendo-se uma avaliação econômica determinística, estima-se que a produção do biodiesel a partir do cultivo de microalgas em fotobiorreatores de 100 m³ não é viável dadas as condições em 2019, sendo o maior ofensor econômico o alto custo de produção. As limitações técnicas do trabalho foram a utilização de dados produzidos em escala de laboratório; dados que tiveram de ser estimados como os valores de injeção do CO₂ para uma maior produtividade e o rendimento da reação de transesterificação estimada em 80%, que pode ser diferente na prática.

Para a viabilização econômica, a produtividade em óleo das microalgas deveria ser de aproximadamente 200 vezes do que o obtido no laboratório, o que não é factível. Uma alternativa a ser considerada é a cogeração de outros bioprodutos de valor agregado ou até mesmo o aproveitamento do óleo algal para outros fins que não seja o biodiesel. O desenvolvimento de um modelo probabilístico que incorpora variáveis estocásticas em todas as etapas do processo produtivo produziu uma ferramenta de fácil acesso para a tomada de decisões.

Este estudo abre caminho para outras pesquisas com alternativas como a obtenção de outros produtos de maior valor ou até mesmo a integração de processos que reduzam os custos de operação, por exemplo a integração do biodiesel com o biogás a partir da digestão anaeróbica da biomassa algal.

Destaca-se também a necessidade de uma discussão mais profunda em torno das políticas públicas que facilitem a implementação de projetos ambientalmente amigáveis, por exemplo políticas de subsídios e isenções. Outros aspectos podem ser mais bem discutidos, como a evolução do programa RenovaBio, a política de mistura de biodiesel ao petrodiesel e os créditos de carbono.

REFERÊNCIAS

- ABATE, S. *et al.* New Sustainable Model of Biorefineries: Biofactories and Challenges of Integrating Bio- and Solar Refineries. **ChemSusChem**, v. 8, n. 17, p. 2854-2866, 2015.
- ACIÉN, F. G. *et al.* 1 - Photobioreactors for the production of microalgae. In: Gonzalez-Fernandez, C.; Muñoz, R. **Microalgae-Based Biofuels and Bioproducts: From Feedstock Cultivation to End-Products** (Woodhead Publishing Series in Energy). 1. ed. Woodhead Publishing, 2017. p. 1-44.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RANP 45 - 2014**. Brasil, ago., 2014. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2014/agosto&item=ranp-45-2014>. Acesso em: 21 jan. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **RENOVABIO**. Brasil, dez, 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/biocombustiveis/renovabio>. Acesso em: 22 out. 2019.
- ALGAE INDUSTRY MAGAZINE. **Biomassa sendo recolhida após centrifugação**. 2013. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.algaeindustrymagazine.com/algae-saltlick-developed-in-netherlands>. Acesso em: 26 set. 2018.
- ALGAE RESEARCH SUPPLY. **Microalgas *Chlorella vulgaris*, *Tetraselmis sp.* e *Nannochloropsis sp.***. 2017. 1 fotografia. Disponível em: <https://algaeresearchsupply.com>. Acesso em: 13 mar. 2019.
- ALGASOL RENEWABLES. **Fotobiorreatores *Soft-frame***. 2018. 1 fotografia. Disponível em: <http://www.algasolrenewables.com>. Acesso em: 13 mar. 2019.
- ANDERSON, Ian. Songs From The Wood. In: Jethro Tull. **Songs From The Wood**. Londres: Morgan Studios, 1977. 1 CD. Faixa 1 (4 min 52 s). Disponível em: <https://www.letras.mus.br/jethro-tull/19903/traducao.html>. Acesso em: 05 jun. 2019.
- ANDERSSON, J.; SKOOGH, A.; JOHANSSON, B. Environmental activity based cost using discrete event simulation. In: PROCEEDINGS OF THE 2011 WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2011, Arizona. **Anais...** Arizona, EUA: IEEE, 2011. p. 891-902.
- ANDRADE, Diva Souza; COLOZZI FILHO, Arnaldo. Potencialidades e desafios do cultivo. In: ANDRADE, Diva Souza; COLOZZI FILHO, Arnaldo. **Microalgas de águas continentais**. 8.ed. Londrina: IAPAR, 2014.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D6751-18**: Standard Specification for Biodiesel Fuel Blend Stock (B100) for Middle Distillate Fuels, Pensilvânia, EUA, 2018. Disponível em: www.astm.org. Acesso em: 21 jan. 2019.
- APRILE, F.; SIQUEIRA, G. W. Seasonal and spatial variations of dissolved carbon and nitrogen in the Santos estuarine system, Southeastern Brazil. **Journal of Oceanography and Marine Science**, v. 3, n. 1, p. 8-18, jan. 2012.

- ARZAMENDI, G.; ARGUIÑARENA, E.; CAMPO, I.; ZABALA, S.; GANDÍA, L. M. Alkaline and alkaline-earth metals compounds as catalysts for the methanolysis of sunflower oil. **Catalysis Today**, v. 133, p. 305-313, 2008.
- ASLAN, S.; KAPDAN, I. Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae. **Ecological Engineering**, v. 28, n. 1, p. 64-70, nov. 2006.
- AZEVEDO, J. S.; BRAGA, E. S. Hydrochemical characterization meant for environmental certifying of the Santos-São Vicente and Cananéia estuaries. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 44, n. 2, p. 52-61, 2011.
- BANERJEE, C. *et al.* Study of algal biomass harvesting using cationic guar gum from the natural plant source as flocculant. **Carbohydrate Polymers**, v. 92, n. 1, p. 675-681, jan. 2013.
- BATAN, L. Y.; GRAFF, G. D.; BRADLEY, T. H. Techno-economic and Monte Carlo probabilistic analysis of microalgae biofuel production system. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 45-52, nov. 2016.
- BAUDRY, G.; MACHARIS, C.; VALLÉE, T. Can microalgae biodiesel contribute to achieve the sustainability objectives in the transport sector in France by 2030? A comparison between first, second and third generation biofuels through a range-based Multi-Actor Multi-Criteria Analysis. **Energy**, v. 155, p. 1032-1046, jul. 2018.
- BORGES, M. E.; DÍAZ, L. Recent developments on heterogeneous catalysts for biodiesel production by oil esterification and transesterification reactions: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, p. 2839-2849, 2012.
- BRENNAN, L., OWENDE, P. Biofuels from microalgae - A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, p. 557-577, 2010.
- BRUINS, M. E.; SANDERS, J. P. M. Small-scale processing of biomass for biorefinery. **Biofuels Bioproducts and Biorefining**, v. 6, p. 135-145, 2012.
- CAMPENNI, L. *et al.* Carotenoid and lipid production by the autotrophic microalga *Chlorella protothecoides* under nutritional, salinity, and luminosity stress conditions. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 97, n. 3., p. 1383-1393, fev. 2013.
- CHANG, H.-X. *et al.* An annular photobioreactor with ion-exchange-membrane for non-touch microalgae cultivation with wastewater. **Bioresource Technology**, v. 219, p. 668-676, 2016.
- CHEALI, P. *et al.* Economic risk analysis and critical comparison of optimal biorefinery concepts. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 10, n. 4, p. 435-445, jul. 2016.
- CHEN, J. *et al.* Microalgal industry in China: challenges and prospects. **Journal of Applied Phycology**, v. 28, n. 2, p. 715-725, 2016.

- CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, p. 294-306, 2007a.
- _____. Biodiesel from microalgae beats bioethanol. **Trends in Biotechnology**, v. 26, n. 3, p. 126-131, 2007b.
- _____. Constraints to commercialization of algal fuels. **Journal of Biotechnology**, v. 167, p. 201-214, 2013.
- CHOU, J.-S. Cost simulation in an item-based project involving construction engineering and management. **International Journal of Project Management**, v. 29, n. 6, p. 706-717, 2011.
- CHU, P. L. *et al.* Financial analysis and risk assessment of hydroprocessed renewable jet fuel production from camelina, carinata and used cooking oil. **Applied Energy**, v. 198, p. 401-409, 2017.
- CLAUSER, N. M. *et al.* Techno-economic assessment of carboxylic acids, furfural, and pellet production in a pine sawdust biorefinery. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 12, n. 6, p. 997-1012, dez. 2018.
- COELHO, J. M. **Modelos do RenovaBio**. In: RENOVIABIO: Próximos Passos. Rio de Janeiro: FGV Energia, fev. 2018. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/eventos/renovabio-proximos-passos>. Acesso em: 20 maio 2019.
- COMPANHIA DOCAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Codesp**: Custo da área. Disponível em: http://intranet.portodesantos.com.br/docs_codesp/doc_codesp_pdf_site.asp?id=123629. Acesso em: 10 abr. 2019.
- COSTA, J. A. V.; DE MORAIS, M. G. The role of biochemical engineering in the production of biofuels from microalgae, **Bioresource Technology**, v. 102, n. 1, p. 2-9, 2011.
- JESUS, S. S.; FILHO, M. R. Potential of algal biofuel production in a hybrid photobioreactor. **Chemical Engineering Science**, v. 171, n. 2, p. 282-292, 2017.
- DAVIS, R.; ADEN, A.; PIENKOS, P. T. Techno-economic analysis of autotrophic microalgae for fuel production. **Applied Energy**, v. 88, p. 3524-3531, 2011.
- DE-BASHAN, L. *et al.* Removal of ammonium and phosphorus ions from synthetic wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris* coimmobilized in alginate beads with the microalgae growth-promoting bacterium *Azospirillum brasilense*. **Water Research**, v. 36, p. 2941-2948, 2002.
- DE MOOIJ, T. *et al.* Impact of light color on photobioreactor productivity. **Algal Research**, v. 15, p. 32-42, abr. 2016.
- DICKINSON, S. *et al.* A review of biodiesel production from microalgae. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 19, n. 3, p. 637-668, abr. 2017.
- DOAN, T. T. Y.; SIVALOGONATHAN, B., OBBARD, J. P. Screening of marine microalgae for biodiesel feedstock. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2534-2544, jul. 2011.

ENAMALA, M. K. *et al.* Production of biofuels from microalgae - A review on cultivation, harvesting, lipid extraction, and numerous applications of microalgae. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 49-68, 2018.

EUROPEAN STANDARDS. **UNE EN 14214: 2013 V2 + A1: 2018**: Productos petrolíferos líquidos. Ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME) para motores diésel y equipos de calefacción. Requisitos y métodos de ensayo. Espanha, jan. 2018.

FLORICEL, S.; IBANESCU, M. Using R&D portfolio management to deal with dynamic risk. **R&D Management**, v. 38, p. 452-467, 2008.

GALLAGHER, B. The economics of producing biodiesel from algae. **Renewable Energy**, v. 36, p. 158-162, 2011.

GONZALEZ-FERNANDEZ, C.; SIALVE, B.; MOLINUEVO-SALCES, B. Anaerobic digestion of microalgal biomass: Challenges, opportunities and research needs. **Bioresource Technology**, v. 198, p. 896-906, dez. 2015.

GUILLARD, R. L.; RYTHER, J. H. Studies of marine planktonic diatoms: I. *Cyclotella nana* hustedt, and *Detonula confervacea*. **Canadian Journal of Microbiology**, v. 8, n. 2, p. 229-239. 1962.

GUO, X.; YAO, L.; HUANG, Q. Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae. **Bioresource Technology**, v. 190, p. 189-195, 2015.

HALIM, R.; DANQUAH, M.; WEBLEY, P. Extraction of oil from microalgae for biodiesel production: A review. **Biotechnology Advances**, v. 30, n. 3, p. 709-732, 2012.

HAMANO, H. *et al.* Biofilm-based photobioreactor absorbing water and nutrients by capillary action. **Bioresource Technology**, v. 223, p. 307-311, jan. 2017.

HARUN, R. *et al.* Technoeconomic analysis of an integrated microalgae photobioreactor, biodiesel and biogas production facility. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 741-747, 2011.

HEO, J.; LEE, B.; LIM, H. Techno-economic analysis for CO₂ reforming of a medium-grade landfill gas in a membrane reactor for H₂ production. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2585-2593, jul. 2016.

HOM-DIAZ, A. *et al.* Performance of a microalgal photobioreactor treating toilet wastewater: Pharmaceutically active compound removal and biomass harvesting. **Science of The Total Environment**, v. 592, n. 15, p. 1-11, ago. 2017.

HUANG, Q. *et al.* Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 318-329, jun. 2017.

JANKOWSKA, E.; SAHU, A.; OLESKOWICZ-POPIEL, P. Biogas from microalgae: Review on microalgae's cultivation, harvesting and pretreatment for anaerobic digestion. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 75, p. 692-709, 2017.

- JAPAR, A. S.; TAKRIFF, M. S.; YASIN, N. H. M. Harvesting microalgal biomass and lipid extraction for potential biofuel production: a review. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 555-563, fev. 2017.
- JUNG, E. E. *et al.* Stacked optical waveguide photobioreactor for high density algal cultures. **Bioresource Technology**, v. 171, p. 495-499, nov. 2014.
- KANG, S.; HEO, S.; LEE, J. H. Techno-economic Analysis of Microalgae-Based Lipid Production: Considering Influences of Microalgal Species. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 58, p. 944-955, 2019.
- KOLLER, M. Design of Closed Photobioreactors for Algal Cultivation. In: Prokop, A.; Bajpai, R.; Zappi, M. **Algal Biorefineries**. Suíça: Springer, 2015. p. 133-186.
- LEITE, G. B.; ABDELAZIZ, A. E. M.; HALLENBECK, P. C. Algal biofuels: Challenges and opportunities. **Bioresource Technology**, v. 145, p. 134-141, 2013.
- LEE, J-Y. *et al.* Comparison of several methods for effective lipid extraction from microalgae, **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. 575-577, 2010.
- LI, X. *et al.* Effects of different nitrogen and phosphorus concentrations on the growth, nutrient uptake, and lipid accumulation of a freshwater microalgae *Scenedesmus* sp. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 14, p. 5494-5500, jul. 2010.
- LÔBO, I. P.; FERREIRA, S. L. C.; CRUZ, R. S. Biodiesel: parâmetros de qualidade e métodos analíticos. **Química Nova**, v. 32, n. 6, p. 1596-1608, 2009.
- LÓPEZ, M. C. G.-M. *et al.* Comparative analysis of the outdoor culture of *Haematococcus pluvialis* in tubular and bubble column photobioreactors. **Journal of Biotechnology**, v. 123, n. 3, p. 329-342, 2006.
- LOURENÇO, Sergio de Oliveira. **Cultivo de Microalgas Marinhas: Princípios e Aplicações**. São Paulo: RiMa, 2006.
- MA, F.; HANNA, M. Biodiesel production: a review. **Bioresource Technology**, v. 70, n. 1, p. 1-15, 1999.
- MARBELIA, L. *et al.* Membrane photobioreactors for integrated microalgae cultivation and nutrient remediation of membrane bioreactors effluent. **Bioresource Technology**, v. 163, p. 228-235, jul. 2014.
- MARCHETTI, J. M.; MIGUEL, V. U.; ERRAZU, A. F. Possible methods for biodiesel production. **Renewable Sustainable Energy Review**, v. 11, p. 1300-1311, 2007.
- MARQUES, S. S. I. *et al.* Growth of *Chlorella vulgaris* on sugarcane vinasse: The effect of anaerobic digestion pretreatment. **Applied Biochemistry and Biotechnology**, v. 171, p. 1933-1943, 2013.
- MARTINEZ, M. *et al.* Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*. **Bioresource Technology**, v. 73, n. 3, p. 263-272, jul. 2000.

MATOS, C. T. *et al.* Nannochloropsis sp. biomass recovery by Electro-Coagulation for biodiesel and pigment production. **Bioresource Technology**, v. 134, p. 219-226, abr. 2013.

MATSIMBE, S. F. S. *et al.* Prediction of oil content in the mesocarp of fruit from the macaúba palm using spectrometry. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 46, n. 1, p. 21-28, 2015.

MENDES, Christine Camargo. **Biodiesel a partir de microalgas: Análise da variabilidade da produção de lipídeos pela microalga *Tetraselmis* sp. sob diferentes condições de crescimento.** 2016. 22 f. TCC (Graduação em Ciências do Mar) - Universidade Federal de São Paulo, Santos, 2016.

MENEGAZZO, M. L.; FONSECA, G. G. Biomass recovery and lipid extraction processes for microalgae biofuels production: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 107, p. 87-107, 2019.

MICROBIO ENGINEERING. **Sistema aberto de cultivo de microalgas (*open raceway pond*).** 2012. 1 fotografia. Disponível em: <https://microbioengineering.com/rw22-101> Acesso em: 13 mar. 2019.

MILANO, J. *et al.* Microalgae biofuels as an alternative to fossil fuel for power generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 58, p. 180-197, maio 2016.

MIORANDO, Rogério Feroldi. **Modelo econômico-probabilístico de análise de risco em projetos de TI.** 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MIRÓN, A. S. *et al.* Comparative evaluation of compact photobioreactors for large-scale monoculture of microalgae. **Progress in Industrial Microbiology**, v. 35, p. 249-270, 1999.

MOREAU, R. A.; KAMAL-ELDIN, A. **Gourmet and Health-Promoting Speciality Oils.** Illinois: AOCS. 2015.

NAGABALAJI, V. *et al.* Nutrient removal from synthetic and secondary treated sewage and tannery wastewater through phycoremediation. **Environmental Technology**, p. 1-9, 2017.

NASCIMENTO, I. A. *et al.* Screening microalgae strains for biodiesel production: lipid productivity and estimation of fuel quality based on fatty acids profiles as selective criteria. **Bioenergy Research**, v. 6, n. 1, p. 1-13, mar. 2013.

OU, L. *et al.* Understanding the Impacts of Biomass Blending on the Uncertainty of Hydrolyzed Sugar Yield from a Stochastic Perspective. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 6, n. 8, p. 10851-10860, ago. 2018.

OU-YANG, C. *et al.* Value chain analysis of algal bioenergy and carbon capture integrated with a biotechnology innovation. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 349-359, abr. 2018.

OZKAN, A. *et al.* Reduction of water and energy requirement of algae cultivation using an algae biofilm photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 114, p. 542-548, jun. 2012.

PEREIRA, H. *et al.* Scale-up and large-scale production of *Tetraselmis* sp. CTP4 (Chlorophyta) for CO₂ mitigation: from an agar plate to 100-m³ industrial photobioreactors. **Nature Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1-11, 2018.

PÉREZ-LÓPEZ, P. *et al.* Integrating uncertainties to the combined environmental and economic assessment of algal biorefineries: A Monte Carlo approach. **Science of the Total Environment**. v. 626, p. 762-775, jun. 2018.

PINTO, A. C. *et al.* Biodiesel: an overview. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 16, n. 6, p. 1313-1330, 2005.

POSTEN, Clemens; WALTER, Christian. **Microalgal Biotechnology: Potential and Production**. Berlim, Alemanha: De Gruyter, 2012.

RACZ, L *et al.* Extensive comparison of biodiesel production alternatives with life cycle, PESTLE and multi-criteria decision analyses. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 20, n. 9, p. 2013-2024, nov. 2018.

RICHARDSON, J. W.; JOHNSON, M. D. Economic viability of a reverse engineered algae farm (REAF). **Algal Research**, v. 3, n. 1, p. 66-70, 2014.

_____. _____. Financial Feasibility analysis of NAABB developed technologies. **Algal Research**, v. 10, p. 16-24, 2015.

_____. *et al.* Harvesting and extraction technology contributions to algae biofuels economic viability. **Algal Research**, v. 5, n. 1, p. 70-78, 2014b.

_____.; _____.; OUTLAW, J. L. Economic comparison of open pond raceways to photo bio-reactors for profitable production of algae for transportation fuels in the Southwest. **Algal Research**, v. 1, n. 1, p. 93-100, maio 2012.

_____. *et al.* A financial assessment of two alternative cultivation systems and their contributions to algae biofuel economic viability. **Algal Research**, v. 4, n. 1, p. 96-104, 2014a.

_____.; OUTLAW, J. L.; ALLISON, M. The economics of microalgae oil. **AgBioForum - Journal of Agrobiotechnology Management & Economics**, v. 13, n. 2, p. 119-130, 2010. Disponível em: <http://www.agbioforum.org/v13n2/v13n2a04-richardson.htm>. Acesso em: 19 nov. 2018.

RÖTTIG, A. *et al.* Fatty acid alkyl esters: perspectives for production of alternative biofuels. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 85, n. 6, p. 1713-1733, 2010.

SAEID, A., CHOJNACKA, K. Toward production of microalgae in photobioreactors under temperate climate. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 93, p. 377-391, jan. 2015.

SAJJADI, B. *et al.* Microalgae lipid and biomass for biofuel production: A comprehensive review on lipid enhancement strategies and their effects on fatty acid composition. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 97, p. 200-232, 2018.

SAMANEZ, Carlos Patrício. **Engenharia Econômica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

SANTIBAÑEZ-AGUILAR, J. E. *et al.* Stochastic design of biorefinery supply chains considering economic and environmental objectives. **Journal of Cleaner Production**, v. 136, p. 224-245, nov. 2016.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. Transesterification of Vegetable Oils: a Review. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 9, n. 1, p. 199-210, 1998.

SEABRA PEREIRA, C. D. *et al.* Ecological relevance of Sentinel's biomarker responses: A multi-level approach. **Marine Environmental Research**, v. 96, p. 118-126, maio 2014.

SHENG, A. L. K. *et al.* Sequencing batch membrane photobioreactor for real secondary effluent polishing using native microalgae: process performance and full-scale projection. **Journal of Cleaner Production**, v. 168, n. 1 p. 708-715, dez. 2017.

SIALVE, B.; BERNET, N.; BERNARD, O. Anaerobic digestion of microalgae as a necessary step to make microalgal biodiesel sustainable. **Biotechnology Advances**, v. 27, n. 4, p. 409-416, 2009.

SLEGGERS, P. M. *et al.* Scenario analysis of large scale algae production in tubular photobioreactors. **Applied Energy**, v. 105, p. 395-406, maio. 2013.

SOARES, A. T. *et al.* Comparative analysis of the fatty acid composition of microalgae obtained by different oil extraction methods and direct biomass transesterification. **BioEnergy Research**, v. 7, n. 3, p. 1035-1044, set. 2014.

SOMAN, A.; SHASTRI, Y. Optimization of novel photobioreactor design using computational fluid dynamics. **Applied Energy**, v. 140, n. 15, p. 246-255, fev. 2015.

SORATANA, K.; HARPER JR., W. F.; LANDIS, A. E. Microalgal biodiesel and the Renewable Fuel Standard's greenhouse gas requirement. **Energy Policy**, v. 46, p. 498-510, jun. 2012.

SOUZA, S. P.; GOPAL, A. R.; SEABRA, J. E. A. Life cycle assessment of biofuels from an integrated Brazilian algae-sugarcane biorefinery. **Energy**, v. 81, p. 373-381, mar. 2015.

SUN, Y. *et al.* Enhancement of microalgae production by embedding hollow light guides to a flat-plate photobioreactor. **Bioresource Technology**, v. 207, p. 31-38, 2016.

TAMBURIC, B. *et al.* Design of a novel flat-plate photobioreactor system for green algal hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 11, p. 6578-6591, 2011.

- TAUFIQ–YAP, Y. H.; LEE, H. V.; YUNUS, H. R. Calcium-based mixed oxide catalysts for methanolysis of jatropha curcas oil to biodiesel. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 827-834, 2011.
- TSUKAHARA, T.; SAWAYAMA, S. Liquid Fuel Production Using Microalgae, **Journal of the Japan Petroleum Institute**, v. 48, n. 5, p. 251-259, 2005.
- UGWU, C. U.; AOYAGI, H.; UCHIYAMA, H. Photobioreactors for mass cultivation of algae. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 4021-4028, 2008.
- VATTEM, D. A.; MAITIN, V. **Funcional Foods, Nutraceuticals and Natural Products: Concepts and Applications**. Texas: DEStech Publications. 2015.
- VO, H. N. P. *et al.* A critical review on designs and applications of microalgae-based photobioreactors for pollutants treatment. **Science of the Total Environment**, v. 651, p. 1549-1568, 2019.
- WANHUA, Z; RUIYU, L. Study on Engineering Project Investment Risk Measure Based on Monte Carlo Method. In: 2008 INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION MANAGEMENT, INNOVATION MANAGEMENT AND INDUSTRIAL ENGINEERING, 2008, Taipé. **Anais...** Taipé, Taiwan: IEEE, 2008. p. 407-411.
- WARD, A.; LEWIS, D.; GREEN, F. Anaerobic digestion of algae biomass: A review. **Algal Research**, v. 5, p. 204-214, jul. 2014.
- XIA, Y.; TANG, Z.-C. A novel perspective for techno-economic assessments and effects of parameters on techno-economic assessments for biodiesel production under economic and technical uncertainties. **RSC Advances**, v. 7, n. 16, p. 9402-9411, 2017.
- XU, H.; MIAO, X; WU, Q. High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. **Journal of Biotechnology**, v. 126, p. 499-507, 2006.
- XU, X.-Q. *et al.* Attached microalgae cultivation and nutrients removal in a novel capillary-driven photo-biofilm reactor. **Algal Research**, v. 27, p. 198-205, nov. 2017.
- YADALA, S.; CREMASCHI, S. Design and optimization of artificial cultivation units for algae production. **Energy**, v. 78, p. 23-39, 2014.

ANEXO A – DADOS SUPLEMENTARES

Neste Anexo A, estão descritos os dados operacionais do sistema proposto para a produção de biodiesel a partir da biomassa de microalgas; as premissas e entradas do modelo econômico; Capex e; Opex.

A produtividade de biomassa, a produção média anual de lipídio, teor lipídico e a densidade celular após colheita foram estimados a partir dos experimentos realizados por Mendes (2016). Outros parâmetros operacionais foram estimados a partir de Batan, Graff e Bradley (2016), como mostra a Tabela 10 Suplementar.

Tabela 10 Suplementar – Dados operacionais do sistema de cultivo de microalgas

<i>Variável de operação</i>	<i>Valor</i>	<i>Nota</i>
Produtividade de biomassa	0,043 kg·m ⁻³ ·dia ⁻¹	Mendes (2016)
Produção média anual de lipídio	2,811 L·ha ⁻¹ ·ano ⁻¹	
Teor lipídico	9,80%	
Densidade celular após colheita	3 g·L ⁻¹	
Reciclagem de água	98%	Batan, Graff e Bradley (2016)
Secagem	0.5%	
Colheita e Extração	10%	
Perdas na extração	10%	
Triglicerídeos	10%	
Etanol	2%	
Hexano	2%	
Demanda de CO ₂	2 kg·kg ⁻¹ de biomassa	

Fonte: Autor

As premissas econômicas e entradas do modelo econômico estão representadas na Tabela 11 Suplementar e tiveram como referência o amplo estudo conduzido por Davis, Aden e Pienkos (2011).

A análise do Capex foi realizada com base em orçamentos obtidos no Brasil (Tabela 12 Suplementar). Na etapa de cultivo, a estimativa de custo do fotobiorreator de 100 m³, como descrito por Pereira *et al.* (2018), foi feita com preços a partir de fabricantes nacionais, orçado em R\$ 80.000,00. Na literatura, no entanto, duas referências relatam preços superiores, porém trata-se de fotobiorreatores completos com todo aparato de injeção de CO₂ incluso e sistemas de bombas e iluminação. Davis, Aden e Pienkos (2011) estimou um custo de 1.297,00 (€/m³) e Carlson *et al.* (2010) estimou em 1.243,00 (€/m³).

Fazendo-se uma comparação entre estas estimativas de preço do fotobiorreator completo de 100 m³, o preço como sendo de R\$ 103.300,00, no entanto, dados obtidos na literatura como publicados por Davis, Aden e Pienkos (2011) mostram o preço do fotobiorreator

de R\$ 570.680,00 e Carlson *et al.* (2010) R\$ 546.920,00. Isto sugere reduções de preço frente à construção de fotobiorreatores tubulares.

Tabela 11 Suplementar – Premissas e entradas do modelo econômico

<i>Variável econômica/entrada</i>	<i>Valor</i>
Taxa de imposto	35%
Período analisado	20 anos
Período de depreciação da planta	15 anos
Tempo para produção total	0,25 anos
Taxa de desconto para o Valor Presente Líquido (VPL)	10%
Perda de capital em valor de equipamento por ano	5%
Depósito	1,5% do Capital Instalado Total (TIC)
Desenvolvimento de site	9% do capital relacionado ao processo
Trabalho e construção	25% do TIC
Contingência	30% do TIC
Custos redistribuíveis	10% do TIC
Despesas de campo	10% do TIC
Seguros e impostos	1,5% do TIC
Manutenção	2% dos custos de equipamento
Despesas gerais	60% dos custos de mão-de-obra

Fonte: Autor

Para a colheita e secagem foram estimados os preços de um tanque de sedimentação projetado para um volume de 70 m³, que é o volume de retirada do fotobiorreator operado em semicontínuo, centrífuga de pequeno porte para concentrar a biomassa, uma estufa de secagem e recipiente para armazenamento, também de pequeno porte.

Tabela 12 Suplementar – Despesas de capital (Capex)

<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor (R\$)</i>	<i>Depreciação - anos</i>	<i>Valor depreciado (R\$)</i>
Cultivo	Fotobiorreator Tubular (100 m ³)	80.000,00	10%	8.000,00
	Sistema de bombeamento de água	1.700,00	10%	170,00
	Sistema de injeção de CO ₂	15.000,00	10%	1.500,00
	Sistema de circulação cultivo	600,00	10%	60,00
	Sistema de iluminação	5.000,00	10%	500,00
	Ar condicionado	1.000,00	10%	100,00
Colheita/Secagem	Centrífuga	12.500,00	10%	1.250,00
	Tanque de sedimentação	35.000,00	10%	3.500,00
	Estufa	2.500,00	10%	250,00
	Armazenamento	1.700,00	10%	170,00
Pré-tratamento	Matérias para a lise celular	1.500,00	10%	150,00
	Matérias para extração	1.400,00	10%	140,00
Transesterificação	Matérias	450,00	10%	45,00
	Padrão de qualidade	1.000,00		
	Armazenamento	3.500,00	10%	350,00
	SUBTOTAL	R\$ 162.850,00		R\$ 16.185,00
<i>Custos indiretos</i>				
Desenvolvimento de site		2.279,90		
Mão-de-obra		22.137,50		25% do Opex
Trabalho e construção		10.000,00		
Outros custos		16.285,00		
<i>Capital não depreciável</i>				
Custo da área (ano)		4.800,00		Codesp (2019)
	TOTAL Capex	R\$ 234.537,40		

Fonte: Autor

A estimativa dos custos operacionais está representada na Tabela 13 Suplementar. A injeção de CO₂ foi estimada em (99,99% a 1,5 bar) – roto-evaporador 20 L min⁻¹, com Valor médio = 4.870 L dia⁻¹ (1,5 bar) = 13,20 kg dia⁻¹.

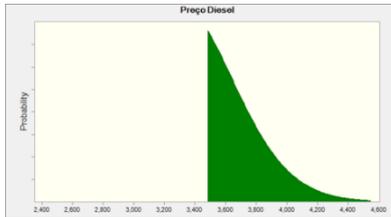
O consumo de reagentes estimados em 0,06 Kg dia⁻¹ de etanol e 0,56 Kg dia⁻¹ de hexano, cujos valores semelhantes foram estimados por Batan, Graff e Bradley (2016). Além disso, foi estimado para a operação dois técnicos para os dois processos (a) Produção de lipídio e (b) Transesterificação.

Tabela 13 Suplementar – Despesas operacionais (Opex)

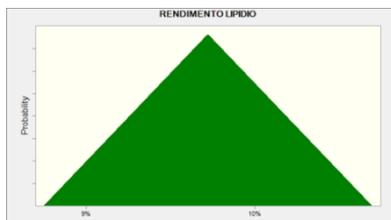
<i>Processo</i>	<i>Descrição</i>	<i>Valor (R\$)</i>
Produção de lipídio	Injeção de CO ₂	20.000,00
	Consumo de solvente	10.000,00
	Manutenção reator (10 anos reposição de tubos)	8.000,00
	Utilidades (refrigeração, água, etc)	15.000,00
	Trabalho e despesas gerais	12.000,00
	Manutenção, impostos e seguro	5.000,00
Transesterificação	Reagentes	1.700,00
	Utilidades (refrigeração, água, etc)	850,00
	Trabalho e despesas gerais	12.000,00
	Manutenção, impostos e seguro	4.000,00
TOTAL Opex		R\$ 88.550,00

Fonte: Autor

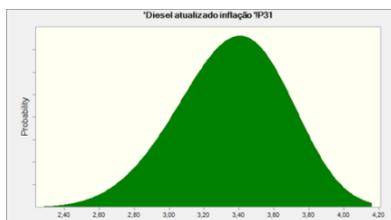
Considerou-se para o teste de validação do modelo econômico a incorporação de três pressupostos com os seus respectivos comportamentos de probabilidade. Outras variáveis de risco estão no modelo, mas não foram consideradas como pressupostos.



Pressuposto: PREÇO DO DIESEL
 Distribuição Lognormal
 O intervalo selecionado é de 3.480 a +Infinito
 Local = 0.000
 Média = 3.358
 Desvio Padrão = 0.336



Pressuposto: RENDIMENTO LIPIDIO
 Distribuição Triangular
 Mínimo = 9%
 Mais provável = 10%
 Máximo = 11%



Pressuposto: INFLAÇÃO
 Distribuição Weibull
 Local = 2.10
 Escala = 1.37
 Forma = 4.54