

**BIODIESEL PRODUCTION FROM MICROALGAE: A TECHNICAL-FINANCIAL ANALYSIS**

**PRODUÇÃO DE BIODIESEL A PARTIR DE MICROALGAS: UMA ANÁLISE TÉCNICA-FINANCEIRA**

**LUANA OLIVEIRA LIMA**

<https://orcid.org/0009-0002-7339-8964> / <http://lattes.cnpq.br/8763131780719931> / [luanaoliveiralima@alunos.utfpr.edu.br](mailto:luanaoliveiralima@alunos.utfpr.edu.br)  
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná*

**ANDRIELE DE PRÁ CARVALHO**

<https://orcid.org/0000-0002-0266-8595> / <http://lattes.cnpq.br/8290738827565231> / [andridpc@gmail.com](mailto:andridpc@gmail.com)  
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná*

**ANDRÉ ZUBER**

<http://lattes.cnpq.br/0000104116232000> / <https://orcid.org/0000-0002-8903-5562> / [andrez@utfpr.edu.br](mailto:andrez@utfpr.edu.br)  
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná*

**JONAS HENRIQUE REKTENVALD**

<https://orcid.org/0009-0009-7999-7205> / <https://lattes.cnpq.br/5145895995673752>  
*Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, Paraná*



Recebido em: 13/07/2023.

Aprovado em: 26/11/2023.

Publicado em: 26/12/2023.

**RESUMO**

Visando elucidar os custos contidos na cadeia produtiva de biodiesel por meio de microalgas, este trabalho buscou reunir diversas variáveis presentes na composição de uma indústria de produção de biodiesel a partir de microalgas, adentrando em uma conjuntura de hipóteses, para a realização de balanços de massa e energia, assim como, para a elaboração de uma análise financeira para a produção de Biodiesel a partir de microalgas. Os balanços de massa foram realizados levando-se em consideração taxas de conversão, rendimento, estequiometria das reações, densidade dos compostos, entre outros. Ao final, após todos os cálculos, obteve-se uma produção anual de 22.872,78 m<sup>3</sup> de biodiesel. Na fase de balanço de energia, levou-se em consideração os equipamentos que continham alteração de temperatura, para definição do gasto energético da indústria, sendo possível então

contabilizar o consumo de vapor necessário, o qual, foi calculado em 2.765,54 kg h<sup>-1</sup>. Após foram estimados os valores monetários necessários ao funcionamento da empresa, contabilizando-se custos fixos e variáveis, com conseguinte avaliação de indicadores financeiros, como o payback descontado, a taxa interna de retorno, o valor presente líquido e o ponto de equilíbrio, os quais, indicam a viabilidade do projeto nas condições indicadas durante o trabalho. O payback descontado retornou, nas condições propostas, o tempo de 4,15 anos para recuperação do investimento e o ponto de equilíbrio evidenciou a necessidade de produção de 5437,46 m<sup>3</sup> de biodiesel para que a empresa passe a ter lucro.

**Palavras-chave:** biodiesel; microalgas; balanço de massa; balanço de energia; payback; ponto de equilíbrio.

#### ABSTRACT

Aiming to elucidate the costs contained in the production chain of biodiesel through microalgae, this work sought to gather several variables present in the composition of a biodiesel production industry from microalgae, entering a conjuncture of hypotheses, for the realization of mass and energy balances, as well as for the elaboration of financial analysis. Mass balances were performed, considering conversion rates, yield, reaction stoichiometry, density of compounds, among others. In the end, after all calculations, an annual production of 22.872,78 m<sup>3</sup> of biodiesel was obtained. In the energy balance phase, the equipment containing temperature changes was taken into account to define the energy expenditure of the industry, making it possible to then account for the necessary steam consumption, which was calculated as 2.765,54 kg h<sup>-1</sup>. Afterward the monetary values necessary for the company's operation were estimated, accounting for fixed and variable costs, with subsequent evaluation of indicators, such as the discounted payback, the internal rate of return, the net present value and the break-even point, which indicate the feasibility of the project under the conditions indicated during the work.

**Keywords:** biodiesel; microalgae; mass balance; energy balance; payback; balance point.

## 1 INTRODUÇÃO

O alto índice de emissão de gases do efeito estufa causados pela combustão de combustíveis fósseis, reflete em alterações na biodiversidade dos ecossistemas e nas perspectivas de futuro dos países. Em 1997, as Nações Unidas viabilizaram a assinatura, por mais de 170 países, do Protocolo de Kyoto com o objetivo de reduzir a emissão dos gases que intensificam o efeito estufa. Ir ao encontro de novas fontes de energia é uma forma de aumentar a qualidade de vida da sociedade e garantir desenvolvimento econômico das nações (MATA et al., 2010).

Portanto, existe a necessidade do desenvolvimento de diferentes fontes de energia renováveis para se obter uma segurança energética global à longo prazo e a atenuação das emissões de gás carbônico na atmosfera. Para tal, o biodiesel tem se mostrado uma alternativa interessante, quando comparado ao diesel fóssil, sendo possível sua obtenção a partir de biomassa (BRENNAN; OWENDE, 2010). Com isso, torna-se possível a obtenção de Biodiesel a partir de microalgas, sendo menos prejudicial e econômico

O biodiesel é obtido por meio de um processo químico denominado transesterificação. Nele, os óleos extraídos de oleaginosas, são transformados em biodiesel. O Brasil introduziu a obrigatoriedade do uso do biodiesel na matriz energética em 2005 (ANP, 2020). Uma matriz energética mesclada com diversas fontes de energia renováveis, pode ser expressa como um modelo ideal de desenvolvimento energético. Buscar sustentabilidade nos modelos de novas fontes de energia é essencial para o desenvolvimento ambiental, social e econômico.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 DEMANDA ENERGÉTICA CRESCENTE

O consumo mundial de energia vem crescendo significativamente nos últimos anos, podendo haver uma escassez de recursos fósseis de energia em breve. Conforme descreve Bueno (2009), “o consumo mundial de energia praticamente dobrou entre os anos de 1975 e 2005, passando de seis bilhões de Mtoe (milhões de toneladas equivalentes de petróleo) para perto de 12 bilhões de Mtoe. Desse total, 87% referem-se às energias não renováveis.” Se levarmos em consideração as preocupações ambientais relacionadas com a emissão de carbono na atmosfera e a instabilidade política dos países fornecedores de petróleo e gás natural, chegamos a um cenário de preocupação com a segurança energética futura (BUENO *et al.*, 2009).

Neste contexto, surge como alternativa aos combustíveis fósseis o uso de biocombustíveis, que devido ao seu menor índice de agressividade ao meio ambiente, principalmente pela menor emissão de hidrocarbonetos, monóxido de carbono e dióxido de carbono, tornam-se uma fonte estratégica e renovável de energia (MELO, 2010).

Além do menor índice de agressividade ao meio ambiente, a biomassa proveniente das microalgas participa do chamado ciclo do carbono neutro, onde durante o seu crescimento, na fotossíntese, a microalga absorve dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera e transforma em biomassa. Durante a queima desta biomassa acontece a emissão de carbono para a atmosfera completando o ciclo, sendo que ele é repetido indefinidamente (DA SILVA, 2009).

Os biocombustíveis são produzidos através da biomassa, em sua grande maioria proveniente de culturas agrícolas. Entretanto, cada cultura possui alguma limitação, seja por competir com o fator produção de alimentos ou por possuir um custo elevado de produção. Outra dificuldade diz respeito à logística, visto que, um dos maiores entraves da produção de biocombustíveis é o custo de transporte da biomassa (HAKALIN, 2014). Silva *et al.* (2019) constataram que “um transporte intermodal (rodoviário, ferroviário, fluvial/marítimo) proporciona economia de custos nos percursos de grande distância”. Para fins de solucionar esses questionamentos,

a produção de biodiesel a partir de microalgas se faz interessante por ser uma energia limpa e, conforme relatado na literatura, com um custo competitivo

## 2.2 Microalgas

As microalgas (Figura 1) são seres unicelulares, microscópicos, capazes de realizar fotossíntese usando gás carbônico e de crescer fotoautotroficamente. Podem ser encontradas tanto em ecossistemas de água doce quanto marinhos. Representam um recurso praticamente inexplorado e são capazes de produzir metade do oxigênio atmosférico e também diversos produtos exclusivos, como carotenoides, antioxidantes, peptídeos, ácidos graxos, toxinas e esteróis. Conseguem adsorver o carbono presente na atmosfera e armazená-lo na forma de lipídios na célula (MONDAL *et al.*, 2017). Logo, tendo em vista a produção de biodiesel, as microalgas podem ser postas como uma possível e promissora alternativa.

Figura 1 — Cultivo de microalgas em escala laboratorial



Fonte: Biodiesel Brasil (2012)

Diferente do que acontece com outras oleaginosas utilizadas para a produção de biodiesel, a reprodução das microalgas é curta e, em um período de poucos dias todo processo de crescimento é realizado. Isso se deve ao fato de realizarem fotossíntese, transformando a energia solar em química (MATA et al., 2010).

Durante o processo de fotossíntese, as microalgas são capazes de realizar a fixação do CO<sub>2</sub>, fazendo com que o gás carbônico seja retirado da atmosfera e transformado em biomassa, óleo e oxigênio (MONDAL et al., 2017).

Se tem estimativa de que existam mais de 50.000 espécies de microalgas, mas apenas um número limitado de cerca de 30.000 foram estudadas e analisadas (MATA et al., 2010).

Segundo Neofotis et al. (2016), “não se tem certeza do número de espécies existentes, pois há uma gama de gêneros sendo descobertos constantemente, mas estimativas indicam uma variação de existência entre 70.000 a 1.000.000 de espécies. Sendo que, atualmente, são conhecidas por volta de 44.000 espécies”.

As microalgas são reconhecidas como um dos microrganismos vivos mais antigos da Terra (SONG et al., 2008). Elas são capazes de desenvolverem-se rapidamente, tendo taxa de crescimento e produtividade lipídica maiores do que matérias-primas agrícolas (ABOMOHRÁ et al., 2016).

Para que as microalgas tenham a velocidade de crescimento elevada, é necessário se atentar a diversos aspectos, visto que elas podem ter uma cinética de crescimento complexa. Fatores importantes são uma fonte de carbono (pode ser usado dióxido de carbono emitido de alguma indústria), macronutrientes (fonte de nitrogênio ou fósforo), fonte de luz e micronutrientes. Cabe ressaltar também a temperatura como sendo um fator importante para a velocidade de crescimento, dependendo do tipo de microalga utilizada na produção da biomassa (ROSA, 2011).

Na Tabela 1, são mostradas algumas espécies de microalgas com seus teores de óleo em sua constituição. Nota-se que a microalga denominada *Schizochytrium sp.* possui uma faixa de teor de óleo, em porcentagem de peso seco, interessante quando comparada as demais espécies, tornando-a uma possível postulante a produção de biodiesel quando analisamos apenas o seu teor de óleo.

Tabela 1 — Teor de óleo de diferentes microalgas

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

Fonte: Chisti (2007)

Nessa continuidade, as microalgas têm caráter promissor visando a produção de biodiesel. Segundo Hakalin (2014), dentre as vantagens existentes, pode-se citar:

- As microalgas não competem com a agricultura visto que podem ser cultivadas em solos degradados sem a necessidade de grandes extensões de terra;
- Podem ser cultivadas durante o ano inteiro e, mesmo crescendo em meio aquoso, consomem menos água em relação a plantas terrestres;
- Tem uma elevada produção de biomassa e um bom nível de acúmulo de lipídeos, e são capazes de produzir mais de 50% do oxigênio presente na atmosfera terrestre;
- São ótimas fixadoras de carbono, podendo chegar a 20 vezes mais carbono fixado em relação as demais plantas oleaginosas;

- São capazes de produzir diversos produtos de alto valor agregado.

É interessante fazer uma análise comparativa do potencial das microalgas frente as demais oleaginosas. Na Tabela 2, são apresentadas diversas informações de comparação entre microalgas e outras matérias-primas de biodiesel. Quando se compara a produtividade de biodiesel das microalgas de alto teor de óleo com uma cultura já estabelecida na produção de biodiesel, como a soja, nota-se uma diferença significativa de produtividade (121104 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 562 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup>, respectivamente) que é impulsionada pelo alto rendimento de óleo e a baixa quantidade de terra utilizada na produção das microalgas (136900 L óleo ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> e 0,1 m<sup>2</sup> ano kg de biodiesel<sup>-1</sup>, respectivamente).

Tabela 2 — Comparação das microalgas com outras matérias primas de biodiesel

Cultura	Óleo presente na semente (% de óleo por peso na biomassa)	Rendimento de óleo (L óleo ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )	Terra utilizada (m <sup>2</sup> ano kg de biodiesel <sup>-1</sup> )	Produtividade de Biodiesel (kg de biodiesel ha <sup>-1</sup> 1ano-1)
Milho	44	172	66	152
Cânhamo	33	363	31	321
Soja	18	636	18	562
Jatropha	28	741	15	656
Camelina	42	915	12	809
Canola	41	974	12	862
Girassol	40	1070	11	946
Castor	48	1307	9	1156
Óleo de Palma	36	5366	2	4747
Microalgas (baixo teor de óleo)	30	58700	0,2	51927
Microalgas (médio teor de óleo)	50	97800	0,1	86515
Microalgas (alto teor de óleo)	70	136900	0,1	121.104

Fonte: Adaptado de Mata *et al.* (2010)

As etapas do processo produtivo de biodiesel por meio de microalgas, em uma forma geral, são mostradas no esquema da Figura 2, começando pela seleção da espécie de microalgas, seguido pela forma de cultivo, colheita, processamento, extração do óleo e unidade de produção de biodiesel.

## 2.3 Cultivo de Microalgas

O sistema de cultivo de microalgas deve ser analisado em diversas frentes sempre levando em consideração o custo do processo e taxa de produção de biomassa (ODLARE *et al.*, 2011). Para Zardo (2011), “a escolha do método mais apropriado para o cultivo das microalgas é de suma importância para a viabilidade do processo, buscando-se um ponto ótimo entre custo de implementação/operação com a produtividade de cada sistema.”

A etapa de cultivo das microalgas é de suma importância para a produção de biodiesel. Usualmente, o cultivo de microalgas pode ser apresentado de quatro maneiras distintas: fotoautotrófico, heterotrófico, mixotrófico e foto-heterotrófico. Apenas o cultivo fotoautotrófico é comumente utilizado. Nele, encontram-se dois métodos de cultivo que serão abordados neste trabalho, pois são utilizados com maior abrangência: o sistema de cultivo fechado, representado pelos fotobiorreatores tubulares (PBRs) e o sistema de cultivo aberto, exemplificado pelas lagoas a céu aberto ou *open raceway pond* (ORPs) (RAWAT *et al.*, 2013).

### 2.3.1 Lagoas Abertas

Os sistemas de cultivo em lagoas abertas são mais simples e baratos, sendo conhecidos e utilizados desde a década de 1950. São também, o principal sistema comercial utilizado para produção de microalgas; no entanto, apresentam baixa produtividade de biomassa (DE AZEREDO, 2012).

Segundo De Azeredo (2012):

Estes sistemas podem variar desde lagoas abertas simples, sem nenhum tipo de aparato mecânico para realizar a mistura da cultura, lagoas circulares,

onde há a presença de um braço mecânico central para realizar a mistura e os sistemas conhecidos como *high rate ponds* ou *raceway paddle wheel mixed open ponds* (DE AZEREDO, 2012).

As lagoas abertas são construídas geralmente de concreto, mas outros materiais podem ser utilizados. Sua profundidade varia; por exemplo, sistemas com pás de agitação são limitados em cerca de 30 cm de profundidade, já sistemas que não são misturados os tanques podem ter até 50 cm de profundidade. Contudo, é importante mencionar que o sistema com agitação previne o assentamento da cultura e a profundidade deve ser adequada a permitir a infiltração necessária dos raios de luz solar (RAWAT *et al.*, 2013).

A Tabela 3, mostra a produtividade em sistemas abertos de algumas espécies de microalgas. Cabe ressaltar que a única forma de cultivo que alcançou alta produtividade de biomassa em larga escala foi o sistema desenvolvido para a microalga *Chlorella sp* (BRENNAN; OWENDE, 2010).

Tabela 3 — Produtividade de biomassa em sistemas abertos

<b>Espécie</b>	<b>Produtividade (g/m<sup>2</sup>.d)</b>
Chlorella sp.	25
Spirulina platensis	14
Haematococcus pluvialis	15,1
Spirulina sp.	69,16
Diversas	19
Spirulina platensis	12,2
Spirulina platensis	19,4
Anabaena sp.	23,5
Chlorella sp.	23,5
Chlorella sp.	11,1
Chlorella sp.	32,2
Chlorella sp.	18,1

Fonte: Adaptado de Brennan e Owende (2010)

Segundo Mondal *et al.* (2017) existem inúmeras limitações nos sistemas de cultura em lagoas abertas, como:

- Dificuldades no uso da luz por parte das microalgas;
- Alta evaporação e baixa produtividade de biomassa;
- Perda ou difusão de CO<sub>2</sub> na atmosfera;
- Quantidade de terra utilizada;
- Pode ocorrer facilmente a contaminação química ou biológica da lagoa.

### 2.3.2 Sistemas Fechados (Fotobiorreatores)

Diferentemente do sistema do cultivo em sistemas abertos, o fotobiorreator pode cultivar uma única espécie de microalga. Um fotobiorreator projetado para o cultivo de microalgas é idealizado para que possa ter o máximo de controle sobre seus parâmetros de atuação, como por exemplo, a fonte de iluminação e o sistema de agitação (MONDAL *et al.*, 2017).

Os fotobiorreatores conseguem realizar o controle de um ambiente estável, imprescindível para o cultivo de microalgas. Também apresentam pouco risco de contaminação, sem perdas de CO<sub>2</sub> e evaporação de água, têm a temperatura controlável e vários tipos de *designs* estão disponíveis no mercado (DE AZEREDO, 2012). Segundo Mondal *et al.* (2017), “os sistemas fechados podem ser classificados como fotobiorreatores tubulares horizontais, fotobiorreatores agitados, fotobiorreatores de coluna de bolha e *airlift*.”

Na Tabela 4, é mostrada a produtividade de diversas espécies de microalgas em sistemas fechados. Destacam-se a produtividades alcançadas pelas microalgas *Phaeodactylum tricornutum* e *Arthrospira platensis* por meio de fotobiorreatores do tipo tubular e da microalga *Tetraselmis sp.* por meio de um fotobiorreator tipo coluna.

Tabela 4 — Produtividade de biomassa em sistemas fechados

Espécies	Tipo de Fotobiorreator	Volume (L)	Produtividade (g/m <sup>2</sup> /d)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Tubular	200	20
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Tubular	200	32
<i>Arthrospira platensis</i>	Tubular	11	47,7
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Tubular	25000	13
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Placas	25000	10,2
<i>Arthrospira</i>	Tubular	146	25,4
<i>Chlorella sp.</i>	Placas	400	22,8
<i>Chlorella sp.</i>	Placas	400	19,4
<i>Tetraselmis sp.</i>	Coluna	1000	38,2
<i>Chlorococcum sp.</i>	Parábola	70	14,9
<i>Chlorococcum sp.</i>	Cúpula	130	11

Fonte: Adaptado de Brennan e Owende (2010)

### 2.3.3 Sistemas Híbridos

Os sistemas híbridos são uma junção dos sistemas de cultivo fechado e aberto. Em uma primeira etapa é feito o uso de fotobiorreatores para que seja possível um controle maior das condições, já numa segunda etapa é feito o uso de lagoas abertas para aumentar o estresse de nutrientes, aumentando a produção do óleo que é desejado (BRENNAN; OWENDE, 2010).

A Tabela 5 faz uma comparação dos sistemas de cultivo abertos e fechados, apresentando aspectos importantes para definição do método de cultivo. Observa-se que a produção de biomassa em fotobiorreatores é quase trinta vezes maior, quando comparada ao sistema de lagoa aberta, além de necessitar de uma área disponível menor.

Tabela 5 — Comparação de parâmetros entre lagoas abertas e fotobiorreatores

Parâmetros	Lagoa Aberta	Fotobiorreatores
Regime de Operação	Batelada ou semicontínuo	Batelada ou semicontínuo
Produtividade Volumétrica (kg.m <sup>-3</sup> . d <sup>-1</sup> )	0,117	1,54
Produção de óleo (m <sup>3</sup> . ha <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	56,8	78,2
Área Necessária (m <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	7828	5681
Produção de Biomassa (kg.m <sup>-3</sup> )	0,14	4
Consumo Anual de CO <sub>2</sub> (kg) <sup>c</sup>	183,333	183,333
Eficiência de utilização leve	Pobre	Altamente Eficiente
Aumento de escala	Difícil	Fácil
Controle do processo	Difícil	Fácil
Controle de espécies	Difícil	Possível
Mistura	Muito Pobre	Uniforme
Custos de operação	Baixo	Alto
Perdas de água	Alto	Baixo

<sup>a</sup> para microalgas com 40% de óleo por peso seco.

<sup>b</sup> para atender a 50% de todas as necessidades de transporte de combustível nos Estados Unidos.

<sup>c</sup> correspondente à produção anual de 100 toneladas de biomassa

Fonte: Adaptado de Abomohra *et al.* (2016)

## 2.4 Coleta da biomassa

A coleta de biomassa de microalgas também chamada de colheita é um processo desafiador para a produção de biocombustível, devido ao tamanho microscópico das células de microalgas (RAWAT *et al.*, 2013).

O processo de colheita pode representar de 20 a 30% do custo total da produção de biodiesel a partir de microalgas. Para a escolha do modo de colheita deve-se levar em consideração que não há um método universal e que uma avaliação das características das microalgas é necessária (MATA *et al.*, 2010).

Segundo Mondal *et al.* (2017), “os métodos de colheita comuns incluem sedimentação, centrifugação e filtração, às vezes com uma etapa de floculação adicional.” Para Rashid (2014), “as tecnologias existentes incluem centrifugação, coagulação, floculação, filtração por dissolução de ar, filtração por membrana, eletroflotação, eletroforese e ultrassom.”

## 2.5 Processamento da biomassa

O processamento da biomassa deve ser feito rapidamente para evitar a sua deterioração. Geralmente, os processos de desidratação ou secagem são usados dependendo de qual o produto de interesse (MONDAL *et al.*, 2017).

Após a secagem, é realizada extração dos componentes de interesse para a produção do biodiesel.

## 2.6 Extração do óleo

Para produção de biodiesel, deve-se realizar a extração de lipídeos e ácidos graxos, e, para isso, é necessário o rompimento da parede celular. A quebra pode ser realizada por métodos químicos, mecânicos ou biológicos, sendo que qualquer método utilizado depende do tipo de microalga (RASHID *et al.*, 2014).

Os métodos químicos são aplicados na biomassa desidratada, fazendo uso de solventes orgânicos como hexano, que é comumente utilizado, etanol ou uma mistura de hexano-etanol. A vantagem de se utilizar esses solventes é que eles são baratos, eficientes e geralmente usados para extração de óleo (RAWAT, *et al.*, 2013).

A ruptura física das células de microalgas caracteriza o método mecânico de extração de lipídeos e ácidos graxos. Neste processo, o óleo é retirado das células de microalgas secas (RASHID *et al.*, 2014)

## 3 PROCEDIMENTO METODOLOGICO

### 3.1 Tipo de pesquisa

Este estudo será embasado em pesquisas documentais e bibliográficas de literaturas já existentes, a fim de analisar os dados pertinentes já publicados. Por se tratar de um trabalho técnico e muito conexo às perspectivas futuras no ramo dos biocombustíveis, visa-se tratar os dados encontrados mesclando-os com os já elaborados, com o intuito de entender o processo de produção de biodiesel a partir de microalgas.

A pesquisa pode ser classificada como quantitativa e qualitativa. Segundo Matias-Pereira (2016), “o método quantitativo, conforme o próprio nome sugere, tem como principal característica a utilização da quantificação, seja nas modalidades de coleta de informações ou no tratamento das mesmas”. Já o método qualitativo, conforme Mezzaroba e Monteiro

(2019), “não vai medir seus dados, mas, antes, procurar identificar suas naturezas. [...] A compreensão das informações é feita de uma forma mais global e inter-relacionada com fatores variados, privilegiando contextos.”

O presente trabalho apresenta uma abordagem conjunta da pesquisa quantitativa e qualitativa uma vez que busca identificar os procedimentos para a produção de biodiesel a partir de microalgas, considerando os aspectos técnicos e econômicos, de uma unidade produtora de biodiesel.

### **3.2 Coleta de dados**

Na etapa da coleta de dados é buscado o maior número de informações pertinentes ao processo de produção de biodiesel a partir de microalgas. Conforme Matias-Pereira (2016), “a coleta de dados estará relacionada com o problema, a hipótese ou os pressupostos da pesquisa e tem por fim obter elementos para que os objetivos propostos na pesquisa possam ser alcançados.”

No presente trabalho, o referencial teórico foi escrito com o intuito de embasar o estudo e dar suporte para o desenvolvimento da análise técnica-financeira. Serão realizadas a coleta de informações inerentes ao cultivo de microalgas, colheita, processamento da biomassa, extração do óleo, processamento do óleo, produção do biodiesel e técnicas de gestão financeira.

Para o prosseguimento, foi necessário utilizar múltiplas fontes de coleta de dados, referentes a produção de biodiesel a partir de microalgas, para que seja possível a obtenção dos resultados de viabilidade técnica e econômica do processo. Dentre elas, cita-se a leitura em artigos científicos da área, busca por informações relacionadas a preço e funcionamento de equipamentos, pesquisa de questões técnicas (exemplos: planta do processo, taxas de conversão, quantidade de energia consumida, utilização dos rejeitos da produção de biodiesel, etc.) e investigação de questões econômicas (exemplo: custos fixos e variáveis). O Quadro 1, reúne as principais fontes de pesquisa utilizadas.

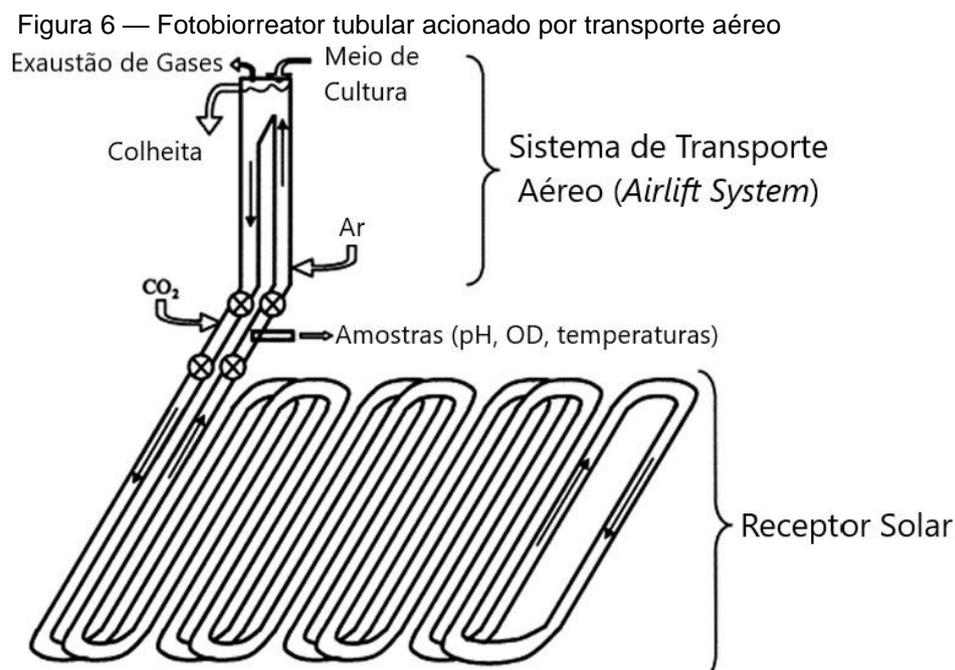
## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Nesta seção serão apresentados e comentados os resultados obtidos na realização deste trabalho, ou seja, a discussão dos procedimentos para a produção do biodiesel a partir de microalgas, a esquematização do processo, os cálculos de balanço de massa e energia necessários, a estimativa dos custos de produção do biodiesel, a análise *payback* e o cálculo do ponto de equilíbrio.

#### 4.1 Meio de Cultivo e Colheita

Iniciou-se definindo que a espécie de microalga a ser cultivada para extração do óleo seria a *Phaeodactylum Tricornutum*, visto que, ela se apresenta com características promissoras para a produção de biodiesel e também por existirem informações importantes para o prosseguimento deste trabalho na literatura. Na sequência, entre os sistemas de produção de microalgas abertos e fechados discutidos no referencial teórico, propõem-se a utilização dos sistemas fechados por meio dos fotobiorreatores, visto que, eles apresentam maior produtividade e controle das condições operacionais. Molina *et al.* (2001) projetou um fotobiorreator tubular acionado por transporte aéreo, dado na Figura 6, utilizando a microalga *Phaeodactylum Tricornutum* para fins de comprovação do meio de cultura, e obteve uma produtividade em biomassa de  $1,90 \text{ g L}^{-1} \text{ dia}^{-1}$  ou  $32 \text{ g m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Logo, foi escolhido este modelo de fotobiorreator para produção da biomassa, sendo os parâmetros de projeto deste reator listados na Tabela 6 (MOLINA *et al.*, 2001).

O material de construção do fotobiorreator será o Plexiglas, o meio de cultura fresco será continuamente adicionado durante um período que corresponde ao tempo de luz do dia (aproximadamente 10 h), sendo operado por meio de um quimiostato. Será realizado, conforme necessário, a adição automática de dióxido de carbono para manter o pH estável e de nutrientes como nitrogênio (MOLINA *et al.*, 2001). Para se produzir uma tonelada de biomassa são gastos entre 50 a 80 kg de nitrogênio (BOROWITZKA; MOHEIMANI, 2013). Portanto, será necessário acrescentar no meio de cultivo aproximadamente  $500 \text{ kg h}^{-1}$  de nitrogênio. A adição de dióxido de carbono para manutenção do pH do meio, será feito considerando que o  $\text{CO}_2$  esteja disponível sem nenhum custo adicional.



Fonte: Adaptado de Molina *et al.* (2001)

Tabela 6 — Variáveis de projeto e operação do fotobiorreator

Variável	Valor
Diâmetro do tubo receptor solar	0,06 m <sup>2</sup>
Comprimento do loop	80 m
Volume de cultura	0,2 m <sup>3</sup>
Área ocupada pelo coletor solar	0,12 m <sup>2</sup>
Altura da coluna de transporte aéreo	4,0 m
Espaçamento vertical entre as camadas do tubo	0,03 m
Espaçamento horizontal entre degraus de tubos paralelos adjacentes	0,09 m
Velocidade de cultura através do tubo solar	0,5 m s <sup>-1</sup>

Fonte: Molina *et al.* (2001)

A colheita e extração do óleo serão realizadas por meio de uma rota úmida, utilizando-se uma etapa de floculação.

O tanque de biomassa formada nos fotobiorreatores será direcionado para um tanque de floculação, por meio da corrente 2, com o objetivo de aumentar o tamanho das partículas.

Será utilizado, como floculante o sulfato de alumínio ( $Al_2(SO_4)_3$ ) com uma dosagem de 140 ( $mg L^{-1}$ ) visando se obter uma taxa de recuperação de 91% (UDOM *et al.*, 2013).

Como produto do tanque de floculação, tem-se a corrente 3 que vai dar entrada no moinho de esferas, iniciando a etapa de extração do óleo.

## 4.2 Extração do Óleo

A extração do óleo por meio da via úmida (*wet route*) será realizada diretamente na pasta da biomassa com o hexano, onde os lipídeos estarão em uma fase orgânica e os demais compostos na fase aquosa (NASCIMENTO JUNIOR, 2020). Nascimento Junior (2021) simulou a extração do óleo da microalga *Nannochloropsis sp.* por via úmida utilizando hexano como solvente e obtendo bons resultados. Os ácidos graxos e suas respectivas frações mássicas, presentes no óleo da microalga *Nannochloropsis sp.* são parecidos com o óleo da microalga *Phaeodactylum Tricornutum*. Logo, se utilizará do rendimento da etapa de extração (90%) mencionada no trabalho de Nascimento Junior (2021) para posteriores cálculos do balanço de massa (NASCIMENTO JUNIOR, 2020).

Com o objetivo de preparar a biomassa e melhorar a eficiência da etapa de extração do óleo, a corrente 3 entra no moinho de esferas para que seja realizada a quebra da estrutura celular, originando a corrente 4.

A corrente 4, por sua vez, é direcionada para o decantador onde também é adicionada a corrente 10, a qual carregará o solvente (hexano).

Do processo de extração no decantador, surgirá a corrente 6 (fase leve), contendo óleo e hexano (mistura) e também a corrente 5 (fase pesada) a qual será considerada resíduo. A corrente 6, é direcionada para os evaporadores, onde com o aquecimento do meio, o hexano por ser mais volátil que o óleo, passa para o estado gasoso sendo recuperado por meio de condensadores. O hexano é então direcionado de volta ao tanque de armazenamento de hexano pela corrente 9, fechando seu ciclo no processo.

A parte menos volátil (que não evaporou) dos evaporadores dará origem a corrente 7, contendo óleo e água. Esta corrente, será levada para um tanque flash, que terá por objetivo reduzir a quantidade de água até 3%. A corrente 12, contendo majoritariamente óleo, levará o mesmo até os tanques de armazenamento.

### 4.3 Etapa de pré-tratamento do óleo

O óleo de microalgas pode apresentar leve acidez e também um certo grau de umidade. Segundo Mancio (2011), que realizou uma simulação do processo de produção de biodiesel, “o óleo extraído da microalga *Phaeodactylum tricornutum* apresenta 3% de água e cerca de 10% de acidez necessitando de um prétratamento que será realizado por meio de uma reação de esterificação via catálise ácida.”

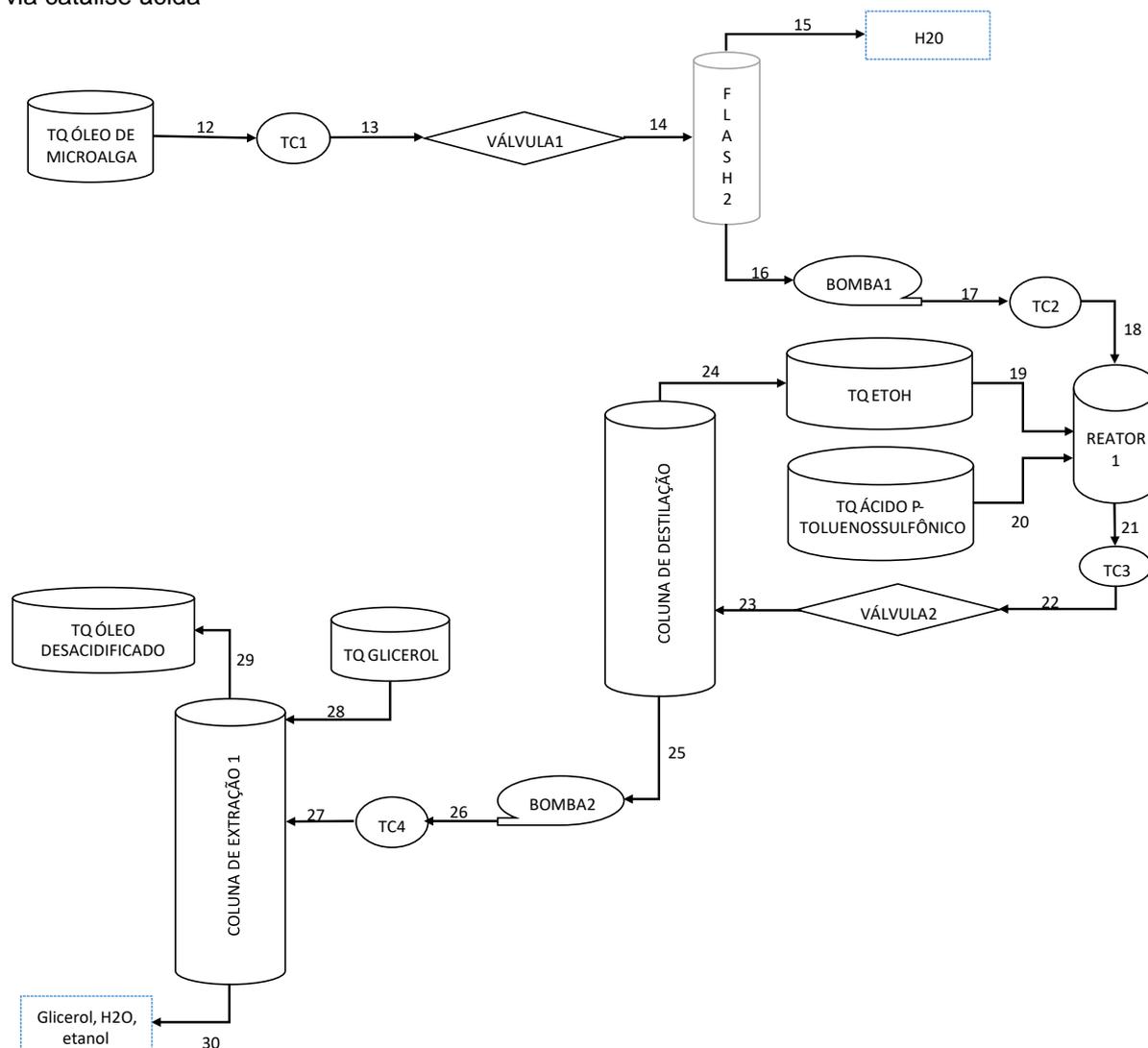
O fluxograma do processo de desacidificação do óleo de microalga é mostrado na Figura 7. Inicialmente, a corrente 12 tem suas condições de operação adequadas formando a corrente 14 de entrada no tanque flash, o qual, remove a água presente no óleo. A corrente 15 tem suas condições de operação ajustadas formando a corrente 18 que vai dar entrada no reator (MANCIO, 2011). O reator receberá ainda a corrente 19 contendo etanol e a corrente 20 contendo ácido p-toluenossulfônico.

O ácido p-toluenossulfônico foi escolhido como catalisador em virtude de ser menos agressivo as tubulações e apresentar desempenho semelhante a outros ácidos (informação verbal)<sup>1</sup>. A mistura das correntes contendo os compostos necessários para a reação de esterificação no reator terá como objetivo a remoção dos ácidos graxos livres, reduzindo o teor de acidez do óleo (MANCIO, 2011).

---

<sup>1</sup> Informação concedida pelo Químico Industrial Maiquel Bonato, em novembro de 2021.

Figura 7 — Fluxograma do processo de pré-tratamento do óleo de microalga por meio da reação esterificação via catálise ácida



Fonte: Adaptado de Mancio (2011)

A corrente 23 entra na coluna de destilação visando recuperar o etanol. O etanol por meio da corrente 24 (produto de topo) é levado de volta ao tanque de origem, finalizando seu ciclo no processo. O produto de fundo contendo o óleo, corrente 25, necessitará de um processo adicional para eliminação de impurezas (água, ácido p-toluenossulfônico e etanol não recuperado). Portanto, será realizada uma etapa de lavagem com glicerol utilizando-se de uma coluna de extração líquido-líquido (MANCIO, 2011).

A corrente 27, com suas condições operacionais adequadas dá entrada na coluna de extração. A corrente 28, carrega o glicerol para dentro da coluna de extração líquido-líquido. O glicerol é

utilizado devido à sua capacidade de dissolver os componentes indesejados no óleo. O produto de topo, corrente 29, contendo o óleo desacidificado e livre de impurezas, vai para um tanque de armazenamento para dar prosseguimento ao processo. O produto de fundo, corrente 30, contendo o glicerol e os demais componentes, pode ser estocado buscando-se uma utilização posterior (MANCIO, 2011).

#### 4.4 Etapa de produção do biodiesel

Após a etapa de pré-tratamento inicia-se a produção de biodiesel. O biodiesel será obtido por meio da reação de transesterificação via catálise básica, onde os triglicerídeos são transformados em ésteres metílicos (biodiesel). A Figura 8 apresenta o fluxograma desta parte do processo, contendo os equipamentos necessários e as correntes numeradas.

O processo tem início a partir do tanque de óleo desacidificado obtido na etapa de pré-tratamento. A corrente 32, juntamente com a corrente 33 proveniente do tanque de NaOH (catalisador) e com a corrente 34 advinda do tanque de etanol, entram no reator formando o complexo necessário para que ocorra a reação de transesterificação (MANCIO, 2011).

Na saída do reator têm-se a corrente 35, onde já se tem o produto de interesse. Entretanto, além de biodiesel essa corrente apresenta o glicerol, subproduto da reação, além de outros compostos decorrentes da reação de transesterificação. Logo, será necessário etapas subsequentes de refinamento, afim de que se tenha um biodiesel atendendo as condições da agência nacional do petróleo (ANP) (MANCIO, 2011).

A primeira parte das etapas subsequentes diz respeito a recuperação do etanol. A corrente 37 entra no tanque flash 3, com o objetivo de recuperar o etanol. Admite-se que a corrente 38 contém apenas etanol sendo direcionada diretamente para o tanque de armazenamento de etanol, fechando o ciclo do composto. A saída do flash, corrente 39, é direcionada para a coluna de extração líquido-líquido (MANCIO, 2011).

#### 4.5 Etapa de produção do biodiesel

Após a etapa de pré-tratamento inicia-se a produção de biodiesel. O biodiesel será obtido por meio da reação de transesterificação via catálise básica, onde os triglicerídeos são transformados em ésteres metílicos (biodiesel). A Figura 8 apresenta o fluxograma desta parte do processo, contendo os equipamentos necessários e as correntes numeradas.

O processo tem início a partir do tanque de óleo desacidificado obtido na etapa de pré-tratamento. A corrente 32, juntamente com a corrente 33 proveniente do tanque de NaOH (catalisador) e com a corrente 34 advinda do tanque de etanol, entram no reator formando o complexo necessário para que ocorra a reação de transesterificação (MANCIO, 2011).

Na saída do reator têm-se a corrente 35, onde já se tem o produto de interesse. Entretanto, além de biodiesel essa corrente apresenta o glicerol, subproduto da reação, além de outros compostos decorrentes da reação de transesterificação. Logo, será necessário etapas subsequentes de refinamento, afim de que se tenha um biodiesel atendendo as condições da agência nacional do petróleo (ANP) (MANCIO, 2011).

A primeira parte das etapas subsequentes diz respeito a recuperação do etanol. A corrente 37 entra no tanque flash 3, com o objetivo de recuperar o etanol. Admite-se que a corrente 38 contém apenas etanol sendo direcionada diretamente para o tanque de armazenamento de etanol, fechando o ciclo do composto. A saída do flash, corrente 39, é direcionada para a coluna de extração líquido-líquido (MANCIO, 2011).

#### 4.6 Taxa Interna de Retorno e Valor Presente Líquido

A TIR foi calculada a partir da Equação 31, utilizando-se dos valores de fluxo de caixa líquido presentes na Tabela 31. A taxa interna de retorno encontrada foi de 35,37% significando que o investimento é atrativo, visto que, a TIR é maior que TMA fixada por meio da taxa Selic em 10,65%.

É importante atentar-se a análise da TIR pois caso os custos iniciais aumentem consideravelmente o projeto pode passar a ser inviável, por exemplo, ao aumentarmos os custos iniciais em 3 vezes obtemos uma TIR de 11,79% levando o projeto a uma margem menor de segurança, porém ainda sendo viável.

O VPL foi calculado por meio da Equação 30, utilizando-se dos dados de fluxo de caixa líquido presentes na Tabela 31. O valor presente líquido obtido foi de R\$ 204.374.684,56 evidenciando a viabilidade do projeto nos moldes apresentados, visto que, VPL positivo significa que as previsões de despesas são menores que as receitas.

Assim como acontece com a TIR, o VPL também deve ser analisado com tranquilidade pois utiliza-se de previsões do investimento inicial e da TMA. Uma estimativa de investimento inicial pode ter seu valor monetário e tempo de projeto alterado impactando no VPL. A taxa de atratividade mínima fixada em 10,65% por meio da taxa Selic também pode variar, e caso tenha um aumento significativo em algum determinado momento impactará no retorno desejado.

### 5 CONCLUSÃO

O biodiesel produzido a partir de microalgas tem futuro promissor quando posto como uma fonte de combustível renovável. Os resultados técnicos e financeiros obtidos durante a realização do trabalho, levando-se em consideração todas as suposições e condições estabelecidas, retornam um parecer favorável a produção de biodiesel a partir de microalga.

Os balanços de massa e energia realizados demonstraram, porém, uma lacuna existente no processo de produção de biodiesel a partir de microalgas. A dificuldade em se reunir informações sólidas, de determinada espécie de microalga, no âmbito do cultivo em larga escala, nos rendimentos e métodos de extração do óleo e nas propriedades físico-químicas do óleo foram

dificultadores da execução do trabalho. Contudo, boas estimativas de produção e gasto energético foram obtidas com os balanços realizados.

Após todos os cálculos do balanço de massa realizados, obteve-se uma produção anual de 22.872,78 m<sup>3</sup> de biodiesel. Quanto ao balanço de energia, estimouse que o somatório do gasto energético dos equipamentos onde há alteração de temperatura é de 5.640.067,65 kJ h<sup>-1</sup>. Sendo que, o consumo de vapor necessário, foi estimado em 2.765,54 kg h<sup>-1</sup>.

O indicador financeiro *Payback* descontado retornou o valor de 4,15 anos para a recuperação de todo o capital investido. O valor presente líquido se mostrou positivo e a taxa interna de retorno classifica o empreendimento como atrativo. O ponto de equilíbrio retorna à necessidade da comercialização de 5437,46 m<sup>3</sup> de biodiesel para equilibrar as despesas e receitas.

Como possíveis contribuições futuras a este trabalho, se pode incluir uma integração energética nas utilidades quentes e frias, o aperfeiçoamento do balanço de massa nos reatores que realizam a reação de esterificação e transesterificação, a avaliação do incremento de bombas e válvulas no fluxograma da extração do óleo, a construção de uma planta piloto em escala laboratorial se utilizando do fluxograma de produção, a determinação do calor específico do óleo da microalga *Phaeodactylum Tricornutum* e a simulação da extração do óleo da microalga *Phaeodactylum Tricornutum* por via úmida afim de se obter o rendimento desta etapa.

## REFERÊNCIAS

ABOMOHR, A. E. F. et al. Microalgal biomass production as a sustainable feedstock for biodiesel: Current status and perspectives. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 64, p. 596-606, 2016.

ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis). **Biodiesel**. 13 jul. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 08 mai. 2021.

ARANHA, A. C. R. et al. Marasul - Indústria de Óleos Vegetais. **Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná**. Apucarana, PR, 2018.

ASSAF NETO, A. **Curso de Administração Financeira**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2019.

BARNWAL, B. K.; SHARMA, M. P. Prospects of biodiesel production from vegetable oils in India. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 9, n. 4, p. 363-378, 1 ago. 2005.

BIODIESELBR. **Biodiesel ficou 1% mais caro na 6ª semana de 2022**. 11 fev. 2022. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/noticias/usinas/info/biodiesel>

as/info/biodiesel-ficou-1-mais-carro-na-6-semana-de-2022-110222ficou-1-mais-carro-na-6-semana-de-2022-110222. Acesso em: 20 fev. 2022

BNDS (Banco Nacional do Desenvolvimento). **BNDS Automático**: Taxa de Juros.

Disponível em:

[https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndesautomatico!/ut/p/z1/rZJNU8lwEIZ\\_C4ceQwLpl94KzsAoKAyD0F6YtE3bOG1S0gDir3c pHxFGWfMKdndvOz2eAlr3Ek2V7kzAgIwQnnMHI33nw0HAD2bzKa9PpkvRn84U\\_pk9DGz\\_jCEeJNLUp cBjLIDcbIRsjzC5pFSxSqIpbJBOSyUSwikujGouUQhasQbVWuWYV7LKdTEJVgOxnVEVQCTqpF8nIsVh0nfdHqcUUU4cZPHQzc2zZBrMxqntuM5xMera8ARpM kPKyBwP7pWEoKF98niYeaRuTMeeN6EksWdg1d7wQ94KZWu4AkXfxgTPB9i\\_BLEzCWvp4Opzk oM1MglTOF19-eDsrEy3YbBTaiJQ1\\_NR9F\\_z0jAM5LFZ8\\_TCBj6gOZ5hnXXHd3GsKFMXVzaxGLHA 6HbivQzdW-G2ul1KBZK21OKI0w\\_CLQuSRTpVAnpBTcm0t2hWqgza8uuK4qnx6RfBs8otHKN\\_6 RlnnQ6bwDTWc8lw!!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/](https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndesautomatico!/ut/p/z1/rZJNU8lwEIZ_C4ceQwLpl94KzsAoKAyD0F6YtE3bOG1S0gDir3c pHxFGWfMKdndvOz2eAlr3Ek2V7kzAgIwQnnMHI33nw0HAD2bzKa9PpkvRn84U_pk9DGz_jCEeJNLUp cBjLIDcbIRsjzC5pFSxSqIpbJBOSyUSwikujGouUQhasQbVWuWYV7LKdTEJVgOxnVEVQCTqpF8nIsVh0nfdHqcUUU4cZPHQzc2zZBrMxqntuM5xMera8ARpM kPKyBwP7pWEoKF98niYeaRuTMeeN6EksWdg1d7wQ94KZWu4AkXfxgTPB9i_BLEzCWvp4Opzk oM1MglTOF19-eDsrEy3YbBTaiJQ1_NR9F_z0jAM5LFZ8_TCBj6gOZ5hnXXHd3GsKFMXVzaxGLHA 6HbivQzdW-G2ul1KBZK21OKI0w_CLQuSRTpVAnpBTcm0t2hWqgza8uuK4qnx6RfBs8otHKN_6 RlnnQ6bwDTWc8lw!!/dz/d5/L2dBISEvZ0FBIS9nQSEh/). Acesso em: 28 mar. 2022a.

BNDS (Banco Nacional do Desenvolvimento). **Porte de Empresa**. Disponível em:

<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/porte-deempresa>. Acesso em: 17 abr. 2022b.

BORGES, A.; VELASQUEZ, M.; CHAVES, C. Gestão de custos em unidades gráficas: uma análise da margem de contribuição e ponto de equilíbrio. **XVII Congresso Brasileiro de Custos**, Belo Horizonte, MG, 2010.

BORGES, W. DA S. **Produção de bio-óleo empregando microalgas em diferentes meios de cultivo**. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2014.

BOROWITZKA, M. A.; MOHEIMANI, N. R. Sustainable biofuels from algae. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v.18, n. 1, p. 13-25, 2013.

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** Pergamon, v.14, p. 557-577, 2010.

BUENO, O. D. C. et al. Produção de biodiesel no Brasil: aspectos socioeconômicos e ambientais. **Revista Ceres**, v. 56, n. 4, p. 507–512, 2009.

CARARETO, E. S. et al. Gestão Estratégica de Custos: custos na tomada de decisão. **Revista de Economia da UEG**, Anápolis, v. 2, n. 2, 2006.

CARDOSO, D. R. D. O. **Aumento de Eficiência Energética de uma Instalação de Geração de Vapor por meio do Reaproveitamento de Energia em Linhas de Retorno de Condensado**. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

CHISTI, Y. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 3, p. 294–306, 2007.

COSTA, R. A. B. **Estudo das Eficiências de Operação e Consumo de Energia em Plantas de Produção de Biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FONSECA, Y. D.; BRUNI, A. L. Técnicas de Avaliação de Investimentos: Uma Breve Revisão da Literatura. **Artigo Publicado em Periódico**. v. 1, p.40-54. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/25449>. Acesso em: 17 fev. 2022.

DA SILVA, M. T. C. **Análise do balanço entre sequestro e emissão de CO2 resultante do circuito de produção e consumo de biomassa florestal numa central de co-geração**. Dissertação (Mestrado em Bioenergia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2009.

DE AZEREDO, V. **Produção de Biodiesel a partir do cultivo de microalgas: estimativa de custos e perspectivas para o Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Programa de Pós-Graduação em Planejamento Energético da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

DE SOUZA, M. K. A. **Uma contribuição a análise das decisões de investimento privado sob a ótica do ponto de equilíbrio do investimento - PEI - considerando o valor do dinheiro no tempo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

DZIDA, M.; PRUSAKIEWICZ, P. The effect of temperature and pressure on the physicochemical properties of petroleum diesel oil and biodiesel fuel. **Fuel**, v. 87, n. 10–11, p. 1941–1948, 2008.

FAZACONTA. **Simulador de Empréstimos e Financiamentos**. Disponível em: <https://fazaconta.com/simulador-financiamento.htm>. Acesso em: 28 mar. 2022.

HAKALIN, N. L. S. **Otimização das condições de cultivo da Microalga *Scenedesmus sp.* para a produção de biodiesel**. Tese (Doutorado em Biologia Molecular) – Curso de Pós-Graduação em Biologia Molecular do Instituto de Ciências Biológicas da Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

KORETSKY, M. D. **Termodinâmica para Engenharia Química**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MANCIO, A. D. A. **Simulação de Processo de Produção e Purificação de Biodiesel a partir de Óleo de Microalgas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.

MARTINS, E. **Contabilidade De Custos**. 9ª ed. São Paulo: Atlas, 2003.

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

MATIAS-PEREIRA, J. **Manual de Metodologia da Pesquisa Científica**. 4ª Edição ed., São Paulo: Atlas, 2016

MELO, M. A. M. F. **Avaliação das Propriedades de Óleos Vegetais visando a Produção de Biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Química) – Programa de Pós-Graduação em Química do Centro de Ciências Exatas e da Natureza da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

METAL CRUZADO ENGINEERING. **Tanque API 650**. Disponível em: <https://www.metalcruzado.com.br/product-page/Tanqueapi650-1000-agua>. Acesso em: 26 mar. 2022.

MEZZAROBA, O.; MONTEIRO, C. S. **Manual da Metodologia da Pesquisa no Direito**. 8ª ed., São Paulo: Saraiva, 2019.

MOLINA, E. et al. Tubular photobioreactor design for algal cultures. **Journal of Biotechnology**, v. 92, n. 2, p. 113–131, 28 dez. 2001.

MONDAL, M. et al. Production of biodiesel from microalgae through biological carbon capture: a review. **3 Biotech**, v. 7, n. 2, p. 1–21, 2017.

NASCIMENTO JUNIOR, F. A. DO. **Avaliação computacional de solventes para extração de lipídios de microalgas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021.

NEOFOTIS, P. et al. Characterization and classification of highly productive microalgae strains discovered for biofuel and bioproduct generation. **Algal Research**, v. 15, p. 164–178, 1 abr. 2016.

NETO, A. A. Os Métodos Quantitativos De Análise De Investimentos. **Caderno de Estudos - FIPECAFI**, n. 6, p. 1–16, 1992.

NG SOLAR. **Preço da energia elétrica CPFL 2022**. Disponível em: <https://www.ngsolar.com.br/single-post/preco-kwh-cpfl>. Acesso em: 29 mar. 2022.

ODLARE, M. et al. Cultivation of algae with indigenous species - Potentials for regional biofuel production. **Applied Energy**, v. 88, n. 10, p. 3280–3285, 2011.

OLIVEIRA, D. V. C. **Contabilidade de custos: um estudo de caso sobre o ponto de equilíbrio de uma empresa no ramo faccionista têxtil**. Monografia (Bacharel em Ciências Contábeis) – Departamento de Ciências Exatas e Aplicadas do Centro de Ensino Superior do Seridó da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Caicó, 2016.

POTRICH, E.; AMARAL, L. S. Dimensionamento e Predição de Custos de Tanques Flash no Software de Modelagem EMSO. In: **WORKSHOP DE INOVAÇÃO, PESQUISA, ENSINO E EXTENSÃO**, p. 20-24, São Carlos, SP, 2019.

RASHID, N. et al. Current status, issues and developments in microalgae derived biodiesel production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier Ltd, v. 40, p. 760-778, 2014.