

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

CARLA ISHIHARA CASAGRANDE

GUILHERME DOS SANTOS

LORELAY DA SILVA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO  
INDUSTRIAL DE BIOMASSA ALGAL PARA  
APLICAÇÃO NA AQUICULTURA**

TOLEDO

2021

CARLA ISHIHARA CASAGRANDE  
GUILHERME DOS SANTOS  
LORELAY DA SILVA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO  
INDUSTRIAL DE BIOMASSA ALGAL PARA  
APLICAÇÃO NA AQUICULTURA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
como parte das exigências para a obtenção do  
título de bacharel em Engenharia de  
Bioprocessos e Biotecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Bisinella  
Scheufele  
Co-Orientadora: Dra. Mariana Monteiro Fortes

TOLEDO

2021

FOLHA DE APROVAÇÃO

CARLA ISHIHARA CASAGRANDE

GUILHERME DOS SANTOS

LORELAY DA SILVA OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA PRODUÇÃO  
INDUSTRIAL DE BIOMASSA ALGAL PARA  
APLICAÇÃO NA AQUICULTURA**

Data da Aprovação, 13 de agosto de 2021.

---

Prof. Dr. Fabiano Bisinella Scheufele  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Dra. Mariana Monteiro Fortes

---

Prof. Dr. Priscila Vaz Arruda  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Prof. Dr. Jones Erni Schmitz  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

TOLEDO

2021

## RESUMO

As microalgas são seres microscópicos e fotossintéticos, utilizados como fonte de nutrientes a milhares de anos devido a seu vasto valor nutricional. Suas variadas formas e características as tornam excelentes candidatas para as mais diversas aplicações, sendo uma delas a suplementação animal, majoritariamente para o ramo de aquicultura. Diversos estudos constataam a melhor qualidade nutritiva das microalgas para esses animais quando comparado as rações produzidas atualmente. Dentre as espécies existentes, a *Chlorella vulgaris* tem se destacado pelo seu potencial na aquicultura, principalmente na piscicultura, devido a seu rápido e fácil crescimento, valor nutricional e resistência a contaminações. Com essa base, objetivou-se projetar uma indústria para produção de biomassa concentrada da microalga *Chlorella vulgaris* com o intuito de aplicá-la no desenvolvimento e crescimento de peixes. O processo de projeto da indústria envolveu: estudo do mercado potencial da *Chlorella vulgaris* a fim de determinar a melhor localização para a construção das instalações industriais; detalhamento dos processos e operações necessárias para produção da biomassa; determinação da demanda de matéria-prima, insumos e dimensionamento dos equipamentos a partir do balanço de massa e energia; elaborar o *layout* da unidade fabril; e por fim realizar a análise de viabilidade econômica para verificar o potencial da indústria. Ao fim da análise e projeção da indústria chegou-se à conclusão que a mesma é viável durante um período de aproximadamente vinte anos com um *payback* de cerca de dois anos.

**Palavras-chave:** Microalga; Aquicultura; Projeto; Indústria.

## ABSTRACT

Microalgae are microscopic and photosynthetic organisms, used as a source of nutrients for thousands of years due to their vast nutritional value. Microalgae have characteristics that make them excellent candidates for the most diverse applications, one being animal supplementation, mostly for the aquaculture industry. Several studies have shown the better nutritional quality of microalgae when compared to other sources of feed. Among the existing species, *Chlorella vulgaris* has stood out for its potential in aquaculture, especially in pisciculture, due to its fast and easy growth, nutritional value and resistance to contamination. Considering the information above, the objective was to design an industry for the production of concentrated biomass of *Chlorella vulgaris* in order to apply it to the development and growth of fish. The industry design process involved: studying the potential market of *Chlorella vulgaris* in order to determine the best location for the construction of the industrial facilities; detailing of the process and operations necessary for the production of biomass; determination of the demand for raw material, inputs and equipment sizing from the mass and energy balance; prepare the layout of the manufacturing unit; and finally, carry out the economic feasibility analysis to verify the industry's potential. At the end of the analysis and projection of the industry, it was concluded that it is viable for a period of twenty years with a payback of about two years.

**Keywords:** Microalgae; Aquaculture; Project; Industry.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - IMAGEM ILUSTRATIVA DAS CÉLULAS DE <i>CHLORELLA VULGARIS</i> .....	23
FIGURA 2 - PARTICIPAÇÃO DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO AQUÍCOLA MUNDIAL POR SEGMENTO (%) – 2015 .....	30
FIGURA 3 - DIAGRAMA DE BLOCOS DE PROCESSO PRODUTIVO DE CONCENTRADO DE <i>CHLORELLA VULGARIS</i> .....	35
FIGURA 4 - MAPA DO ESTADO DO PARANÁ CONTENDO AS LOCALIZAÇÕES DE EMPRESAS CONSUMIDORAS E POSSÍVEIS LOCAIS DE IMPLEMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA.....	40
FIGURA 5 - PREÇO (R\$/M <sup>3</sup> ) DE ÁGUA E TRATAMENTO DE ÁGUA/ESGOTO PARA CURITIBA E DEMAIS LOCALIDADES DO PARANÁ .....	42
FIGURA 6 - FLUXOGRAMA DE PROCESSO DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA MICROALGAL DE <i>CHLORELLA VULGARIS</i> A PARTIR DE MEIO SUPLEMENTADO COM NPK.....	49
FIGURA 7 - ESQUEMA DO BALANÇO DE MASSA NO TQ-101 .....	57
FIGURA 8 - BALANÇO DE MASSA PARA O TANQUE DE CULTIVO TQ-102 .....	59
FIGURA 9 - BALANÇO DE MASSA PARA O TANQUE DE CULTIVO TQ-103 .....	60
FIGURA 10 - BALANÇO DE MASSA PARA OS TANQUES DE CULTIVO TQ-104,105 E 106 (PRIMEIRO CULTIVO).....	61
FIGURA 11 - BALANÇO DE MASSA PARA OS TANQUES DE CULTIVO TQ-104,105 E 106 (SEGUNDO CULTIVO).....	62
FIGURA 12 - BALANÇO DE MASSA PARA OS TANQUES DE CULTIVO TQ-104,105 E 106 (TERCEIRO CULTIVO).....	63
FIGURA 13 - BALANÇO DE MASSA PARA OS TANQUES DE CULTIVO TQ-104,105 E 106 (QUARTO CULTIVO).....	64
FIGURA 14 - REPRESENTAÇÃO DO BALANÇO DE MASSA REALIZADO NA CENTRÍFUGA CT-101 ..	66
FIGURA 15 - PERSPECTIVA LATERAL E SUPERIOR DO TANQUE TQ-101 .....	75
FIGURA 16 - PERSPECTIVA LATERAL E SUPERIOR DO TANQUE TQ-102 .....	76
FIGURA 17 - PERSPECTIVA LATERAL E SUPERIOR DO TANQUE TQ-103 .....	77
FIGURA 18 - PERSPECTIVA LATERAL E SUPERIOR DOS TANQUES TQ-104, 105 E 106 .....	78
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO DO FILTRO ROTATIVO A VÁCUO.....	84
FIGURA 20 - DIAGRAMA DE TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DA INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA DE <i>CHLORELLA VULGARIS</i> .....	86
FIGURA 21 - PLANTA BAIXA PROPOSTA PARA EMPRESA NUTRIALGA .....	98

FIGURA 22 - MAPA DE RISCO DA EMPRESA NUTRIALGAS .....	99
FIGURA 23 – IMAGEM DE SATÉLITE DO TERRENO DE INSTALAÇÃO DA INDÚSTRIA COM PERÍMETRO E ÁREA REPRESENTADOS .....	105
FIGURA 24 - PERFIL DE FLUXO DE CAIXA DO PROJETO AO LONGO DO SEU HORIZONTE DE OPERAÇÃO .....	111

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO DE ALGUNS ALIMENTOS TRADICIONAIS COMPARADOS COM DIFERENTES ESPÉCIES DE MICROALGAS (% DE BIOMASSA SECA). .....	16
TABELA 2 - TABELA DEMONSTRATIVA DO NÚMERO DE ARTIGOS PUBLICADOS COM RELAÇÃO A MICROALGAS DE 1960 A 2018. ....	29
TABELA 3 - FERTILIZANTE NPK (20:20:20 + METAIS).....	33
TABELA 4 - DADOS CLIMÁTICOS DOS ÚLTIMOS 30 ANOS PARA TOLEDO E CURITIBA NO ESTADO DO PARANÁ .....	41
TABELA 5 - COMPARAÇÃO DA TEMPERATURA MÉDIA NO ESTADO DO PARANÁ DE DIVERSOS PERÍODOS NO ANO DE 2019.....	41
TABELA 6 - PREÇO COMPARATIVO DO METRO QUADRADO ENTRE TOLEDO E CURITIBA NO ESTADO DO PARANÁ.....	43
TABELA 7 - PONDERAÇÃO QUALITATIVA PARA A LOCALIDADE TOLEDO PR.....	44
TABELA 8 - PONDERAÇÃO QUALITATIVA PARA A LOCALIDADE CURITIBA PR .....	44
TABELA 9 - NOMENCLATURA DAS CORRENTES PRINCIPAIS E DE UTILIDADES PRESENTES NO PROCESSO.....	51
TABELA 10 - ABREVIATURAS UTILIZADAS NO FLUXOGRAMA DE PROCESSO .....	52
TABELA 11 - VOLUME DOS TANQUES UTILIZADOS NO FLUXOGRAMA DE PROCESSO.....	52
TABELA 12 - BALANÇO DE MASSA PARA O TANQUE DE CULTIVO TQ-101.....	58
TABELA 13 - BALANÇO DE MASSA PARA O TANQUE DE CULTIVO TQ-102.....	59
TABELA 14 - BALANÇO DE MASSA PARA O TANQUE DE CULTIVO TQ-103.....	60
TABELA 15 - BALANÇO DE MASSA PARA O PRIMEIRO CULTIVO NOS TANQUES TQ-104,105 E 106 .....	62
TABELA 16 - BALANÇO DE MASSA PARA O SECUNDO CULTIVO NOS TANQUES TQ-104,105 E 106 .....	63
TABELA 17 - BALANÇO DE MASSA PARA O TERCEIRO CULTIVO NOS TANQUES TQ-104,105 E 106 .....	63
TABELA 18 - BALANÇO DE MASSA PARA O QUARTO CULTIVO NOS TANQUES TQ-104,105 E 10665	
TABELA 19 - BALANÇO DE MASSA PARA A CENTRIFUGAÇÃO DO PRIMEIRO CULTIVO DOS TANQUES TQ-104, 105 E 106 .....	66
TABELA 20 - BALANÇO DE MASSA PARA A CENTRIFUGAÇÃO DO SEGUNDO CULTIVO DOS TANQUES TQ-104, 105 E 106 .....	66



TABELA 21 - BALANÇO DE MASSA PARA A CENTRIFUGAÇÃO DO TERCEIRO CULTIVO DOS TANQUES TQ-104, 105 E 106 .....	66
TABELA 22 - BALANÇO DE MASSA PARA A CENTRIFUGAÇÃO DO QUARTO CULTIVO DOS TANQUES TQ-104, 105 E 106 .....	67
TABELA 23 - PROPRIEDADES FÍSICAS E CONDIÇÕES OPERACIONAIS DAS CORRENTES DO PROCESSO .....	68
TABELA 24 - EQUAÇÕES ADICIONAIS PARA O CÁLCULO DE POTÊNCIA DE BOMBA .....	71
TABELA 25 - VALORES DO DIMENSIONAMENTO DAS BOMBAS .....	73
TABELA 26 - DIMENSÕES DO TANQUE TQ-101 .....	74
TABELA 27 - DIMENSÕES DO TANQUE TQ-102 .....	75
TABELA 28 - DIMENSÕES DO TANQUE TQ-103 .....	77
TABELA 29 - DIMENSÕES DOS TANQUES TQ-104, 105 E 106 .....	78
TABELA 30 - DIMENSÕES DOS TANQUES DE ÁGUA TT-101 E TT-102 .....	79
TABELA 31 - DIMENSÕES DO SISTEMA DE AGITAÇÃO DOS TANQUES TT-101 E TT-102 .....	79
TABELA 32 - DIMENSÕES DO TANQUE TM-101 .....	80
TABELA 33 - DIMENSÕES DO SISTEMA DE AGITAÇÃO DO TANQUE TM-101 .....	80
TABELA 34 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA O DIMENSIONAMENTO DA CENTRÍFUGA CT-101 .....	82
TABELA 35 - DIMENSÕES DA CENTRÍFUGA CT-101 .....	82
TABELA 36 - DIMENSÕES DO FILTRO TAMBOR ROTATIVO A VÁCUO .....	83
TABELA 37 - SIMBOLOGIA UTILIZADA NO DIAGRAMA DE TUBULAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DO PROCESSO .....	85
TABELA 38 - VALORES DO CEPCI UTILIZADOS NA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO .....	101
TABELA 39 - FATOR DE INSTALAÇÃO UTILIZADO NA VIABILIDADE ECONÔMICA DO PROJETO .....	102
TABELA 40 - EQUIPAMENTOS, QUANTIDADE E CUSTO TOTAL CONFORME O MATCHES .....	103
TABELA 41 - EQUIPAMENTOS, QUANTIDADE E CUSTO TOTAL SIMULADO PARA O BRASIL .....	104
TABELA 42 - CUSTO DE CAPITAL TOTAL (CAPEX) .....	106
TABELA 43 - CUSTO DA MÃO-DE-OBRA MENSAL .....	107
TABELA 44 - CUSTOS FIXOS DE OPERAÇÃO MENSAL .....	107
TABELA 45 - CUSTOS VARIÁVEIS DE OPERAÇÃO .....	108
TABELA 46 – CUSTO DE OPERAÇÃO TOTAL (OPEX) .....	109
TABELA 47 – FONTES NUTRICIONAIS PARA LARVAS DE PEIXE E RESPECTIVOS CONSUMO DIÁRIO E GASTO MENSAL DO PRODUTOR .....	109
TABELA 48 - INDICADORES ECONÔMICOS DO PROJETO .....	111

## LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TANQUE (TQ-101) .....	75
QUADRO 2 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TANQUE (TQ-102) .....	76
QUADRO 3 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TANQUE (TQ-103) .....	77
QUADRO 4 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TANQUE (TQ-104; TQ-105; TQ-106) .....	78
QUADRO 5 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TANQUE DE TRATAMENTO (TT-101; TT-102) .....	79
QUADRO 6 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO TANQUE DE MISTURA (TM-101).....	80
QUADRO 7 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA CENTRÍFUGA (CT-101).....	82
QUADRO 8 - ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO FILTRO ROTATIVO (F-102) .....	83

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
1.1 OBJETIVOS .....	13
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i> .....	13
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	13
1.2 JUSTIFICATIVA .....	13
<b>2. BIOPRODUTO: MICROALGAS .....</b>	<b>15</b>
2.1 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DAS MICROALGAS .....	15
2.2 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DAS MICROALGAS .....	15
2.3 APLICAÇÕES DAS MICROALGAS .....	17
2.4 MÉTODOS DE CULTIVO DE MICROALGAS .....	19
2.5 <i>CHLORELLA VULGARIS</i> .....	23
<b>3. ENGENHARIA DO PRODUTO .....</b>	<b>25</b>
3.1 ANÁLISE DE MERCADO .....	25
3.1.1 <i>Mercado Internacional</i> .....	26
3.1.2 <i>Mercado Nacional</i> .....	27
3.1.3 <i>Perspectivas futuras</i> .....	28
3.2 MERCADO DA AQUICULTURA .....	29
3.3 MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS .....	32
3.4 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA .....	34
3.4.1 <i>Diagrama de blocos do processo produtivo de concentrado de Chlorella vulgaris</i> .....	34
3.4.2 <i>Recebimento de insumos, matéria-prima e análises laboratoriais</i> .....	35
3.4.3 <i>Cloração e decloração da água e análises laboratoriais</i> .....	36
3.4.4 <i>Crescimento de biomassa e análises laboratoriais</i> .....	36
3.4.5 <i>Centrifugação, filtração e análises laboratoriais do concentrado</i> .....	37
3.4.6 <i>Envase e comercialização</i> .....	37
<b>4. ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO .....</b>	<b>38</b>
4.1 FATORES DETERMINANTES .....	38
4.1.1 <i>Clima</i> .....	38
4.1.2 <i>Mercado consumidor</i> .....	39
4.1.3 <i>Custos imobiliários e fixos</i> .....	39
4.2 MÉTODO DE PONDERAÇÃO QUALITATIVA .....	39
<b>5. ESTIMATIVA DE DEMANDA DE PRODUTO E VOLUME DE PRODUÇÃO .....</b>	<b>45</b>

<b>6. ATIVIDADES PRINCIPAIS E DE APOIO.....</b>	<b>47</b>
<b>7. ENGENHARIA DE PROCESSO.....</b>	<b>49</b>
7.1 FLUXOGRAMA DO PROCESSO.....	49
7.1.1 Nomenclaturas e Abreviaturas dos Equipamentos e Etapas do Fluxograma de Processo.....	51
7.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO FLUXOGRAMA DE PROCESSO .....	52
7.2.1 Tanques de Cultivos.....	52
7.2.2 Tanque de Mistura (TM-101) .....	53
7.2.4 Centrifugação (CT-101) .....	54
7.2.6 Filtro rotativo a vácuo (F-102).....	54
7.2.7 Filtro de ar (F-101) e compressor (C-101) .....	54
7.2.8 Tanque de tratamento (TT-101 e TT-102) .....	54
7.3 BALANÇOS DE MASSA.....	55
7.3.1 Tanque de Cultivo TQ-101 .....	57
7.3.2 Tanque de Cultivo TQ-102 .....	58
7.3.3 Tanque de Cultivo TQ-103 .....	59
7.3.5 Centrifuga CT-101.....	65
7.3.6 Resumo das Correntes do Balanço de Massa.....	68
<b>7.4 BALANÇOS DE ENERGIA MECÂNICA .....</b>	<b>69</b>
7.5 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS .....	73
7.5.1 Tanque TQ-101 .....	74
7.5.2 Tanque TQ-102.....	75
7.5.3 Tanque TQ-103.....	76
7.5.4 Tanque TQ-104, TQ-105 e TQ-106 .....	77
7.5.5 Tanques de água TT-101 e TT-102.....	78
7.5.6 Tanque de mistura TM-101.....	79
7.5.7 Centrifuga CT-101.....	80
7.5.8 Filtro rotativo F-102.....	82
<b>8. ENGENHARIA DE PROJETO .....</b>	<b>85</b>
8.1 CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO .....	85
8.1.1 Diagrama de Tubulação e Instrumentação .....	85
8.2.1 Tanques de Cultivos.....	93
8.2.2 Tanque de Mistura (TM-101) .....	93
8.2.4 Centrifugação (CT-101) .....	94
8.2.6 Filtro rotativo a vácuo (F-102).....	94
8.2.7 Filtro (F-101) e compressor (C-101).....	94
8.2.8 Tanque de tratamento (TT-101 e TT-102) .....	94

8.2 SISTEMA HIDRÁULICO .....	94
8.2.1 VÁLVULAS.....	95
8.2.2 TUBULAÇÕES.....	95
8.3 LAYOUT GERAL .....	97
<b>9. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>100</b>
9.1 CUSTOS DE CONSTRUÇÃO .....	100
9.2 CUSTOS DO PROJETO.....	100
9.2.1 Custo do Terreno.....	104
9.2.2 Custo do Poço Artesiano .....	105
9.2.3 Custo de Capital Total.....	105
9.3 CUSTOS DE OPERAÇÃO .....	106
9.3.1 Custos Fixos.....	106
9.3.2 Custos Variáveis.....	108
9.3.3 Comparação de preço do concentrado microalgal com zooplanctons .....	109
9.4 FLUXO DE CAIXA .....	109
9.4.1 Payback.....	109
9.4.2 Taxa Interna de Retorno (TIR).....	110
9.4.3 Valor Presente Líquido (VPL).....	110
9.4.4 Taxa Mínima de Atratividade (TMA) .....	110
9.4.5 Relação Custo-Benefício (RCB).....	110
9.4.6 Fluxo de caixa e indicadores econométricos.....	111
<b>10. CONCLUSÕES.....</b>	<b>113</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>115</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>126</b>
ANEXO A – TABELA DE PROPRIEDADES DA ÁGUA SATURADA .....	126
ANEXO B – TABELA DE VALORES DE RUGOSIDADE ABSOLUTA DE TUBULAÇÕES DE DIFERENTES MATERIAIS .....	127
ANEXO C – TABELA DE PERDA CARGA LOCALIZADA PARA DIFERENTES ACESSÓRIOS.....	128
ANEXO D - TABELA REFERÊNCIA PARA DETERMINAÇÃO DA DIMENSÃO DE FILTROS .....	129
ANEXO E – DADOS CLIMÁTICOS NA REGIÃO DO PARANÁ NO ANO DE 2019.....	130

## 1. INTRODUÇÃO

As microalgas são organismos utilizados como fonte de nutrientes a milhares de anos, sendo incorporadas na alimentação, devido ao seu alto teor proteico. Esses seres, de maneira geral, são fotossintéticos, microscópicos, aquáticos e com colorações variadas, sendo a principal delas fornecida pela presença de clorofila. Sua biodiversidade garante às microalgas uma vasta gama de compostos de alto valor nutricional e diversas aplicações comerciais, como por exemplo na nutrição animal.

A aplicação mais comum desses microrganismos na alimentação animal é no ramo da aquicultura, que está baseada na criação de organismos aquáticos como peixes, moluscos, crustáceos e plantas aquáticas. Diversos estudos mostram que as microalgas fornecem uma melhor qualidade nutritiva a esses organismos aquáticos quando comparadas com as rações processadas comercializadas atualmente. Além disso, a alimentação à base de microalga possibilita fornecimento de uma nutrição natural, isso devido à comercialização dessas em forma de concentrado microalgal, que conserva melhor os nutrientes presentes em suas células.

Na aquicultura, são utilizados atualmente carne e óleo de peixe processados para alimentação e desenvolvimento dos organismos aquáticos. Considerando que a previsão é que o setor aquícola apresente crescimento nos próximos anos, espera-se que a demanda de alimentos para a aquicultura seja maior do que a produção (SIQUEIRA, 2018; SHAH *et al.*, 2018). Sendo assim, é necessário obter novas formas de nutrição para a aquicultura que venham a substituir a atual. Dentre as alternativas existentes, as microalgas vêm se mostrando boa opção dado seu fácil cultivo e excelentes capacidades nutritivas.

A microalga *Chlorella vulgaris* tem apresentado grande potencial no ramo da aquicultura, principalmente no setor de piscicultura, essa espécie possui cultivo fácil devido à maior resistência à contaminações e alto valor nutricional. Sabendo disso, o presente trabalho visa projetar a indústria de biomassa algal Nutrialga, instalada no município de Toledo, que tem como intuito cultivar a microalga *Chlorella vulgaris*, em sistemas abertos, e então fornecê-la como um concentrado para aplicação direta na suplementação alimentar em cultivos de larvas de peixe.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar o projeto de uma indústria para produção de biomassa concentrada da microalga *Chlorella vulgaris* para utilização como alimento para o crescimento e desenvolvimento de larviculturas de peixes.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo do potencial de mercado da microalga *Chlorella vulgaris* em território nacional e identificar a região com maior potencial produtivo;
- Desenvolver um fluxograma de produção e detalhar os processos e operações necessárias para a produção da microalga;
- Determinar, a partir de balanços de massa e energia, a demanda de matéria-prima, insumos, utilidades e energia para o processo produtivo;
- Dimensionar a capacidade produtiva e os equipamentos necessários ao processo industrial;
- Sugerir um *layout* para a planta industrial de produção de microalgas;
- Realizar a análise econômica a fim de verificar a viabilidade do processo.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Nos últimos 20 anos a piscicultura foi o ramo de proteínas com maior crescimento quando comparado com o de aves, suínos e bovinos. O cenário deve se manter positivo nas próximas décadas em diferentes regiões, o que somado ao crescimento do ano de 2020 alavanca projetos de aumento da capacidade de produção (MEDEIROS, 2021).

A produção de peixes no Brasil está sendo liderada pelo estado do Paraná, onde cresce em ritmo maior que o país como um todo, seguido por São Paulo e Rondônia, respectivamente. De acordo com Medeiros (2021), presidente da Associação Brasileira da Piscicultura, em 20 anos o Brasil será o maior produtor mundial de peixes de cultivo (MEDEIROS, 2021).

Apesar da pandemia do coronavírus no ano de 2020, a piscicultura brasileira teve desempenho positivo tanto no consumo nacional quanto na exportação. Segundo a Associação

Brasileira de Piscicultura (Peixe BR), o resultado só não foi melhor devido aos custos para composição da ração, em especial da matéria-prima (MEDEIROS, 2021).

É com esse cenário de crescimento nacional e no estado do Paraná que surge a necessidade de novas tecnologias que possam impulsionar o setor piscicultor, auxiliando no aumento da eficiência, redução de custos e agilidade dos processos (MEDEIROS, 2021). Assim, das alternativas existentes, as microalgas vêm ganhando espaço pelo seu cultivo simples e excelente capacidade nutritiva.



## 2. BIOPRODUTO: MICROALGAS

### 2.1 HISTÓRICO DA UTILIZAÇÃO DAS MICROALGAS

O uso de microalgas já é datado há milhares de anos. Populações indígenas vêm há anos utilizando diversas espécies de microalgas para alimentação, dentre elas *Nostoc*, *Spirulina* e *Aphanizomenon* (JENSEN, 2001). O seu cultivo, por outro lado, não é antigo, visto que só começou de fato há algumas décadas (BOROWITZKA, 1999).

No início dos anos 1950, dado o aumento substancial na população humana juntamente com previsões de que haveria insuficiência na disponibilidade de proteína, houve uma busca por fontes alternativas até então não conhecidas por proteínas. Nesse cenário, as microalgas surgem como uma opção de alimento proteico (BECKER, 2004; CORNET, 1998). Já durante a crise energética dos anos 1970, as microalgas começaram a provocar interesse para geração de energia renovável (CORNET, 1998).

As primeiras plantas comerciais de produção em larga escala começaram a surgir nos anos 1960 no Japão com cultivo de *Chlorella* pela empresa Nihon Chlorella. Posteriormente em 1970 no Lago Texcoco, na Cidade do México, a empresa Sosa Texcoco S.A. estabeleceu um local de cultivo e colheita de *Arthrospira (Spirulina)* (BOROWITZKA, 1999; FEUGA, 1996). A terceira maior área de comercialização desses seres ocorreu na Austrália com o crescimento do cultivo da *Dunaliella salina* para a produção de  $\beta$ -caroteno. Na sequência surgiram plantas comerciais nos EUA, Israel e Índia, locais que receberam novas plantas para o cultivo de *Hematococcus pluvialis* para produção de astaxantina (MILLEDGE, 2010).

Assim, é de conhecimento que a utilização de microalgas não é uma tendência recente, pois há séculos esses seres vêm sendo utilizados na alimentação humana. E sua rica biodiversidade garante às microalgas uma vasta gama de aplicações tecnológicas, que cada vez mais estão sendo pesquisadas com intuito de trazer soluções efetivas e sustentáveis às questões industriais de hoje (TREDICI *et al.*, 2009).

### 2.2 CARACTERIZAÇÃO E PROPRIEDADES DAS MICROALGAS

Microalgas, no geral, podem ser descritas como seres unicelulares, com coloração variável, que podem formar colônias, realizar fotossíntese e que vivem principalmente em ambientes aquáticos. São tanto procariontes quanto eucariontes, possuindo diferenças

estruturais e morfológicas dependendo da espécie e de seus estágios de vida (ANDRADE; FILHO, 2014).

Devido ao seu conteúdo nutricional, esses seres são comumente comparados à alimentos e aditivos alimentares utilizados na dieta humana e animal, considerada como alternativa para aumentar a qualidade alimentar (SPOLAORE, 2006). A Tabela 1 mostra a comparação entre algumas espécies de microalgas com alguns alimentos tradicionalmente consumidos. Essa comparação mostra que a microalga possui rica composição proteica, lipídica e em carboidratos.

Tabela 1 - Composição de alguns alimentos tradicionais comparados com diferentes espécies de microalgas (% de biomassa seca).

<b>Produto</b>	<b>Proteína</b>	<b>Carboidrato</b>	<b>Lipídeo</b>
Fermento de padeiro	39	38	1
Carne	43	1	34
Leite	26	38	28
Arroz	8	77	2
Soja	37	30	20
<i>Anabaena cylindrica</i>	43-56	25-30	4-7
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	48	17	21
<i>Chlorella vulgaris</i>	51-58	12-17	14-22
<i>Dunaliella salina</i>	57	32	6
<i>Porphyridium cruentum</i>	28-39	40-57	9-14
<i>Scenedesmus obliquus</i>	50-56	10-17	12-14
<i>Spirulina máxima</i>	60-71	13-16	6-7
<i>Synechococcus sp.</i>	63	15	11

Fonte: Adaptado de SPOLAORE (2006).

Outro componente com importância em destaque são os aminoácidos essenciais. Uma vez que não são produzidos pelos seres humanos, devem ser ingeridos através de uma boa nutrição para o bom funcionamento do organismo (GUIL-GUERRERO, 2004). Ainda, essas células são ricas em enzimas, fibras, vitaminas A, C, B1, B2 e B6, iodo, potássio, ferro, magnésio e cálcio (CHU, 2012).

Dessa forma, considerando as características das células como a alta produtividade, captura de carbono altamente eficiente, elevado teor de lipídios e amido, capacidade de cultivo em águas salobras ou até mesmo em residuais e não ser necessário a competição com outras áreas cultiváveis, o cultivo das microalgas acumula em si imenso potencial.

## 2.3 APLICAÇÕES DAS MICROALGAS

As microalgas são seres que possuem grande importância biológica, econômica e ecológica, já que essas são responsáveis por boa parte de oxigênio liberado na atmosfera, por manter o ecossistema marinho e de água doce e ser amplamente utilizada nas indústrias, tanto na parte farmacêutica como na área de nutrição humana e animal, agrícola, de biocombustíveis e ainda em processos de tratamento de efluentes. O cultivo desses organismos vem sendo empregado na produção de biomassa para biocombustíveis, além da utilidade na extração de lipídios, proteínas e carboidratos (RASTOGI, *et al.*, 2017).

os metabólitos primários e secundários oriundos das microalgas, que fornecem propriedades antioxidantes, antibacteriana, antiviral, anti-inflamatória e propriedades anticancerígenas. Na área farmacêutica são produzidos antibióticos com esses compostos derivados de microalgas. Já na indústria de cosméticos são direcionados a produtos para pele, rosto e cabelo, uma vez que esses compostos possuem propriedades para acelerar o processo de regeneração da pele. As espécies de microalgas mais utilizadas neste segmento são *Chlorella vulgaris*, *Dunaliella salina*, *Spirulina platensis* e *Nannochloropsis oculata* (METSOVITI *et al.*, 2019).

No ramo de nutrição humana, as microalgas são comercializadas como cápsulas, tabletes ou em pó como suplementação nutricional, isso devido às suas células apresentarem compostos bioquímicos essenciais (CHU, 2012). As vantagens da utilização de microalgas na suplementação humana são que o seu cultivo não compete com áreas de agricultura, tem produtividade o ano todo, exigem menos água que as plantações e ainda está livre do uso de pesticidas. As espécies mais utilizadas comercialmente como suplementação nutricional na alimentação humana são a *Spirulina*, que é rica em ácido linoleico, vitamina B1 e ficobiliproteínas; e a *Chlorella*, que contém vitaminas, aminoácidos essenciais, clorofilas minerais (sódio, potássio, ferro, magnésio e cálcio),  $\beta$ -caroteno (muito utilizado como corante natural) e  $\beta$ -1,3-glucano (METSOVITI *et al.*, 2019).

Na agricultura as microalgas são aplicadas como biofertilizantes e condicionadoras do solo, uma vez que algumas espécies, principalmente as cianofíceas, possuem capacidade de fixar o nitrogênio atmosférico, composto muito importante para o crescimento e desenvolvimento das plantas. Além disso, também é capaz de melhorar nutricionalmente as plantas, aumentando, por exemplo, os seus teores proteicos (RATH, 2012).

Relacionada à produção de biocombustíveis (mais especificadamente o biodiesel), algumas espécies possuem um alto teor de óleo e crescimento rápido. Além disso o cultivo dessas microalgas não compete com a agricultura tradicional, voltada para a alimentação humana; crescem em diferentes condições climáticas; absorvem facilmente o CO<sub>2</sub> de diferentes formas e fontes; e são de diversas maneiras convertidas em biocombustíveis, por técnicas como conversão bioquímica, reação química e combustão direta (CHU, 2012). No entanto, as maiores dificuldades relacionadas ao uso das microalgas na indústria de biocombustíveis são os altos custos associados à colheita dessa biomassa e a extração dos lipídios, pois demandam de novas tecnologias ou equipamentos com alto custo (METSOVITI *et al.*, 2019).

Outra importante aplicação para a biomassa microalgal é no tratamento de resíduos ambientais, principalmente no tratamento de efluentes. Esses efluentes possuem uma composição diversificada, sendo em sua maioria constituídos por grande quantidade de matéria orgânica e metais pesados, que são dificilmente removidos pelos métodos de tratamento convencionais. A utilização de algumas espécies de microalgas que possuem a capacidade de assimilar o carbono de forma mixotrófica ou heterotrófica utilizando as cargas orgânicas dos efluentes e de absorver os metais pesados presentes nessas águas residuárias tem sido estudada, sendo os melhores resultados obtidos com as microalgas das espécies *Chlamydomonas*, *Ankistrodesmus*, *Chlorella* e *Scenedesmus* (SHAHID *et al.*, 2019). Além de realizar o tratamento dessas águas residuais devem ser considerados os benefícios econômicos provenientes da redução dos custos de produção de biomassa e aumento do rendimento da produção de produtos como pigmentos, enzimas, açúcares e lipídios (PACHECO *et al.*, 2020)

A biomassa de microalgas também é amplamente aplicada na nutrição animal, como um aditivo suplementar em rações de aves, ruminantes, pets de estimação e na aquicultura. Um exemplo de gênero de microalga muito utilizada é *Arthrospira*, sendo que 50% de sua produção é direcionada à suplementação animal. Apesar de todos os benefícios nutricionais que essa suplementação fornece aos animais, ainda existem alguns efeitos adversos provocados por um longo tempo de suplementação ou concentrações muito altas desta espécie. Esses efeitos acontecem principalmente com as aves, são eles a mudança na coloração da carne em aves de corte e ainda alterações na coloração dos ovos (RIZWAN *et al.*, 2018).

Além de apresentar ótimos resultados sendo aplicada na nutrição, principalmente, de aves, a biomassa microalgal como suplementação também é muito utilizada na aquicultura. A aquicultura consiste na criação e cultivo de organismos aquáticos como peixes, moluscos, crustáceos e plantas aquáticas, tanto em regiões de água doce como em regiões de água salgada.

Esse tipo de cultura pode ser dividido em diferentes áreas, são elas a algicultura (cultivo de algas, microalgas ou fitoplâncton), piscicultura (cultura de peixes), carcinicultura (cultivo de camarões), malacocultura (cultivo de ostras ou mexilhões) e outros grupos (incluem o cultivo de invertebrados, anfíbios e répteis aquáticos) (AVERSARI, 2018).

As microalgas apresentam alto valor nutricional benéfico a essas criações, no entanto, a avaliação de qualidade nutritiva da biomassa empregada na aquicultura considera aspectos como a taxa de mortalidade das larvas, taxa de desenvolvimento, viabilidade dos ovos e sucesso reprodutivo (OOSTLANDER *et al.*, 2020).

As espécies de microalgas mais utilizadas na suplementação em aquicultura são *Chlorella*, *Tetraselmis*, *Isochrysis*, *Pavlova*, *Phaeodactylum*, *Chaetoceros*, *Nannochloropsis*, *Skeletonema* e *Thalassiosira*. Já para o ramo de produção de camarões, peixes salmonídeos e peixes ornamentais as microalgas mais utilizadas são as *Dunaliella salina*, *Haematococcus pluvialis* e *Spirulina*, uma vez que essas espécies possuem além do fator nutricional altas concentrações de pigmentos naturais que aumentam e melhoram a coloração desses produtos (RATH, 2012).

Entretanto, recomenda-se que a alimentação desses animais por microalgas seja feita através de um consórcio de biomassa, ou seja, fornecer um mix com espécies variadas, visto que possuem características nutricionais diferentes e dessa forma a alimentação fica bem balanceada nos teores proteicos, de vitaminas, lipídios e carboidratos. Outro ponto a ser considerado ao fornecer esse microrganismo na aquicultura, é a qualidade da biomassa na forma de concentrado quando comparada com a biomassa seca, uma vez que as técnicas utilizadas para secagem envolvem altas temperaturas que podem, na maioria das vezes, interferirem na composição nutricional das células. No entanto, existe a opção de células liofilizadas que fornecem uma versão de biomassa seca com maior retenção dos nutrientes dentro da célula (DINESHBABU *et al.*, 2019).

## 2.4 MÉTODOS DE CULTIVO DE MICROALGAS

As microalgas são obtidas comercialmente pela coleta em *habitats* naturais, pelo cultivo em sistemas abertos ou cultivo em sistemas fechados, chamados de fotobiorreatores (FBRs). Os sistemas de cultivo aberto são os mais utilizados pelo baixo custo de construção e de manutenção, esses podem ser construídos em forma de tanques ou lagoas, com pouca profundidade e utilizando materiais como concreto, plástico ou fibra de vidro (AVERSARI, 2018).

Já os fotobiorreatores são construídos com plástico, vidro ou policarbonato, e podem possuir diversos formatos como painéis achatados ou sistemas tubulares. Apesar do custo de construção ser relativamente alto quando comparado com o sistema aberto, os fotobiorreatores apresentam vantagens relacionadas ao uso de menor área para construção e com maior superfície de contato solar, baixas taxas de contaminação, maior rendimento e condições de cultivo controladas (SELESU, 2015).

Nutricionalmente, um dos compostos mais importantes para o metabolismo microalgal é o carbono. Esse elemento pode ser absorvido tanto na forma orgânica quanto na forma inorgânica por meio de mecanismos fotossintéticos ou heterotróficos. A absorção desse nutriente está relacionada diretamente ao meio de cultivo e a espécie da microalga utilizada, podendo essas serem mixotróficas, autotróficas ou heterotróficas (MONÇÃO *et al.*, 2018).

As microalgas que utilizam o mecanismo de assimilação autotrófico, realizam o processo de fotossíntese, no qual empregam a luz solar como fonte de energia para converter o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) em biomoléculas. Esse mecanismo, é atualmente responsável por cerca de 50% da fixação global de CO<sub>2</sub> presente na atmosfera e provenientes de diversas fontes poluidoras (ALAM; WANG, 2019).

Já as microalgas que estão na ausência da luz realizam o processo de assimilação do carbono através do mecanismo heterotrófico, o qual utilizam transportadores específicos para absorção de açúcares ou outra fonte de carbono orgânico como fonte energética para a célula formando também biomoléculas importantes. A maior dificuldade do uso de meio heterotrófico é evitar a contaminação desses seres com outros microrganismos, no entanto, existem microrganismos que são benéficos quando cultivados em simbiose com as microalgas (COELHO *et al.*, 2019).

Existem ainda, as microalgas capazes de assimilar simultaneamente tanto a forma orgânica quanto inorgânica do carbono, essas são chamadas de mixotróficas. Esse processo é realizado por meio de rotas redutoras e oxidativas e podem garantir um melhor desenvolvimento da biomassa microalgal, uma vez que a disponibilidade de fonte de carbono é maior e abre possibilidade para o uso de efluentes, que além de conter alta carga orgânica (fonte de carbono) possui diversos nutrientes essenciais para o crescimento da célula (MONÇÃO *et al.*, 2018).

Além disso, o meio de cultivo utilizado precisa conter componentes essenciais como nitrogênio, composto utilizado na síntese proteica; fósforo, responsável pela realização dos processos associados a trocas energéticas e constituição das moléculas estruturais; magnésio,

que auxilia na formação da clorofila; e potássio, responsável regulação osmótica, controle de pH e estabilidade de proteínas (RIBEIRO, 2014).

Além das fontes dos nutrientes, o cultivo de microalgas depende outros fatores como intensidade da luz, pH, temperatura, remoção de oxigênio (para evitar a inibição do crescimento), agitação e aeração também afetam o desenvolvimento e a composição bioquímica da biomassa diretamente (BEHRENS, 2005).

A iluminação é considerada o parâmetro mais importante no cultivo autotrófico de microalgas, uma vez que a radiação é convertida em energia química e, então, armazenada na forma de proteínas, lipídios e carboidratos dentro da célula. A fotossíntese ocorre através da absorção de luz na faixa de 400 a 700 nm. Essa é a faixa do espectro chamada de Radiação Fotossinteticamente Ativa, uma faixa muito utilizada por fontes vegetais como fonte de energia para realizar as suas atividades metabólicas (RIBEIRO, 2014). A luz pode ser fornecida ao meio de forma contínua ou através de ciclos de claro-escuro, as condições extremas de densidade luminosa podem saturar as células de modo que provoque a fotoinibição. Conforme as células vão se multiplicando e conseqüentemente aumentando a densidade celular, a quantidade de luz necessária também aumenta. Sabendo disso, os FBRs são, em sua maioria, construídos com um caminho óptico pequeno, de modo que a luz penetre camadas cada vez mais fundas de meio (BEHRENS, 2005).

A agitação do meio auxilia diretamente na obtenção das melhores condições de iluminação. Uma vez que a luz é capaz de penetrar o meio até certo ponto, principalmente devido a concentração celular, manter uma agitação do meio permite que um número maior de células receba a quantidade necessária de luz para o seu crescimento. Além disso, esse parâmetro auxilia no controle de temperatura e pH, visto que diminui a formação de gradientes (BEHRENS, 2005).

O gás carbônico é essencial para a realização da fotossíntese, por esse motivo a maior parte dos FBRs podem ser aerados a partir de mecanismos que introduzem ar no meio de cultivo por meio de bolhas, de forma controlada para não prejudicar o pH do cultivo (BEHRENS, 2005). Naturalmente, devido à fotossíntese, ocorre liberação de oxigênio no meio e a remoção deste componente é de suma importância, uma vez que quando se encontra em excesso pode provocar danos foto-oxidativos na presença de iluminação intensa, além de alterar o metabolismo do organismo de fotossíntese para a fotorrespiração (RIBEIRO, 2014). A remoção do oxigênio pode ser realizada a partir da inserção de nitrogênio no meio. Com o oxigênio

removido a célula da microalga é capaz de realizar a fotossíntese normalmente. (BEHRENS, 2005).

A temperatura influencia diretamente nas reações celulares, no metabolismo, na concentração de biomassa, na nutrição e composição do organismo. Os valores ideais de temperatura variam entre as espécies de microalgas, exercendo tanta influência que é possível, em alguns casos, controlar qual espécie estará presente no meio apenas por ajustes na temperatura (RIBEIRO, 2014). No processo fotossintético nem toda a luz incidente é convertida em energia química, sendo o restante perdido na forma de calor. Dessa forma, se torna necessário um sistema de refrigeração, esse pode ser realizado por trocadores de calor, que consistem em materiais de boa condução térmica nos quais circula água fria, retirando calor do meio (BEHRENS, 2005).

O último, dentre os parâmetros mencionados, necessário ao cultivo é o controle de pH, no processo de fotossíntese esse deve estar entre 6 e 10 para que a máxima eficiência possível seja alcançada (KROUMOV *et al.*, 2016). O controle do pH pode ser realizado através da utilização de soluções tampão ou da dissolução do gás carbônico. De forma semelhante à temperatura, a taxa de crescimento específica é função do pH do meio, aumentando até atingir um ponto ótimo, e em seguida, a taxa de crescimento diminui frente ao contínuo aumento de pH (RIBEIRO, 2014).

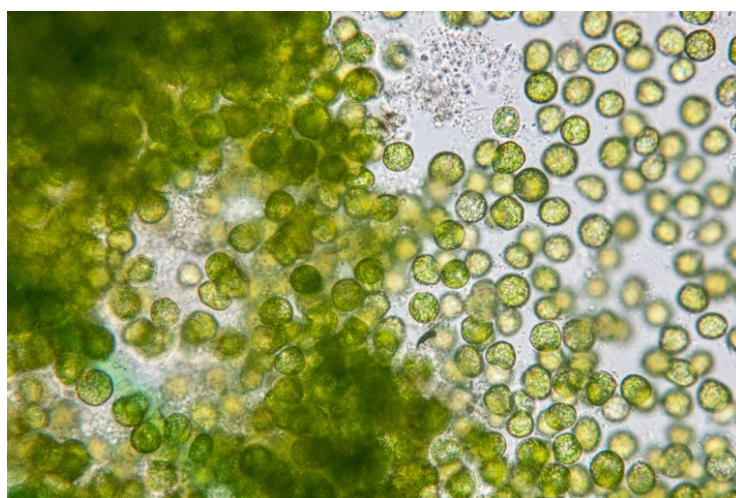
Após o cultivo das células são necessárias técnicas para recuperação dessa biomassa e então comercialização da mesma. As etapas de coleta dessa biomassa são as etapas mais custosas e limitantes do processo produtivo. O método de coleta depende diretamente da fisionomia da microalga, densidade, tamanho da célula e especificações do produto final, as principais técnicas de recuperação da biomassa são floculação, flotação, centrifugação e filtração. Após a coleta da microalga obtém-se o concentrado e pasta de biomassa, no entanto, para produtos de biomassa seca são necessárias etapas de concentração e/ou secagem do material. A secagem pode ser realizada ao sol (método de menor custo), por convecção (método com maiores perdas de nutrientes), por pulverização (método utilizado para obtenção de produtos de alto valor, no entanto, apresenta uma perda de 10 a 20% do conteúdo proteico) e liofilização (método com maior conservação dos constituintes celulares e com perda proteica menor que 10%) (BEZERRA, 2020).



## 2.5 CHLORELLA VULGARIS

A *Chlorella vulgaris* é uma microalga que se apresenta nas formas unicelular ou colonial, de formato esférico (Figura 1), com diâmetro entre 2 e 10 µm, parede celular rígida, espessura e composição variadas conforme fase da vida. Sua reprodução pode ser sexuada, por divisão binária ou assexuada por esporulação, ainda, é capaz de se adaptar a água doce e salobra, assim, estando presente em toda a superfície terrestre (CAVALCANTI, 2016).

Figura 1 - Imagem ilustrativa das células de *Chlorella vulgaris*



Fonte: Askew (2020).

O cultivo dessa microalga sofre variações de acordo com a suplementação do meio de cultura. Para a *Chlorella vulgaris* de cultivos de água doce, de maneira geral, as condições de pH está em torno de 7,3 a 8,0 e a temperatura de 25°C (CHOI *et al.*, 2019).

O controle de pH nos cultivos é necessário para evitar contaminações no processo, e essas variações ocorrem devido ao metabolismo desses seres vivos. Elevações no pH indicam que, no metabolismo autotrófico, o íon bicarbonato do meio se desidratou e formou o CO<sub>2</sub> para o processo de fotossíntese e o íon hidróxido liberado torna o meio de cultivo mais básico, o que pode ser ajustado com a injeção de CO<sub>2</sub> no mesmo. Já as quedas no pH ocorrem devido a liberação respiratória de CO<sub>2</sub>, tornando-se necessário o ajuste do mesmo com bicarbonato de sódio (ANDRADE; COSTA, 2008).

Essa microalga é rica em ácido ascórbico, tocoferol, vitaminas, minerais, proteína, além de pigmentos como carotenóides e clorofilas, especialmente luteína, clorofila a e b, e feonina a (CHA, 2010). Possui aplicabilidade tanto da biomassa *in natura* quanto dos extratos algais, podendo ser apresentada em pasta, concentrado ou pó. Frequentemente é utilizada como

suplemento alimentar e na indústria farmacêutica, se mostrando, ainda, interessante como fonte de suplemento para a aquicultura.

De uma forma mais ampla, o gênero *Chlorella* tem sido usado por vários pesquisadores no cultivo de organismos como rotíferos, crustáceos e peixes. Uma exemplificação pode ser vista no trabalho apresentado por Seixas (2001) onde a microalga foi utilizada para suplementação de rotíferos que posteriormente serviram de alimentos para larvas de pintado *Pseudoplatystoma corruscans*, o resultado foi uma maior sobrevivência e melhor desempenho dos peixes suplementados.

Ainda, segundo Costa (2010), a microalga em questão influencia positivamente no crescimento em peso e comprimento da tilápia (*Oreochromis niloticus*) durante a fase de reversão sexual. Também demonstrando, resultados de sobrevivência elevados com a suplementação da biomassa algal. Outros trabalhos trazem estudos sobre aplicação da biomassa de *Chlorella sp.* como suplemento alimentar na aquicultura (CORNÉLIO, 2012; FALCÃO, 2018; GRAEFF, *et al.*, 2012).

Considerando a importância das microalgas como fonte de compostos capazes de suprir as necessidades de suplementação para a aquicultura, a facilidade de cultivo da espécie citada acima, e tendo em vista a crescente abertura de mercado para suplementação por biomassa algal na piscicultura, é proposta a avaliação da viabilidade técnica e econômica da produção industrial de biomassa de *Chlorella vulgaris* como forma de auxiliar o desenvolvimento da piscicultura do oeste paranaense.

### 3. ENGENHARIA DO PRODUTO

#### 3.1 ANÁLISE DE MERCADO

Aplicações na área de consumo humano envolvendo produtos de alto valor agregado, como alimentos, produtos nutracêuticos, farmacêuticos e cosméticos se tornaram o alvo da biomassa microalgal, uma vez que a biomassa é produzida majoritariamente para essas aplicações (BUX, 2013; BOROWITZKA, 2013). Além disso, os mercados que atuam nessas áreas são os únicos capazes de pagar os altos custos de produção das microalgas. Sistemas de cultivo baseados em lagoas abertas possuem um custo de aproximadamente 5 euros por quilograma, enquanto para cultivos em tubos fechados o custo aumenta em até 10 vezes, chegando até a 50 euros por quilograma (NORSKER *et al.*, 2011; ACIÉN *et al.*, 2012).

Há um mercado em ascensão cujas microalgas desempenham um papel de grande interesse: produção de produtos químicos, biofertilizantes, tratamento de águas residuais, biocombustíveis e captura de CO<sub>2</sub> (WIJFFELS, 2009; KOOPMANS *et al.*, 2013). Para que seja produzida uma grande quantidade de biomassa afim de suprir esses mercados seria necessário produzir aproximadamente 100 quilotoneladas por ano de biomassa a um custo de 1€ o quilograma (ACIÉN *et al.*, 2019). No que diz respeito ao combustível utilizado no transporte nos Estados Unidos, para substituir 5% dessa demanda seria necessário produzir mais de 66000 quilotoneladas por ano de biomassa rica em óleo a um custo abaixo de US\$400,00 a tonelada (CHISTI, 2007). Apesar do imenso potencial das microalgas para o setor de energia e de *commodities*, ainda existe uma grande lacuna entre a tecnologia disponível e a necessária para atingir o potencial desejado (ACIÉN *et al.*, 2012).

Para que o processo possa se tornar mais barato e viável é preciso avaliar, estudar e implementar alterações no sistema produtivo. Dentre os pesquisadores que buscam diminuir os custos do processo, há um consenso que os principais gargalos técnico-econômicos são: reduzir o custo da tecnologia implementada; o consumo de energia no processo; mão-de-obra necessária para operação; e custos da matéria-prima (ACIÉN *et al.*, 2019). Essas alternativas vêm sendo feitas lentamente, apesar disso seus resultados são promissores, mostrando que está ocorrendo um aumento na capacidade de produção. Entretanto, estudos realizados em laboratório apresentam dificuldades de implementação em larga escala visto que alguns equipamentos em escala laboratorial não são aplicáveis em escalas maiores (*i.e.*, problemas de *scale-up*) (ACIÉN *et al.*, 2019).

Estudos comprovam que caso a tecnologia utilizada para cultivar microalgas continue avançando, será possível diminuir os custos da biomassa seca de 5,5 euros para 0,68 euros o quilograma. A redução dos custos é baseada no cenário ideal no qual: a planta produtora está localizada em uma região de condições climáticas ideais; é utilizado o nível de agitação mínima necessária para obter o efeito desejado; utilização de CO<sub>2</sub> atmosférico; utilização de meio de cultura alternativo, como por exemplo, efluentes; e incremento na eficiência fotossintética. (NORSKER *et al.*, 2011). Com grandes quantidades de estudos sobre o tema, outra solução que vem atraindo a atenção no que diz respeito a redução de custos é o cultivo de microalgas em águas residuais. Tal combinação permite maiores quantidades de biomassa a preços menores (FERNANDES, 2015; ÁCIEN *et al.*, 2016). Apesar de ser uma possível solução para o barateamento do cultivo, ainda não é a solução ideal, visto que a utilização desse tipo de meio para nutrição microalgal acaba por limitar o seu potencial além da necessidade de regulamentação do processo (ACIÉN *et al.*, 2019).

### 3.1.1 Mercado Internacional

Dentre as mais variadas espécies de microalga, as do gênero *Arthrospira* são conhecidas e comercializadas devido a uma grande composição proteica e valor nutritivo. A empresa com maior capacidade produtiva dessa microalga está localizada em Hainan, China. A produtora Hainan Simai Enterprising produz anualmente 200 toneladas de *Arthrospira* na forma de pó. Essa quantidade representa 25% do consumo nacional e cerca de 10% do consumo mundial. Outra planta produtiva, considerada a maior em área do mundo, está localizada em Calipatria, no estado da Califórnia, EUA. Essa planta é propriedade da Earthrise Farm, chegando a 440 mil metros quadrados e seus produtos são distribuídos em mais de 20 países ao redor do mundo (SPOLAORE, 2006).

Outra microalga produzida em grande escala é a *Chlorella*, cuja produção é feita por mais de 70 empresas diferentes (YAMAGUCHI, 1997). Esse gênero é um dos mais comercializados mundialmente e teve acesso ao mercado europeu com o Novel Food Regulation nº 258/97, sendo 3 espécies as catalogadas: *Chlorella pyrenoidosa*, *Chlorella vulgaris* e *Chlorella luteoviridis* (GALANTE, 2018).

Aplicações na área de cosméticos também merecem bastante destaque no mercado mundial. Algumas empresas conseguiram desenvolver fórmulas inovadoras (já patenteadas) utilizando produtos extraídos de microalgas para aplicação em cosméticos. A empresa Exsymol S.A.M. em Mônaco utiliza uma proteína extraída da *Arthrospira* para reparar marcas de

envelhecimento e prevenir formação de estrias. Outra empresa, Codif, em St. Malo, França, obteve um extrato de *Chlorella vulgaris* que estimula a síntese de colágeno na pele e assim melhora a regeneração do tecido e reduz a formação de rugas (SPOLAORE, 2006). No Vale do Silício, *Algemist* é uma empresa de biotecnologia que utiliza substâncias provenientes das microalgas, como óleos e proteínas e ácido algarônico®. Suas fórmulas oferecem tratamento anti-idade, proteção UVB e correção da coloração da pele. Os produtos são para todos os tipos de pele e não causam irritação. *Algemist* não utiliza corantes sintéticos, sulfatos e parabenos para assim evitar agressões a pele dos consumidores e a natureza (PROFISSÃO BIOTEC, 2017).

As microalgas possuem pigmentos naturais com grande interesse no mercado. Um exemplo de pigmento amplamente utilizado em diversas aplicações é o  $\beta$ -caroteno. A microalga mais cultivada a fim de obter esse pigmento em específico é a *Dunaliella salina*, muito cultivada em plantas na Austrália, Israel, EUA e China (GONZÁLEZ *et al.*, 2005; LÉON *et al.*, 2003). O maior produtor de *D. salina* no mundo é a Cognis Nutrition and Health com fazendas cobrindo cerca de 800 hectares na região de Hutt Lagoon, oeste da Austrália e Whyalla, sul da Austrália. Sua produção está voltada para extratos de  $\beta$ -caroteno, *D. salina* na forma de pó e *D. salina* seca. Tais produtos podem variar de US\$ 300 até US\$ 3000 o quilograma (AMOTZ, 2004).

### 3.1.2 Mercado Nacional

Apesar da produção de microalgas ser bastante difundida e realizada no exterior, no território brasileiro a produção tem sido praticada por poucas empresas, grande parte localizada no litoral de Santa Catarina e em vários estados do Nordeste. Sua produção é mais voltada para alimentação de camarões e moluscos (DERNER, 2006).

A Ocean Drop é uma startup Catarinense especializada em desenvolvimento de suplementos, vitaminas e minerais de microalgas. Foi em 2016 que lançou os primeiros produtos no mercado, vendia uma média de 2500 unidades por mês chegando a faturar R\$ 700.000,00 no seu primeiro ano de operação. Até 2020, utilizando recursos próprios para aumentar o portfólio, a empresa cresceu 20 vezes sua receita em relação ao primeiro ano, trabalhando com os produtos na faixa de preço entre R\$ 69,00 e R\$ 199,00. Desde então, buscou captar investimentos para expansão. Com os fundos arrecadados, a meta para 2021 é aumentar a equipe de 20 para 40 colaboradores e o portfólio de produtos de 20 para 50 inovações, até o final do ano (EMPREENDEDOR, 2020).

Além disso, existem outras empresas que têm começado um sólido trabalho em diferentes áreas de aplicação como a empresa Algae Biotecnologia, Algasul Biotecnologia, Algabloom e OLSON. A empresa Algae Biotecnologia (ALGAE BIOTECNOLOGIA, 2021) localizada em Holambra, São Paulo, foca o seu trabalho desenvolvendo soluções tecnológicas para: tratamento de efluentes líquidos e gasosos; biofixação de CO<sub>2</sub>; e produção de aditivos para nutrição animal. A Algasul Biotecnologia e Nutrição (ALGASUL, 2021) é uma empresa que se desenvolveu dentro da Universidade Federal do Rio Grande, no Laboratório de Produção de Microalgas da Estação Marinha de Aquicultura. A Algasul atua na produção e comercialização de biomassa liofilizada, biomassa em pasta, biomassa concentrada e óleo rico em ômega-3 (ainda em desenvolvimento). A Algabloom é uma startup de biotecnologia que cria soluções inovadoras para o crescimento da aquicultura através de microalgas (SALES, 2020). Com a produção totalmente brasileira, a OLSON, possui a primeira produção de *Spirulina* nativa no Brasil (OLSON, 2021).

Apesar do amplo crescimento das empresas nesse setor dados estatísticos ainda são defasados em nível nacional. Assim, dificultando melhor a análise da industrialização da produção de biomassa algal no mercado brasileiro.

### 3.1.3 Perspectivas futuras

As microalgas possuem uma ampla variedade de utilidades e benefícios. Apesar das aplicações que não envolvem alimentos ainda estarem em estudo para validar a viabilidade do processo, a produção desse microrganismo está cada vez mais sustentável industrialmente. Existem diversas empresas em fase de estudos laboratoriais a fim de abranger essas novas aplicações industriais. Os custos atuais já são consideravelmente menores do que eram há anos atrás, e considerando os programas intensos de PD&I para microalgas em algumas décadas, na melhor das hipóteses, os custos estarão bem menores, de modo que novas e já existentes aplicações poderão ser feitas de modo mais prático, menos custoso e mais sustentável.

A Tabela 2 mostra como o número de artigos publicados com temas relacionados às microalgas mais que triplicou no período de 10 anos mostrando que de fato, o estudo sobre esses seres só aumenta e que o processo, hoje ainda em ascensão, possa no futuro se tornar mais comum.

Tabela 2 - Tabela demonstrativa do número de artigos publicados com relação a microalgas de 1960 a 2018.

Ano de publicação	“microalga”		“cultivo”		“cadeia produtiva”	
	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil	Mundo	Brasil
1960 – 1969	16	0	2	0	0	0
1970 – 1979	83	0	5	0	0	0
1980 – 1989	459	1	29	0	0	0
1990 – 1999	1614	19	79	0	0	0
2000 – 2009	3449	106	208	17	1	0
2010 – 2018	15686	720	3048	177	37	7
Total	21307	846	3371	194	38	7

Fonte: Adaptado de ANDRADE *et al.* (2020).

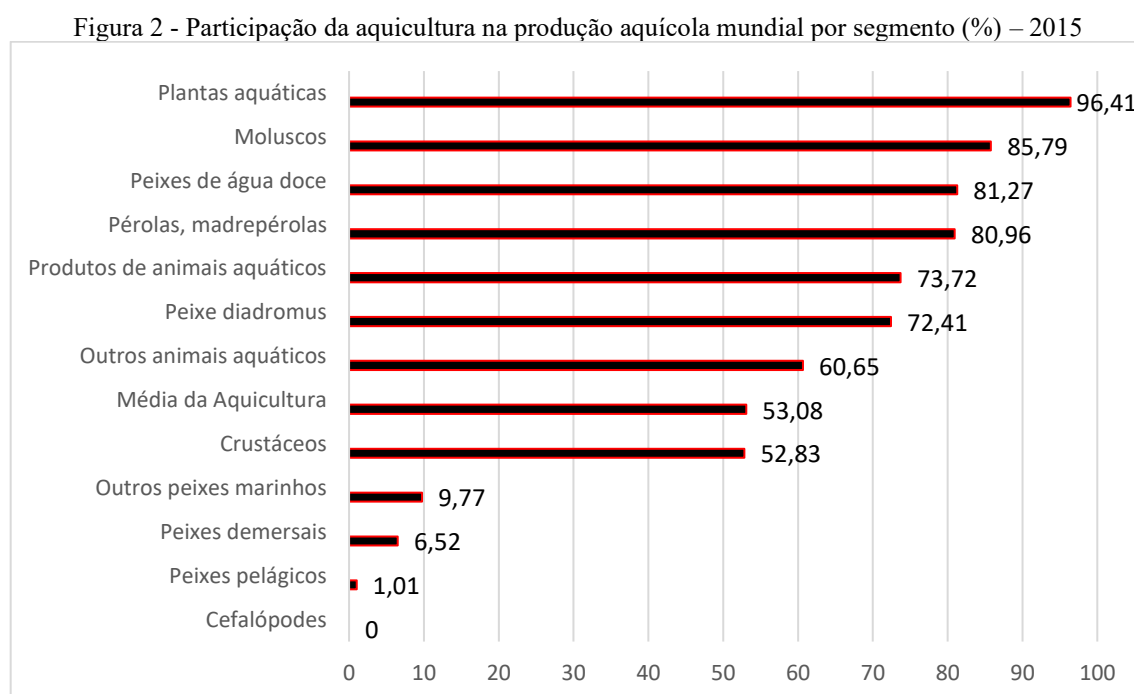
### 3.2 MERCADO DA AQUICULTURA

Quando comparado a outros cultivos, a aquicultura não cresceu como deveria, o que poderia ter sido intensificado com maior organização dos produtores, políticas de incentivo e apoio do governo. Além disso, o Brasil é considerado um país com excelente potencial para a aquicultura dado o seu amplo território, clima, disponibilidade hídrica e áreas favoráveis para implementação de tanques e açudes. Soma-se a os fatores já citados os seus 8,5 mil quilômetros de faixa costeira e 4,2 milhões de hectares de águas represadas (pouco usadas) e obtêm-se um cenário favorável a aquicultura brasileira (KUBITZA, 2015).

De um ponto de vista mais amplo, a aquicultura a nível mundial também possui um elevado potencial de crescimento visto que a tecnologia utilizada é de fácil assimilação, custo baixo de implementação das unidades de produção e a vasta área passível de ser utilizada para essa finalidade (oceanos, 70% da área do planeta) (SIQUEIRA, 2018). Publicado em 2015, um artigo intitulado *Reviving the Ocean Economy* (Revivendo a economia do oceano) mostra que, no mesmo ano, os oceanos geraram 2,5 trilhões de dólares por ano em bens e serviços, correspondendo à sétima maior economia do mundo (HOEGH-GULDBERG *et al.*, 2015). Em 2016, outro artigo (*The Ocean Economy in 2030*) mostra que atividades relacionadas à economia dos oceanos geraram um valor adicional de 1,5 trilhão de dólares e gerou 31 milhão de novos empregos diretos no ano de 2010 (SIQUEIRA, 2018). Essas pesquisas mostram como o oceano pode ser uma fonte economicamente ativa.

No ano de 2013, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) começou a incluir a aquicultura no censo agropecuário realizado. De acordo com a instituição, em 2013 foram produzidas cerca de 392,5 mil toneladas de pescado. Em 2014, o grupo Acqua Imagem

fez um levantamento da produção aquícola em todo país. O estudo mostrou que em 2014 foram produzidas 486 mil toneladas de peixe, 90 mil toneladas de camarões, 20 mil toneladas de mexilhões e aproximadamente 4 mil toneladas de outras espécies (ostras, camarão de água doce e algas), somando ao todo 600 mil toneladas (KUBITZA,2015). Considerando níveis globais, de 1950 a 2015: a produção de peixes de água doce passou de 554 mil toneladas por ano para 44 milhão de toneladas anuais; moluscos e crustáceos passaram de 474 e 2,48 mil toneladas por ano para 16,4 e 7,3 milhões de toneladas anuais. A Figura 2 mostra a porcentagem de participação da aquicultura em cada segmento, por exemplo, no que se refere a peixes de água doce, a aquicultura tem uma participação de 81% nesse setor (SIQUEIRA, 2018).



Fonte: SIQUEIRA (2018).

Nos últimos quarenta anos, o setor de aquicultura enfrentou muitos desafios tecnológicos além de diversas crises financeiras mundiais. Apesar disso, tal setor ainda apresentou um crescimento de 53% da produção mundial no ano de 2015. Estimativas apontam que se o crescimento se manter até o ano de 2025 a produção de aquicultura será duas vezes maior que a coleta. Em outras palavras, a produção terá superado e muito a coleta natural (SIQUEIRA, 2018).

Até o ano de 2003, grande parte da produção aquícola no Brasil era exportado. Conforme o Real foi ganhando valor e crises econômicas foram acontecendo, o comércio da aquicultura foi ganhando mais o mercado interno. Em 2015, 95% do pescado brasileiro era



consumido no mercado doméstico. Dado a crescente demanda, o Brasil começou a se tornar um grande importador de pescado, atingindo, em 2014, 400 mil toneladas importadas e somente 34 mil exportadas, gerando um déficit de 366 mil toneladas e 1,3 bilhão de dólares na balança comercial (KUBITZA, 2015).

Do ponto de vista alimentar e saúde, a Organização Mundial de Saúde recomenda que sejam consumidos pescados ao menos duas vezes na semana com um consumo de 12 kg por ano (*per capita*). O Brasil, infelizmente possui um consumo na faixa de 9 kg por ano enquanto alguns países como Portugal e Islândia o consumo é de 60 kg por ano. Outros países como Espanha, França, Suécia, Finlândia, Noruega, Japão e China, o consumo vai de 30 a 60 kg por ano (FAO, 2016).

Outro problema a ser considerado diz respeito ao crescimento populacional e aumento na demanda de alimentos. A Organização das Nações Unidas (ONU, 2015) estima que até 2050 a população alcançará 9,7 bilhões de pessoas e até 2100 chegará a 11 bilhões, pressionando o aumento na produção de alimentos. Um relatório elaborado nomeado *The State of Food Security and Nutrition in the World 2017* (FAO *et al.*, 2017) mostra que apesar de um declínio por mais de dez anos, a fome global voltou a aumentar e trazendo diversos problemas associados como deficiência na nutrição e tratamento de saúde de diversas pessoas.

A soma desses fatores mostra uma necessidade de aumentar as iniciativas de produção alimentar mundial destacando segmentos saudáveis, de baixo custo, com produção sustentável (SIQUEIRA, 2018). Nesse contexto, um aumento na produção aquícola poderia ser uma alternativa para os mais diversos problemas alimentícios atuais, como por exemplo: potencial declínio da produção agropecuária devido ao clima; efeito negativo do aumento nos preços das *commodities* agropecuárias; e o retorno da fome, como já evidenciado em diversos países (SIQUEIRA, 2018).

Dados mostram que no ano de 2012 cerca de 70% de toda carne de peixe produzida e 73% dos óleos providos de peixe foram consumidos pela aquicultura. As estimativas são de que, nas décadas que se seguirão, a produção de carne e óleo de peixe não irá atender a demanda da aquicultura. Nesse sentido, é importante buscar outras fontes de alimentação específica para aquicultura de modo a não somente depender de carne e óleo de peixe. Dentre as diversas alternativas surgem as microalgas. Até recentemente a tecnologia e os estudos desenvolvidos nessa área tiveram como foco o uso de microalgas como complementação alimentar com enfoque em alguns benefícios bem específicos. Entretanto, há um crescente número de estudos

buscando implementar uma alimentação completa a base de microalgas a fim de tornar a indústria aquícola autossustentável (SHAH *et al.*, 2018).

### 3.3 MATÉRIA-PRIMA E INSUMOS

O crescimento e desenvolvimento das microalgas depende do fornecimento nutricional que são obtidos a partir dos mais variados meios de cultura. Tais meios podem vir a ser inorgânicos ou orgânicos, com diferentes composições e formulações. Entretanto, as microalgas exigem principalmente macronutrientes (Carbono, Nitrogênio e Fósforo), micronutrientes (traços de metais) e vitaminas (CHEW *et al.*, 2018), sendo assim, os meios de cultura são bastantes similares entre si, diferenciando algumas vezes na concentração de um dado componente com objetivo de obter um produto característico somente alcançado nessas condições específicas. É comum encontrar cultivos utilizando os meios sintéticos tradicionais, como por exemplo, Walne, KW21, BG11, BBM, Conway ou Guillard f/2 (UTEX, 2021). Porém, esses acabam sendo onerosos para produções em larga escala dado o seu custo alto devido a pureza dos reagentes (NETO *et al.*, 2018).

Com o elevado custo operacional em larga escala, vem sendo estudados possíveis substitutos para os reagentes puros, ou seja, meio de cultura alternativos, assim, alguns estudos trazem como alternativa os fertilizantes agrícolas, águas residuais, entre outras opções. A vantagem desses meios é o menor custo fornecendo os mesmos nutrientes e de mais fácil de acesso (BRITO *et al.*, 2018).

Wong *et al.* (2017) realizou um experimento para verificar qual meio de cultura utilizado no cultivo de *Chlorella vulgaris* é capaz de garantir o maior crescimento específico possível. Os meios sintéticos avaliados foram BBM, M-8, BG-11 modificado, Spirulina modificado, N-8, BG-11, RM, F-Si, Chu N°10 modificado, Johnson, F/2, Fog e Fog sem nitrogênio. Ao final observou-se que o meio BBM, M-8 e BG-11 modificado foram os três melhores meios com crescimento específico  $0,278\text{ d}^{-1}$ ,  $0,259\text{ d}^{-1}$  e  $0,249\text{ d}^{-1}$ , respectivamente.

Considerando as informações apresentadas, o meio sintético que poderia ser utilizado no cultivo da microalga *C. vulgaris* é o meio BBM visto a sua maior capacidade de crescimento celular. Contudo buscando minimizar os custos associados aos reagentes para o preparo do meio de cultivo, optou-se por realizar o crescimento da biomassa algal com meio de cultura alternativo composto por nitrogênio, fósforo e potássio, popularmente conhecido pela sigla

NPK 20:20:20 (o número 20 representa a porcentagem de cada composto presente no fertilizante), cuja composição é apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 - Fertilizante NPK (20:20:20 + metais)

Nutriente	Composto	Porcentagem no meio (% m/m)
Nitrogênio	Ureia	2,10
	Amônia	17,90
Fósforo	Oxido de Fósforo	20,00
Potássio	Oxido de Potássio	20,00
Metais	Magnésio	0,10
	Zinco	0,05
	Manganês	0,05
	Ferro	0,10
	Cobre	0,05
	Boro	0,02
	Vitamina B	0,0005

Fonte: MAHMOOD (2017).

Alguns autores já mostram a potencialidade e eficácia do uso de NPK como meio de cultivo para a microalga *Chlorella vulgaris*, é o caso do trabalho de Mtaki *et al.* (2021), que mostrou a viabilidade da utilização do fertilizante como alternativa para o crescimento da biomassa, além de potencializar o desempenho em relação a alguns parâmetros específicos. Ammar (2016) trabalhou com o cultivo da microalga *Chlorella vulgaris* para a produção de biomassa utilizando NPK como meio alternativo e concluiu que se pode alcançar a produtividade de biomassa com o meio proposto.

No que diz respeito à fonte de carbono, as microalgas são capazes de assimilar tanto carbono orgânico quanto inorgânico. As fontes inorgânicas podem ser dióxido de carbono e bicarbonato, diferenciando-se pelo gasto energético que o segundo leva para ser absorvido pelas células algais, assim, quando possível, é preferível utilizar o CO<sub>2</sub> como fonte inorgânica de carbono (OHSE *et al.*, 2007).

Considerando, que no presente projeto, o cultivo da microalga da espécie *C. vulgaris* optou-se por tanques abertos, a obtenção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) necessário para realização da fotossíntese dessa microalga será realizada através da captura de CO<sub>2</sub> presente no ar, cerca de 0,04%. Ainda, será utilizado um sistema de aeração dos tanques de forma que, além de homogeneizar o meio de cultura, facilite a absorção de gás carbônico pelas células.

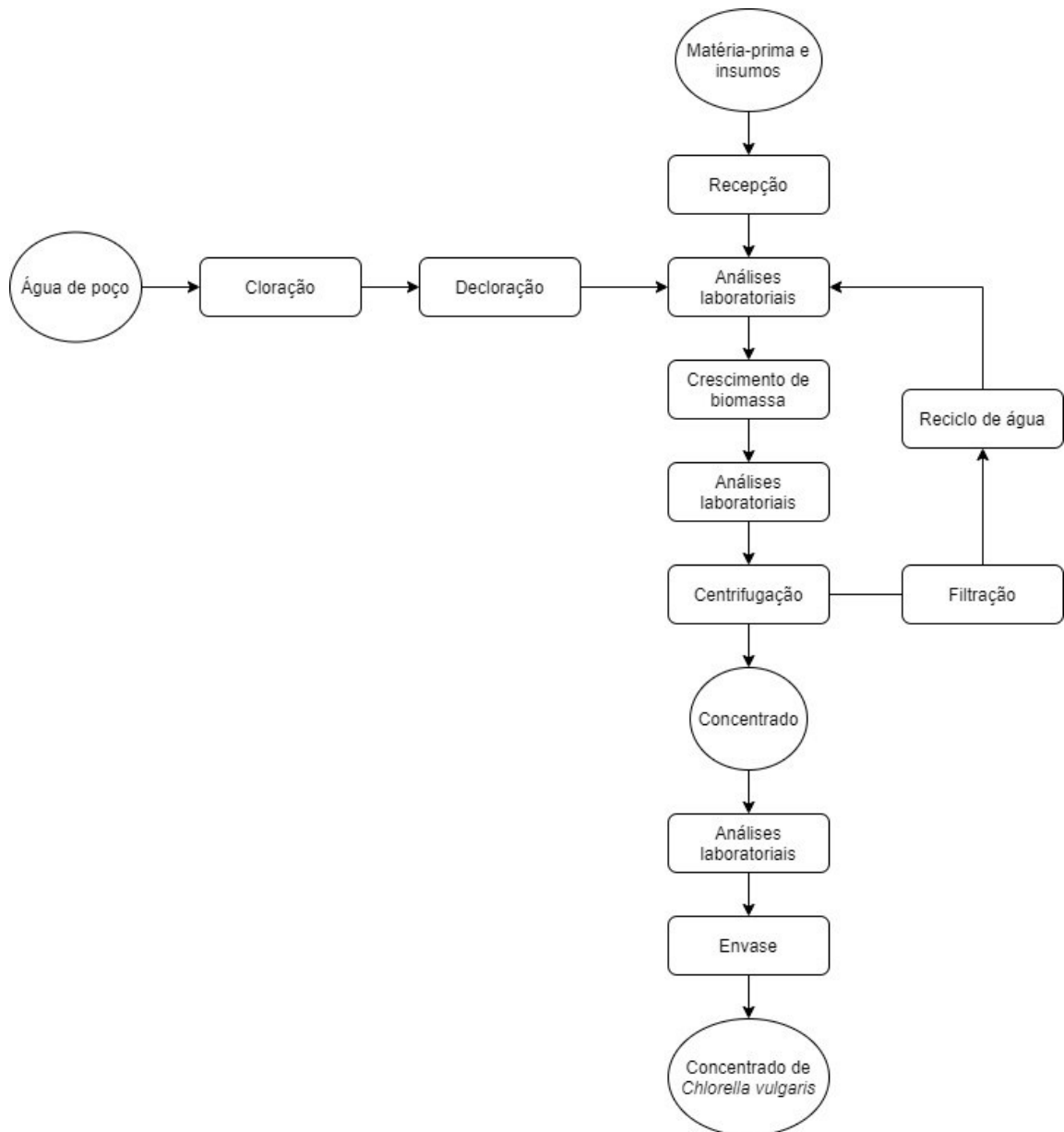
### 3.4 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DE PRODUÇÃO DE BIOMASSA

Nessa etapa será descrita a produção de biomassa para o projeto em questão.

#### 3.4.1 Diagrama de blocos do processo produtivo de concentrado de *Chlorella vulgaris*

A Figura 3 mostra de um modo simples o processo produtivo de produção da biomassa microalgal de *Chlorella vulgaris*, indicando os produtos obtidos assim como as operações unitárias utilizadas.

Figura 3 - Diagrama de blocos do processo produtivo de concentrado de *Chlorella vulgaris*



Fonte: Autores (2021).

### 3.4.2 Recebimento de insumos, matéria-prima e análises laboratoriais

Assim como está demonstrado na Figura 3, a etapa inicial do processo consiste em receber os insumos necessários ao crescimento microalgal e a matéria-prima principal, a cepa de *Chlorella vulgaris* dos cepários brasileiros. Esses insumos são basicamente componentes do meio com fertilizante NPK, e reagentes necessários para as análises de qualidade durante todo o processo, que são verificados no laboratório e depois armazenados em almoxarifado.

As cepas recebidas passam por repiques mensais ou conforme a necessidade dos cultivos, esses repiques serão realizados em câmara de fluxo laminar em tubos de ensaios em meio com fertilizante NPK com 2% de ágar e cultivadas em BOD na temperatura de  $23,0 \pm 1^\circ\text{C}$  por cerca de 7 dias, com um fotoperíodo de 12 horas (claro-escuro), a fim de obter a microalga até a fase exponencial e então armazená-las em câmaras frias. A contagem de células desses cultivos será realizada através de microscópio ótico e câmara de Neubauer. Esses cultivos estoques serão realizados para garantir o abastecimento da produção com culturas puras, a sobrevivência e integridade das células, reduzindo assim as contaminações durante o processo produtivo (ZANATA, 2020).

### 3.4.3 Cloração e decloração da água e análises laboratoriais

O processo da cloração da água consiste basicamente em utilizar produtos químicos à base de cloro na proporção de aproximadamente 8 g para cada 5000 L de água, com a finalidade de inativar os micro-organismos existentes na mesma. No entanto, após essa etapa é necessário declorar a água antes que essa chegue ao reator, para isso utiliza-se uma solução anticloro de tiosulfato de sódio, na proporção de 1 mL para cada 16 L de água. Esse processo de purificação é realizado para garantir uma melhor qualidade e evitar maiores contaminações no cultivo (BRASIL, 2014).

Após a filtração são realizadas análises de qualidade dessa água antes de direcioná-la ao abastecimento dos reatores. Os parâmetros físico-químicos mais importantes a serem considerados são os níveis demanda química de oxigênio (DQO) e demanda bioquímica de oxigênio (DBO), que avalia a presença de matéria orgânica; turbidez, que no caso de cultivos de microalgas acabam impedindo a incidência luminosa; acidez, alcalinidade e temperatura, uma vez que as microalgas necessitam de condições favoráveis ao crescimento; dureza, uma vez que águas com dureza elevada dificultam o controle dos minerais presentes; Nitrogênio, Nitrato e Amônia, que necessitam estar em níveis adequados para não modificar o metabolismo desses seres vivos (ARAÚJO, 2018).

### 3.4.4 Crescimento de biomassa e análises laboratoriais

Com as células já cultivadas em meio sólido, adiciona-se cerca de 3 mL de meio BBM aos tubos inclinados a fim de ressuspender as células de *Chlorella vulgaris* na fase aquosa. Esse volume é transferido para Erlenmeyer formando o pré-inóculo juntamente com a adição de meio

de cultivo. Após o crescimento dessas células, as mesmas são transferidas para frasco Erlenmeyer com maior volume para dar origem ao inóculo. E então esse inóculo é transferido para os tanques de cultivo, considerando sempre o volume de 10% do volume final do tanque de inóculo (ZANATA, 2020).

O cultivo de microalgas para essa finalidade pode ser realizado de diversas formas, sendo uma delas realizado em tanques elevados abertos com uma estrutura de estufa cobrindo-os, a fim de garantir um controle melhor das temperaturas e das variações climáticas, além de reduzir as possíveis contaminações dentro do processo.

O acompanhamento do crescimento celular também é realizado por meio da contagem de células por câmara de Neubauer e construção de curva de crescimento celular. Além disso, os microscópios são utilizados durante todo o processo de cultivo para verificação da presença de fatores contaminantes.

#### 3.4.5 Centrifugação, filtração e análises laboratoriais do concentrado

Com o nível celular necessário atingido, o cultivo passa por uma centrífuga, na qual é realizada a concentração celular para a comercialização. A água retirada do cultivo passa por um processo de filtração, a microfiltração, para retirada do restante de microrganismos presente na água, e então é analisada em laboratório. Após a retirada de qualquer tipo de contaminante, a água é reaproveitada nos tanques de cultivo celular. O concentrado obtido é analisado e quantificado em laboratório a fim de garantir a qualidade do produto a ser comercializado (LIMA, 2016).

#### 3.4.6 Envase e comercialização

Com os critérios de qualidade atingidos, o concentrado é direcionado ao setor de envase, no qual são envasados em frascos de 1 L e galões de 10 L, de acordo com a demanda dos produtores de piscicultura. A indústria possui ainda um estoque climatizado para armazenamento do produto final até o transporte aos clientes.

## 4. ESTUDO DA LOCALIZAÇÃO

A escolha da localização de uma indústria afeta diretamente sua capacidade competitiva frente aos concorrentes, além de outros aspectos de igual importância. O local no qual será implantada a indústria afeta o seu custo, visto que altera os custos referentes a transporte, mão-de-obra, energia, água, entre outros (CORRÊA, 2019).

Um dos métodos mais utilizados para a escolha do local é chamado de ponderação qualitativa ou ponderação de fatores. Esse método é feito através da atribuição de pesos a fatores determinantes na escolha da localização e em seguida atribuir notas a cada fator. Ao final, multiplica-se o peso e a nota de cada fator para cada opção de local e realiza-se por fim o somatório. O local que apresentar maior pontuação é escolhido como opção mais viável (CORRÊA, 2019).

### 4.1 FATORES DETERMINANTES

#### 4.1.1 Clima

Além dos diversos fatores já conhecidos que influenciam o crescimento das microalgas, como nutrientes, luz, pH, a temperatura também exerce grande influência. Cultivos de microalgas realizados em ambientes abertos expostos a luz solar estão propensos a sofrer variações de temperatura entre 10 e 45 °C devido ao efeito estufa (BÉCHET *et al.*, 2010). De um modo geral, microalgas são capazes de realizar a fotossíntese e multiplicação celular em temperaturas variando de 15 a 30 °C com condição ótima entre 20 e 25 °C (LI, 1980).

Quando o cultivo está em temperatura menor que a temperatura ótima é observado que o aumento na temperatura causa um efeito positivo na fotossíntese e divisão celular. Essa relação já vem sendo estudada e modelada a partir da equação de Arrhenius. A partir desses estudos surge o chamado coeficiente Q10 o qual representa o incremento na taxa de crescimento a cada aumento de 10 °C na temperatura. Esse parâmetro é estimado ser próximo de 2, ou seja, para cada 10 °C de aumento na temperatura é esperado que o crescimento celular, fotossíntese e divisão celular dupliquem até que temperaturas desfavoráveis ocorram (RAS, 2013).

Espécies variadas de microalgas possuem temperaturas ótimas de crescimento diferentes umas das outras. Kessler (1985) estudou a relação entre a taxa de crescimento e a temperatura ótima para diferentes espécies de *Chlorella*. Durante esse estudo o autor chegou na temperatura de 26 °C como sendo a temperatura ótima para *Chlorella vulgaris*.



#### 4.1.2 Mercado consumidor

Algumas empresas optam por estar perto do mercado consumidor para diminuir custos de logística ou até mesmo devido à perecibilidade de seu produto (CORRÊA, 2019). No caso da indústria de produção de biomassa microalgal concentrada direcionada ao mercado aquicultor a proximidade aos produtores (clientes) é de suma importância, visto que o concentrado é um produto perecível e necessita de entrega rápida aos produtores.

#### 4.1.3 Custos imobiliários e fixos

A escolha do local mais adequado para a indústria deve considerar os preços imobiliários específicos da região em que irá se instalar. O mercado imobiliário varia entre regiões, de modo que a mesma área para um terreno pode custar um valor menor em um lugar do que outro. Além disso, algumas cidades buscam atrair indústrias para seu território através de incentivos fiscais, cedendo terrenos e/ou empréstimos com juros menores. O custo referente à eletricidade e água também pode variar conforme a localidade, desta forma, dependendo da atividade realizada pela indústria é mais vantajoso se instalar em regiões com menores custos de energia elétrica e água.

### 4.2 MÉTODO DE PONDERAÇÃO QUALITATIVA

A imagem abaixo (Figura 4) mostra o mapa do estado do Paraná. As marcações em vermelho indicam as empresas/indústrias de aquicultura instaladas no estado enquanto as marcações amarelas indicam os dois possíveis locais de implementação da indústria, esses locais foram definidos devido à maior proximidade ao mercado consumidor (piscicultura). Para escolha do melhor local será utilizado o método já citado, a Ponderação Qualitativa.



Tabela 4 - Dados climáticos dos últimos 30 anos para Toledo e Curitiba no estado do Paraná

	Toledo – PR		Curitiba – PR	
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Mínima (°C)	Máxima (°C)
Janeiro	20	29	18	25
Fevereiro	20	29	18	25
Março	19	29	17	25
Abril	17	26	15	23
Maio	14	23	12	20
Junho	13	21	10	19
Julho	12	22	10	18
Agosto	14	24	10	20
Setembro	15	25	12	20
Outubro	17	27	14	22
Novembro	18	28	15	23
Dezembro	19	29	16	25
<b>Média</b>	16,5	26,0	13,9	22,1

Fonte: Clima Tempo (2021).

Nitsche *et al.* (2019), do Instituto Agronômico do Paraná elaboraram o Atlas Climático do Estado do Paraná (2019), traz dados climáticos de toda a região como por exemplo, umidade, temperatura, precipitação, evaporação, etc. O Anexo E mostra a média anual de temperatura na região do Paraná assim como a média de temperatura em cada estação. A Tabela 5 apresenta esses valores a fim de comparação.

Tabela 5 - Comparação da temperatura média no estado do Paraná de diversos períodos no ano de 2019

Período	Toledo – PR	Curitiba – PR
	Média (°C)	Média (°C)
Anual	19,1 a 20,0	17,1 a 18,0
Verão	23,1 a 24,0	20,1 a 21,0
Outono	19,1 a 20,0	17,1 a 18,0
Inverno	16,1 a 17,0	13,1 a 14,0
Primavera	20,1 a 21,0	17,1 a 18,0

Fonte: NITSCHKE *et al.*, (2019).

Analisando as Tabelas 4 e 5, verifica-se que na cidade de Toledo tanto a temperatura média anual quanto a média por estações se mantiveram mais alta que Curitiba além de que a média se manteve mais próximo da temperatura ótima de cultivo das microalgas a serem cultivadas na indústria. Dessa forma, a opção por Toledo recebe nota maior para o fator clima

com relação à opção por Curitiba visto que sua média máxima de temperatura fica mais próxima da temperatura considera ótima para crescimento da *Chlorella vulgaris*.

Como as duas localidades analisadas se encontram no estado do Paraná, as empresas responsáveis pela cobrança e distribuição da energia elétrica e água do estado são a Copel e a Sanepar, respectivamente. As tarifas de energia e uso de sistema de distribuição no Paraná atualmente são ditadas pela Resolução ANEEL 2.559 de 18 de junho de 2019, válida a partir de 24 de junho de 2018. De acordo com a Resolução, as tarifas são divididas em grupos, de modo que o valor a ser pago tanto em Toledo quanto em Curitiba são o mesmo para uma mesma classe. Sendo assim, não há diferença no preço da energia tanto na localidade Toledo quanto Curitiba.

As tarifas referentes à distribuição e consumo de água, por outro lado, variam de acordo com a região. Conforme a Resolução Nº 015/2021 - AGEPAR de 14 de abril de 2021, os valores de água se mantêm o mesmo para toda região do Paraná. Porém, o serviço de tratamento de esgoto ou água e esgoto para atividades industriais, em reais por metro cúbico, varia de Curitiba para outras localidades, como mostra a Figura 5.

Feito tais considerações, conclui-se que a melhor opção para o fator analisado é a cidade de Toledo, no Paraná. Desse modo, essa localidade recebe nota maior do que a outra opção.

Figura 5 - Preço (R\$/m<sup>3</sup>) de água e tratamento de água/esgoto para Curitiba e demais localidades do Paraná

		INDUSTRIAL (R\$/m <sup>3</sup> )					
		Até 5 m <sup>3</sup>	6 a 10	11 a 15	16 a 20	21 a 30	> 30
<b>ÁGUA Todas as Localidades Operadas</b>		<b>77,60</b>	<b>1,99</b>	<b>9,52</b>	<b>9,67</b>	<b>9,70</b>	<b>9,74</b>
<b>Curitiba</b>	<b>ESGOTO</b>	65,96	1,69/m <sup>3</sup>	8,10/m <sup>3</sup>	8,22/m <sup>3</sup>	8,25/m <sup>3</sup>	8,28/m <sup>3</sup>
	<b>ÁGUA E ESGOTO</b>	143,56	3,68	17,62	17,89	17,95	18,02
<b>Demais Localidades</b>	<b>ESGOTO</b>	62,08	1,60/m <sup>3</sup>	7,62/m <sup>3</sup>	7,74/m <sup>3</sup>	7,76/m <sup>3</sup>	7,79/m <sup>3</sup>
	<b>ÁGUA E ESGOTO</b>	139,68	3,59	17,14	17,41	17,46	17,53

Fonte: Resolução Nº015/2021-AGEPAR

Devido à dificuldade em encontrar dados comparando valores médios do metro quadrado em diferentes regiões do Paraná, seja em artigos ou mídia especializada, foram acessados diferentes sites de venda imobiliária e selecionados com características desejáveis

para a implantação 20 terrenos à venda com área e custo de venda especificados para estipular uma média do valor. A Tabela 6 mostra o tamanho de cada terreno, seu custo total e seu custo por metro quadrado.

Tabela 6 - Preço comparativo do metro quadrado entre Toledo e Curitiba no estado do Paraná

Toledo – PR			Curitiba – PR		
Tamanho (m <sup>2</sup> )	Preço total (R\$)	Preço por m <sup>2</sup> (R\$/m <sup>2</sup> )	Tamanho (m <sup>2</sup> )	Preço total (R\$)	Preço por m <sup>2</sup> (R\$/m <sup>2</sup> )
6525	1.435.500,00	220,00	5938	7.500.000,00	1.263,05
5000	1.500.000,00	300,00	10480	6.000.000,00	572,52
58000	6.380.000,00	110,00	3850	3.850.000,00	1.000,00
18272	4.568.000,00	250,00	2346	3.800.000,0	1.619,78
1358	210.000,00	154,64	1938	3.300.000,00	1.702,79
11562	2.600.000,00	225,00	2000	1.400.000,00	700,00
8780	3.300.000,00	375,85	1186	2.200.000,00	1.854,97
1427	595.000,00	416,96	2148	2.200.000,00	1.024,21
5804	1.335.000,50	230,01	1857	1.980.000,00	1.066,24
6000	1.800.000,00	314,85	1837	1.800.000,00	979,86
5758	1.324.353,80	230,00	1680	1.350.000,00	803,57
5000	1.300.000,00	260,06	14033	17.000.000,0	1.211,43
1427	593.000,00	415,56	10900	8.250.000,00	756,88
3930	1.600.000,00	407,12	4500	4.200.000,00	933,33
1008	250.000,00	248,02	1072	1.200.000,00	1.119,40
1685	960.000,00	569,73	2009	1.580.000,00	786,46
2000	800.000,00	400,00	1075	880.000,00	818,60
1370	890.591,00	650,07	2347	3.800.000,00	1.619,09
5025	1.580.000,00	314,43	3671	3.310.000,00	901,66
1383	435.440,25	314,85	2241	1.792.000,00	799,64
	<b>Média</b>	<b>320,36</b>		<b>Média</b>	<b>1.076,97</b>

Fonte: Dados obtidos em sites de vendas imobiliárias

A partir dos dados imobiliários levantados em ambas as localidades, observa-se que o custo do metro quadrado em Toledo é relativamente menor que o custo em Curitiba. Considerando esta última análise e os custos com eletricidade e água também já avaliados, Toledo recebe a maior nota para o fator analisado (Tabelas 7 e 8).

Em consideração ao fator “Proximidade com o consumidor”, visto que tanto a localização Toledo quanto Curitiba possuem empresas do ramo aquicultura ao redor de modo que a nota para ambos é a mesma.

Tabela 7 - Ponderação qualitativa para a localidade Toledo PR

<b>Local 1 – Toledo PR</b>			
<b>Fator</b>	<b>Peso</b>	<b>Nota</b>	<b>Peso x Nota</b>
Clima	0,30	4,0	1,2
Custo imobiliário e fixo	0,30	4,0	1,2
Proximidade com o consumidor	0,40	4,0	1,6
<b>Total</b>	1,0	-	4,0

Fonte: Autores (2021).

Tabela 8 - Ponderação qualitativa para a localidade Curitiba PR

<b>Local 2 – Curitiba PR</b>			
<b>Fator</b>	<b>Peso</b>	<b>Nota</b>	<b>Peso x Nota</b>
Clima	0,30	3,0	0,9
Custo imobiliário e fixo	0,30	3,0	0,9
Proximidade com o consumidor	0,40	4,0	1,6
<b>Total</b>	1,0	-	3,4

Fonte: Autores (2021).

O resultado da análise realizada mostrou uma pontuação de 4,0 para a localidade Toledo enquanto Curitiba recebe uma pontuação total de 3,4. Dessa forma, a localidade que melhor se adapta e mostra potencial para os fatores desejados é Toledo no Paraná.

## 5. ESTIMATIVA DE DEMANDA DE PRODUTO E VOLUME DE PRODUÇÃO

O ramo da aquicultura, como já descrito, engloba a criação de organismos aquáticos como peixes, moluscos, crustáceos e plantas aquáticas. Sabendo disso, e analisando o mercado de aquicultura no país, a região sul do Brasil tem apresentado a maior parte produtiva, principalmente na piscicultura. Tendo o conhecimento de que os cultivos de larvicultura de peixes utilizam como principal fonte alimentar os zooplânctons e fitoplânctons (microalgas), optou-se por direcionar a empresa ao atendimento da demanda do estado do Paraná.

A piscicultura, segundo o Instituto de Desenvolvimento Rural (2021) do Paraná, consiste basicamente na produção de tilápias, bagres e carpas. Essa atividade é direcionada principalmente nas regiões oeste (municípios de Toledo e Cascavel) e norte (municípios de Apucarana, Cornélio Procópio, Londrina e Santo Antônio da Platina). A produção de peixes de cultivo, segundo o anuário Peixe BR (2021), ficou em 172.000 toneladas, sendo a produção de tilápias, a maior no estado, cerca de 166.000 toneladas, 3.800 toneladas de peixes nativos e 2.200 toneladas de outras espécies.

No Paraná, está sediada a Associação dos Produtores de Aquicultura que conta basicamente com 230 produtores. Esses produtores possuem cerca de 20 a 40 tanques com capacidade para produção de aproximadamente 1,2 milhões de peixes. O tempo necessário para esses cultivos depende da espécie, mas no geral são cultivos que duram cerca de 6 meses até comercialização do peixe adulto (SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO, 2020).

Esses produtores, em sua maioria, adquirem os peixes jovens (alevinos) comercialmente. Na região oeste do Paraná, existe uma grande parte dos produtores de alevinos, alguns deles são a Piscicultura Sgarbi, localizada em Palotina; Piscicultura Daniela, em Francisco Beltrão; Aquários de Alevinos, em Assis Chateaubriand; e em Toledo existem a Piscicultura Schneider, Akna Alevinos, Piscicultura Dal Bosco e Aquicultura Venites.

Com as informações obtidas ao entrar em contato com alguns desses produtores tem-se que o volume médio dos tanques de cultivos de larviculturas são de cerca de 2000 m<sup>3</sup>, no entanto de volume útil são utilizados apenas 2/3 do volume total do tanque, sendo, aproximadamente, 1333 m<sup>3</sup>. Além disso, assumindo-se que esses produtores possuem pelo menos 1 tanque de larvicultura por espécie, estima-se atender cerca de 50% da demanda na região oeste, sendo essa de 40 tanques destinados a larvicultura, correspondendo em volume a 53320 m<sup>3</sup>.

Utilizando a relação de fornecimento de concentrado em águas verdes (tanques de piscicultura), em torno de 30 mL/m<sup>3</sup> (GERALDES, 2007), temos uma demanda de aproximadamente 1600 L/dia de concentrado microalgal, sendo utilizado duas vezes por semana nos tanques.

Para determinar a quantidade de cultivo microalgal de *Chlorella* que corresponde a 1 mL de concentrado de células de  $7,0 \times 10^5$ , utilizou-se a curva de crescimento obtida por Costa (2010), a qual na fase exponencial as células atingiram uma concentração de  $637,5 \times 10^4$  células/mL em 8 dias. Através dessas informações, é possível estimar que para produção de 1 mL de concentrado de *Chlorella* são necessários 9 mL de cultivo da microalga. Sendo assim, é necessário um volume de produção de 28800 L para atender a demanda total da região oeste, considerando 50% do mercado acessível.

Entretanto, é necessário considerar as perdas durante o processo produtivo e o volume útil dos equipamentos, que está em torno de 80% do volume total. Dessa forma, a indústria pretende utilizar biorreatores de 12500 L com volume útil de 10000 L, sendo necessário um total de 3 biorreatores para atender a demanda considerando todas as etapas de possíveis perdas. Dessa forma, a capacidade produtiva da indústria será de 37500 L, e o volume de produção é de 30000 L.



## 6. ATIVIDADES PRINCIPAIS E DE APOIO

No processo de produção da biomassa de *Chlorella vulgaris* a linha principal é constituída de 5 atividades, sendo elas:

- Recebimento de insumos e da cepa inicial da microalga;
- Limpeza de equipamentos;
- Cloração e decloração da água;
- Crescimento da biomassa algal;
- Concentração da biomassa algal;
- Envase do produto concentrado.

A recepção de insumos se trata de um sistema simplificado de entrega por transportadora, uma vez que o meio de cultura escolhido é composto por NPK. Assim como a cepa inicial da microalga *Chlorella vulgaris*, que será recebida na recepção da empresa, onde será realizado o acerto das documentações necessárias e então direcionadas ao descarregamento na rampa ligada ao almoxarifado.

A limpeza de equipamentos será realizada com auxílio de agente detergente, água e estímulo mecânico para melhor remoção das impurezas. O estímulo será realizado com ajuda de lavadora de alta pressão.

A cloração da água será feita após o bombeamento do poço artesiano com intuito de remover microrganismos patogênicos, após esse processo é necessário a etapa de decloração para que as microalgas possam ser cultivadas sem efeitos inibitórios ao seu crescimento.

O crescimento da biomassa será feito em tanques abertos, aerados a partir de um compressor de ar conectado por tubulações ao fundo dos tanques, dentro de estufa, expostos a luz solar, onde recebem a água já filtrada e os nutrientes necessários para o crescimento da biomassa microalgal.

A concentração da biomassa é feita para facilitar o envase e o transporte do produto final. No processo em questão será utilizado a operação unitária de centrifugação para realizar a concentração da biomassa algal. Nesse processo tem-se duas saídas principais, na primeira a biomassa concentrada (concentrado), e na segunda água (permeado) a ser reciclada no processo de cultivo. Por fim ocorre o envase em que a biomassa concentrada é colocada na embalagem final com uma concentração padronizada.

Contudo, para o funcionamento adequado das atividades da linha principal é necessário a construção de estruturas anexas de apoio que funcionarão oferecendo suporte material, energético e técnico para o bom desenvolvimento da produção. As atividades de apoio para a produção de biomassa algal são:

- Administração;
- Áreas destinadas as atividades pessoais dos funcionários;
- Almojarifado;
- Laboratório;
- Depósito.

Para a administração será necessário um escritório que contará ainda com salas para RH e a recepção, setor responsável pelo recebimento de materiais e despacho de produtos, além de receber pedido dos clientes, realizar o controle de demanda, contato com os fornecedores, pagamentos, contratações, demissões e demais tramites administrativos. Também será necessário a existência de áreas destinadas as atividades pessoais dos funcionários, como os banheiros, os vestiários e o refeitório.

O almoxarifado é o setor onde ficarão armazenados os insumos para a produção da biomassa, além do material utilizado para higienização da fábrica e dos equipamentos, enfatizando as devidas separações para cada utilização em armários específicos.

O laboratório é necessário para realizar os testes do controle de qualidade da cepa microalgal recebida e do inóculo, dos insumos, do produto, amostragens ao longo do processo, análises de água antes de iniciar a produção da biomassa, além de pesquisas para desenvolvimento de novos produtos.

Além disso, a indústria contará com uma sala climatizada que funcionará como um depósito para o produto final (biomassa concentrada), no qual os frascos de concentrado de *Chlorella vulgaris* estarão armazenados até o transporte aos piscicultores.

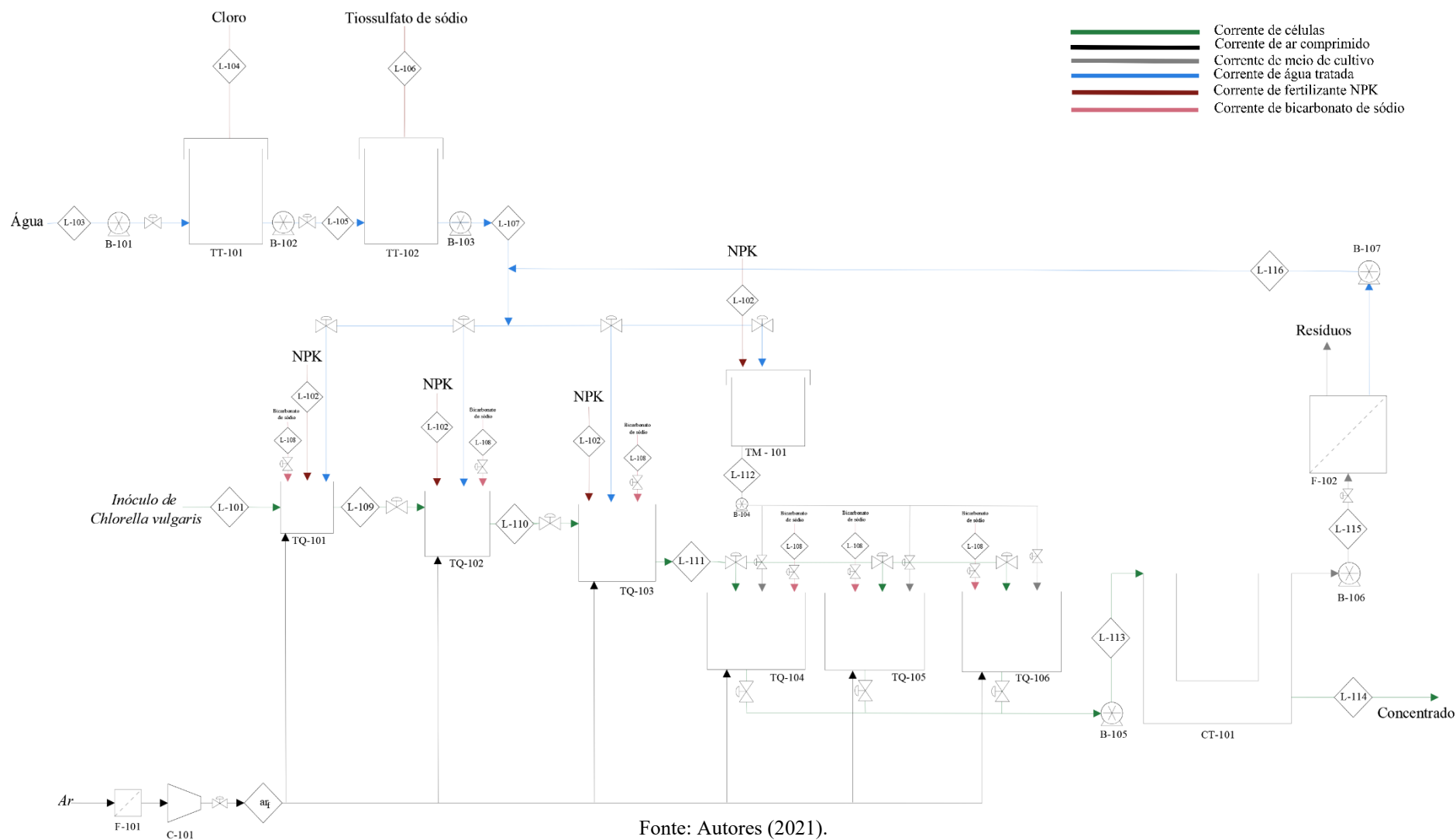
## 7. ENGENHARIA DE PROCESSO

Nesse tópico será aprofundado o processo de obtenção da biomassa microalgal, desde o detalhamento do processo até os cálculos realizados.

### 7.1 FLUXOGRAMA DO PROCESSO

A Figura 6 apresenta o fluxograma de processo proposto para a produção de biomassa microalgal de *Chlorella vulgaris*. O fluxograma foi criado com o *software* livre Dia Gnome.

Figura 6 - Fluxograma de processo de produção de biomassa microalgal de *Chlorella vulgaris* a partir de meio suplementado com NPK



### 7.1.1 Nomenclaturas e Abreviaturas dos Equipamentos e Etapas do Fluxograma de Processo

A Tabela 9 apresenta as nomenclaturas das correntes principais e de utilidades presentes no processo, e a Tabela 10 descreve as abreviaturas utilizadas nas etapas do processo.

Tabela 9 - Nomenclatura das correntes principais e de utilidades presentes no processo

<b>Correntes Principais</b>	
<b>Nomenclatura</b>	<b>Definição</b>
L-101	Corrente do inóculo de <i>Chlorella vulgaris</i>
L-102	Corrente de fertilizante NPK recepcionado
L-103	Corrente de água
L-104	Corrente de cloro
L-105	Corrente de água clorada
L-106	Corrente de tiosulfato de sódio
L-107	Corrente de água tratada
L-108	Corrente de bicarbonato de sódio
L-109	Corrente referente ao repique celular (10% do cultivo) do tanque de 37,5 L para o de 375 L
L-110	Corrente referente ao repique celular (10% do cultivo) do tanque de 375 L para o de 3750 L
L-111	Corrente referente ao repique celular (10% do cultivo) do tanque de 3750 L para os tanques de 12500 L
L-112	Corrente da mistura de fertilizante NPK com água tratada para os cultivos
L-113	Corrente de biomassa microalgal após os cultivos
L-114	Corrente de concentrado de <i>Chlorella vulgaris</i>
L-115	Corrente de água com células restantes após a centrifugação
L-116	Corrente de água filtrada para os cultivos
<b>Correntes de Utilidades</b>	
arf	Corrente de ar comprimido filtrado

Fonte: Autores (2021).

Tabela 10 - Abreviaturas utilizadas no fluxograma de processo

<b>Abreviatura</b>	<b>Equipamento</b>
B	Bomba
C	Compressor
CT	Centrífuga
F	Filtro
L	Linha
TM	Tanque de mistura
TQ	Tanque de cultivo
TT	Tanque de tratamento

Fonte: Autores (2021).

A Tabela 11 apresenta o volume nominal e o volume útil dos tanques de cultivos utilizados no processo, levando em consideração o fato de se tratar de um cultivo aquoso e da aeração necessária para o mesmo, o volume útil dos tanques correspondem a cerca de 80% do volume nominal.

Tabela 11 - Volume dos tanques utilizados no fluxograma de processo

<b>Tanques (TQ)</b>	<b>Volume nominal (L)</b>	<b>Volume útil (L)</b>
101	37,5	30
102	375	300
103	3750	3000
104	12500	10000
105	12500	10000
106	12500	10000

Fonte: Autores (2021).

## 7.2 DESCRIÇÃO DAS ETAPAS DO FLUXOGRAMA DE PROCESSO

### 7.2.1 Tanques de Cultivos

A cepa de *Chlorella vulgaris* recebida na indústria passa por repiques laboratoriais a fim de garantir a integridade da microalga no processo produtivo e evitar contaminações. Essa cepa inicial é inoculada em frascos Erlenmeyer, a fim de ativar o crescimento das células e então realizado a propagação celular, aumentando o volume de cultivo até que esse atinja o volume necessário para o inóculo no tanque de cultivo TQ-101.

O tanque de cultivo (TQ-101) consiste em um tanque aberto que tem a função de receber o inóculo de *Chlorella vulgaris* e propagá-lo em um volume útil de 30 L. O inóculo é conduzido para o tanque, corrente L-101. Além disso, o tanque recebe a corrente de suplementação com NPK (L-102), a corrente de água tratada (L-107), através da distribuição da bomba B-103, e a corrente de ar comprimido filtrado ( $ac_f$ ) utilizado para aerar o meio. Ao atingir a fase exponencial do cultivo, o mesmo é transferido em sua totalidade para o tanque de 375 L (TQ-102) através da corrente L-109.

O TQ-102 propaga o cultivo anterior em um volume de 300 L pela corrente de L-109. Assim como o primeiro tanque, esse recebe a corrente de suplementação com NPK (L-102), a corrente de água tratada (L-107), através da distribuição da bomba B-103, e a corrente de ar comprimido filtrado ( $ac_f$ ). Novamente com a etapa de desenvolvimento celular, o cultivo é transferido para o tanque de 3750 L (TQ-103) através da corrente L-110.

A mesma sequência de etapas é realizada para o TQ-103, propagando as células de *Chlorella vulgaris* em um volume de 3.000 L. Esse tanque também recebe a corrente de suplementação com NPK (L-102), a corrente de água tratada (L-107) e a corrente de ar comprimido filtrado ( $ac_f$ ). Após o tempo de crescimento celular, o cultivo é transferido igualmente para cada tanque de 12.500 L (TQ-104, TQ-105 e TQ-106) através da corrente L-111.

A suplementação com NPK para os três primeiros tanques será realizada manualmente, uma vez que as quantidades em massa para cada um desses tanques são diferentes e baixas.

Os TQ-104, TQ-105 e TQ-106 recebem como inóculo o volume de cultivo anterior divididos igualmente em volume, a corrente da mistura de fertilizante NPK com água tratada (L-112) e a corrente de ar comprimido filtrado ( $ac_f$ ).

Esses tanques possuem um controle de pH na faixa de 7,0 a 8,0 com adição de bicarbonato de sódio, para aumentar o pH do meio, e injeção de CO<sub>2</sub>, para redução do mesmo. Após o período de cultivo celular, o conteúdo dos tanques passa pela centrífuga através da bomba B-104 e pela corrente L-113, na qual parte da água é removida e a massa celular concentrada.

## 7.2.2 Tanque de Mistura (TM-101)

O tanque de mistura (TM-101) recebe a corrente de suplementação com NPK (L-102) e a corrente de água tratada (L-107), através da distribuição da bomba B-103. Esses são

misturados mecanicamente e então distribuídos para os tanques de cultivo de 12500 L através da corrente L-112.

#### 7.2.4 Centrifugação (CT-101)

A etapa de centrifugação é empregada para realizar a concentração de células presentes no cultivo, essa biomassa é transferida pela corrente L-113. Nesse equipamento, formam-se duas correntes distintas: a corrente L-114, que contém os materiais sólidos (biomassa de *Chlorella vulgaris*), e a corrente L-115, que consiste na fração de permeado líquido (basicamente formada por água, nutrientes e resquícios de células não retidas), esta é bombeada através da B-106 para um filtro rotativo à vácuo.

#### 7.2.6 Filtro rotativo a vácuo (F-102)

A filtração nessa etapa é empregada para a remoção de resíduos (células e nutrientes) da água restante na corrente L-115 a ser reutilizada no cultivo (reciclo). A partir dessa etapa a água filtrada é direcionada novamente para os cultivos de biomassa (L-116). Essa separação é realizada por bombeamento (B-107).

#### 7.2.7 Filtro de ar (F-101) e compressor (C-101)

No tratamento do ar inserido ao processo é utilizado a filtração para a remoção de impurezas no ar. Para isso a corrente de ar passa pelo filtro e em seguida é distribuído pelo compressor a todas as etapas do processo industrial (corrente ar<sub>f</sub>).

#### 7.2.8 Tanque de tratamento (TT-101 e TT-102)

O tanque de tratamento de cloração (TT-101) recebe a água através da corrente L-103 e pela bomba B-101. Além disso, recebe a solução de cloro pela corrente L-104, com a finalidade de remover qualquer impureza da mesma. Ao finalizar a etapa de cloração a água passa pelo segundo tanque de tratamento TT-102 (decloração), com auxílio da bomba B-102 e da corrente L-105, nessa etapa o tanque recebe a corrente de tiosulfato de sódio (L-106), a qual é empregada para remoção do cloro que pode interferir durante o processo de cultivo.



### 7.3 BALANÇOS DE MASSA

O balanço de massa segue o princípio da conservação de massa, definido pela Equação 1:

$$[\text{Entrada de massa}] - [\text{Saída de massa}] + [\text{Geração}] - [\text{Consumo}] = [\text{Acúmulo}] \quad (\text{Equação 1})$$

Em cultivos onde há crescimento celular, como é o caso das microalgas, deve ser levado em conta a geração de massa (células) e massa consumida (nutrientes).

Desta forma, é necessário o emprego de balanços de massa global (BMG) assim como balanços por componente (BMC) para cada uma das espécies envolvidas no processo, conforme apresentado nas Equações 2 e 3, respectivamente.

BMG:

$$\frac{dm}{dt} = \sum_{j=1}^n \dot{m}_{e,j} - \sum_{j=1}^m \dot{m}_{s,j} \quad (\text{Equação 2})$$

BMC:

$$\frac{dm_i}{dt} = \sum_{i=1}^k \dot{m}_{e,j} - \sum_{i=1}^p \dot{m}_{s,j} \pm \hat{r}_{G/C,i} \quad (\text{Equação 3})$$

Em que:

$dm/dt$  = termo representativo da variação de massa no interior do reator (acúmulo);

$n$  e  $k$  = número de correntes adentrando o sistema;

$m$  e  $p$  = número de correntes saindo do sistema;

$\dot{m}_{e,j}^l$  = vazão mássica da corrente  $j$  que entra no sistema;

$\dot{m}_{s,j}^l$  = vazão mássica da corrente  $j$  que sai do sistema;

$dm_i/dt$  = termo representativo da variação de massa do componente  $i$  no interior do reator;

$r_{G,i}$  = termo representativo da geração de massa do componente  $i$  no sistema;

$r_{C,i}$  = termo representativo do consumo de massa do componente  $i$  no sistema.

Considerando um processo operando em sistema batelada (sistema fechado), no qual não há acúmulo de massa total do sistema, em termos globais a massa adicionada ao sistema é igual a massa retirada. Dessa forma o balanço de massa global simplifica-se à Equação 4.

$$\sum_{j=1}^n m_{e,j} = \sum_{j=1}^m m_{s,j} \quad (\text{Equação 4})$$

Os balanços de massa levam em consideração as seguintes entradas e saídas:

Entradas:

- Água tratada;
- Cultivo dos tanques anteriores;
- Nutrientes.

Saídas:

- Água;
- Microalgas em suspensão;
- Água na forma de vapor.

A determinação do quanto se perde de água em cada tanque foi obtida a partir da taxa de evaporação. Essa taxa é um fator determinado a partir de diversos outros fatores, como temperatura, velocidade do vento, umidade, etc. O Anexo E mostra a taxa de evaporação anual no Paraná em milímetros (mm) (NITSCHE *et al.*, 2019).

Os balanços de massa foram realizados levando em conta algumas considerações abaixo listadas:

- Cultivo em batelada exceto nos tanques TQ-104, 105 e 106, os quais operam como uma batelada alimentada;
- Cada batelada terá 8 dias de duração;
- Todos os compostos adicionados pelo NPK são consumidos durante os 8 dias de batelada;
- Produtividade celular de microalga no valor de 0,08 g L<sup>-1</sup> dia<sup>-1</sup> (MATA, 2010);
- A suplementação de CO<sub>2</sub> será considerado em abundância, uma vez que a fonte de dióxido de carbono é o ar atmosférico devido ao cultivo ser realizado em tanque aberto. Visto a abundância, o mesmo não será considerado no balanço de massa.

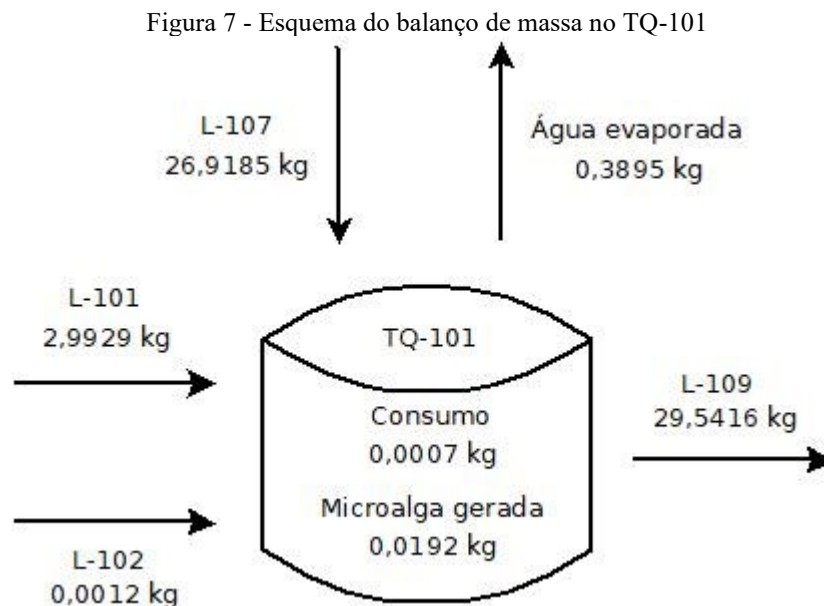
Cultivos do tipo batelada alimentada possuem como característica a remoção periódica de cultura do reator e adição de meio de cultura novo (LEE *et al.*, 2013). Desse modo,

considerando que os tanques finais operam no formato mencionado, seu cultivo é classificado como batelada alimentada.

De acordo com AMMAR (2016), utilizando a concentração de 40 mg/L de NPK o crescimento celular passa da fase estacionária para o declínio, ou seja, morte celular a partir do oitavo dia de cultivo. Dessa forma, uma vez que será utilizado essa concentração de NPK nos meios cultivo, assim que o cultivo entrar no seu oitavo dia, será dado início ao processo de remoção de parte do cultivo e adição de mais nutrientes, se tornando assim, uma batelada alimentada.

### 7.3.1 Tanque de Cultivo TQ-101

No tanque de cultivo TQ-101 há três correntes de entrada, corrente L-101 (Inóculo) corrente L-102 (NPK) e corrente L-107 (Água tratada). Desse tanque sai a corrente L-109 para o tanque seguinte. A Figura 7 mostra as correntes de entrada e saída no tanque TQ-101 enquanto a Tabela 12 apresenta a quantidade de massa adentrando e saindo do tanque para cada componente.



Fonte: Autores (2021).

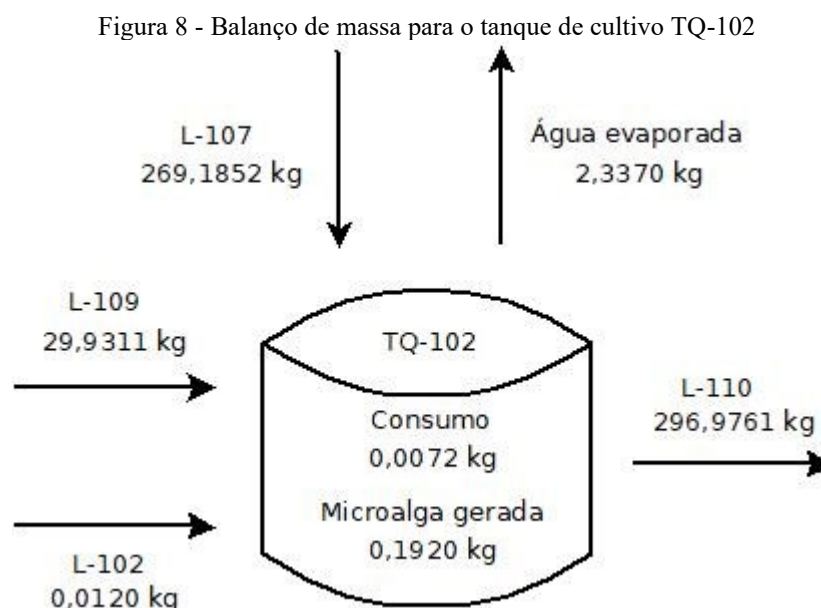
Tabela 12 - Balanço de massa para o tanque de cultivo TQ-101

<b>Componentes</b>	<b>Entrada (kg)</b>	<b>Geração (kg)</b>	<b>Consumo (kg)</b>	<b>Saída (kg)</b>
Microalga	0,0019	0,0192	---	0,0211
Ureia	$2,520 \times 10^{-5}$	---	$2,520 \times 10^{-5}$	---
Amônia	$2,148 \times 10^{-4}$	---	$2,148 \times 10^{-4}$	---
Óxido de Fosforo	$2,400 \times 10^{-4}$	---	$2,400 \times 10^{-4}$	---
Óxido de Potássio	$2,400 \times 10^{-4}$	---	$2,400 \times 10^{-4}$	---
Magnésio	$1,200 \times 10^{-6}$	---	$1,200 \times 10^{-6}$	---
Zinco	$6,000 \times 10^{-7}$	---	$6,000 \times 10^{-7}$	---
Manganês	$6,000 \times 10^{-7}$	---	$6,000 \times 10^{-7}$	---
Ferro	$1,200 \times 10^{-6}$	---	$1,200 \times 10^{-6}$	---
Cobre	$6,000 \times 10^{-7}$	---	$6,000 \times 10^{-7}$	---
Boro	$2,400 \times 10^{-7}$	---	$2,400 \times 10^{-7}$	---
Vitamina B	$6,000 \times 10^{-9}$	---	$6,000 \times 10^{-9}$	---
Água (NPK)	$4,756 \times 10^{-4}$	---	---	$4,756 \times 10^{-4}$
Água do cultivo anterior	2,9910	---	---	2,9910
Água tratada	26,9185	---	---	26,5290
Água evaporada	---	---	---	0,3895
<b>Total</b>	<b>29,9126</b>	<b>0,0192</b>	<b>0,0007</b>	<b>29,9311</b>

Fonte: Autores (2021).

### 7.3.2 Tanque de Cultivo TQ-102

Ao todo três correntes entram no tanque TQ-102, corrente L-109 (cultivo anterior), L-102 (NPK) e a corrente L-107 (Água tratada) e uma corrente sai, L-110. As correntes que adentram e saem do tanque são visualizadas na Figura 8 e a Tabela 13 mostra a quantidade de cada componente entrando e saindo do tanque.



Fonte: Autores (2021).

Tabela 13 - Balanço de massa para o tanque de cultivo TQ-102

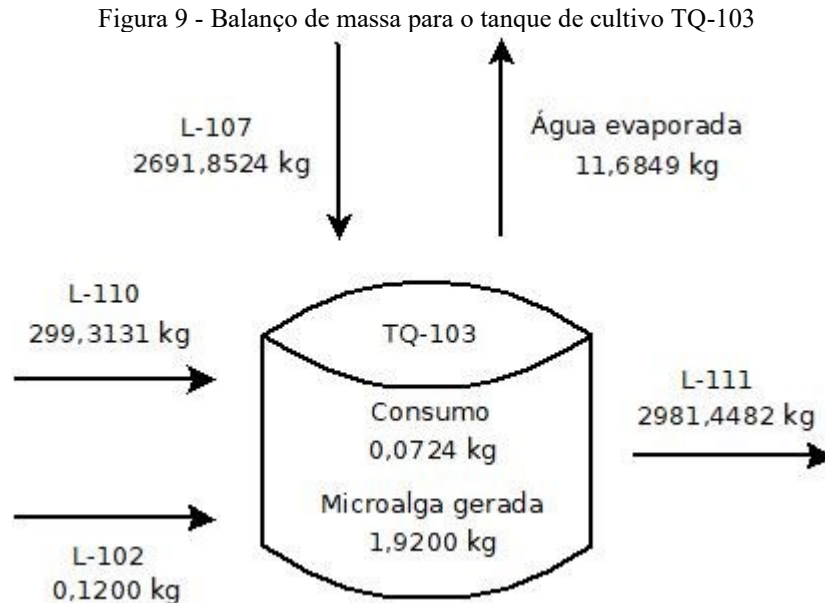
Componentes	Entrada (kg)	Geração (kg)	Consumo (kg)	Saída (kg)
Microalga	0,0211	0,1920	---	0,2131
Ureia	$2,52 \times 10^{-4}$	---	$2,52 \times 10^{-4}$	---
Amônia	$2,15 \times 10^{-3}$	---	$2,15 \times 10^{-3}$	---
Óxido de Fosforo	$2,40 \times 10^{-3}$	---	$2,40 \times 10^{-3}$	---
Óxido de Potássio	$2,40 \times 10^{-3}$	---	$2,40 \times 10^{-3}$	---
Magnésio	$1,20 \times 10^{-3}$	---	$1,20 \times 10^{-3}$	---
Zinco	$6,00 \times 10^{-6}$	---	$6,00 \times 10^{-6}$	---
Manganês	$6,00 \times 10^{-6}$	---	$6,00 \times 10^{-6}$	---
Ferro	$1,20 \times 10^{-5}$	---	$1,20 \times 10^{-5}$	---
Cobre	$6,00 \times 10^{-6}$	---	$6,00 \times 10^{-6}$	---
Boro	$2,40 \times 10^{-6}$	---	$2,40 \times 10^{-6}$	---
Vitamina B	$6,00 \times 10^{-8}$	---	$6,00 \times 10^{-8}$	---
Água (NPK)	$4,756 \times 10^{-3}$	---	---	$4,756 \times 10^{-3}$
Água do cultivo anterior	29,9100	---	---	29,9100
Água tratada	269,1852	---	---	266,8483
Água evaporada	---	---	---	2,3370
<b>Total</b>	<b>299,1283</b>	<b>0,1920</b>	<b>0,0072</b>	<b>299,3131</b>

Fonte: Autores (2021).

### 7.3.3 Tanque de Cultivo TQ-103

O tanque de cultivo TQ-103 recebe as massas das correntes L-110 (cultivo anterior), L-102 (NPK) e L-107 (Água tratada). A saída do tanque é a corrente L-111 (cultivo). Como está

sendo considerado regime permanente, toda a massa entrando no tanque estará saindo na mesma quantidade. A Figura 9 mostra as correntes de entrada e saída e a Tabela 14 mostra a quantidade específica para cada componente.



Fonte: Autores (2021).

Tabela 14 - Balanço de massa para o tanque de cultivo TQ-103

Componentes	Entrada (kg)	Geração (kg)	Consumo (kg)	Saída (kg)
Microalga	0,2131	1,9200	---	2,1331
Ureia	$2,520 \times 10^{-3}$	---	$2,52 \times 10^{-3}$	---
Amônia	$2,148 \times 10^{-2}$	---	$2,15 \times 10^{-2}$	---
Óxido de Fosforo	$2,400 \times 10^{-2}$	---	$2,40 \times 10^{-2}$	---
Óxido de Potássio	$2,400 \times 10^{-2}$	---	$2,40 \times 10^{-2}$	---
Magnésio	$1,200 \times 10^{-4}$	---	$1,20 \times 10^{-4}$	---
Zinco	$6,000 \times 10^{-5}$	---	$6,00 \times 10^{-5}$	---
Manganês	$6,000 \times 10^{-5}$	---	$6,00 \times 10^{-5}$	---
Ferro	$1,200 \times 10^{-4}$	---	$1,20 \times 10^{-4}$	---
Cobre	$6,000 \times 10^{-5}$	---	$6,00 \times 10^{-5}$	---
Boro	$2,400 \times 10^{-5}$	---	$2,40 \times 10^{-5}$	---
Vitamina B	$6,000 \times 10^{-7}$	---	$6,00 \times 10^{-7}$	---
Água (NPK)	$4,756 \times 10^{-2}$	---	---	$4,756 \times 10^{-2}$
Água do cultivo anterior	299,1000	---	---	299,1000
Água tratada	2691,8524	---	---	2680,1676
Água evaporada	---	---	---	11,6849
<b>Total</b>	<b>2991,2855</b>	<b>1,9200</b>	<b>0,0724</b>	<b>2993,1331</b>

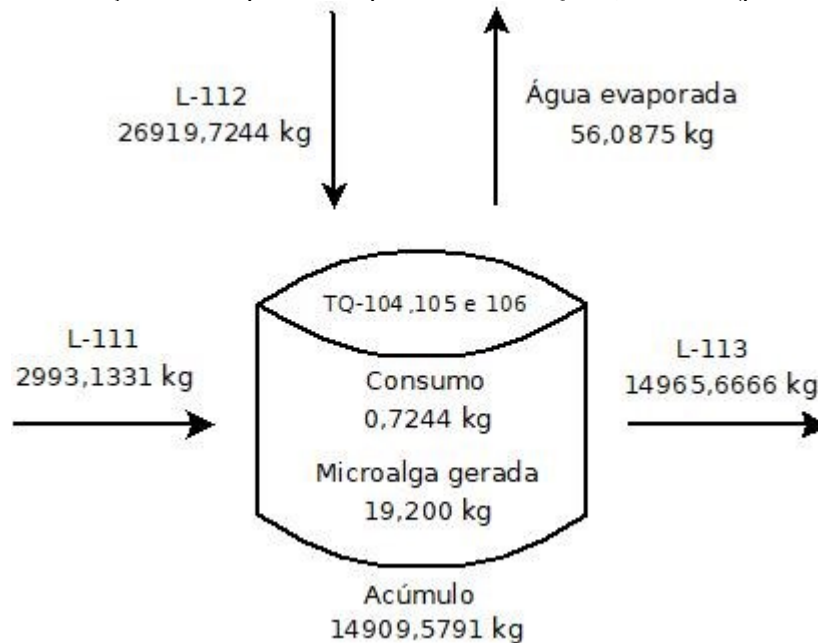
Fonte: Autores (2021).

### 7.3.4 Tanque de Cultivo TQ-104, 105 e 106

Os dados apresentados foram estipulados para os três tanques totalizando o volume de 30000 L de cultivo desejado. As quantidades necessárias para cada tanque individualmente podem ser obtidas considerando um terço da quantidade utilizada para os três tanques. Para cada alimentação da batelada a quantidade de NPK é dobrada, ou seja, a cada oito dias, os novos nutrientes entram no tanque em concentração duas vezes maior que a anterior. Ao todo serão realizados quatro cultivos, totalizando 32 dias de cultivo.

Em ambos os tanques TQ-104, 105 e 106 entram as correntes L-111 (cultivo anterior) e L-112 (NPK) e sai a corrente L-113, direcionada para a centrífuga CT-101. A Figura 10, 11, 12 e 13 mostram as vazões de entrada e saída do tanque e a Tabela 15, 16, 17 e 18 mostram a quantidade específica de cada componente.

Figura 10 - Balanço de massa para os tanques de cultivo TQ-104,105 e 106 (primeiro cultivo)



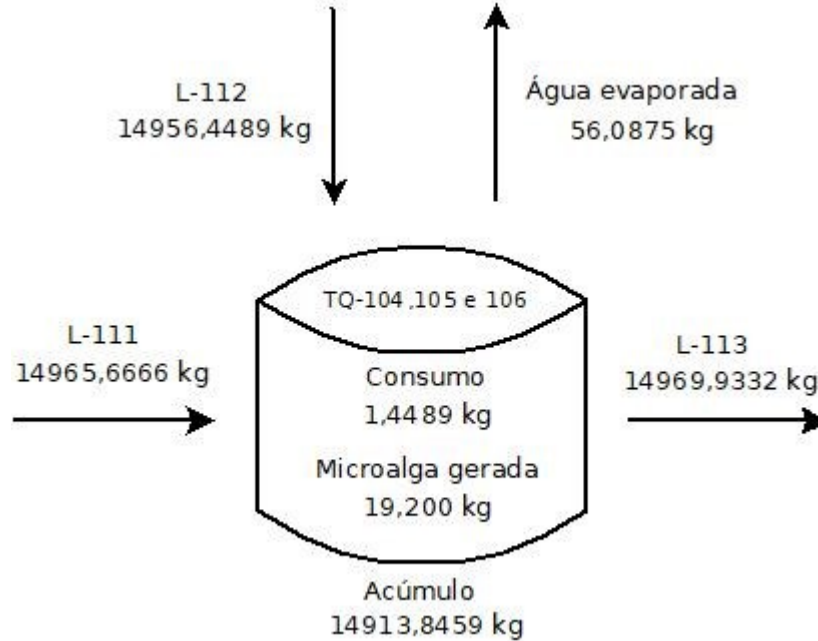
Fonte: Autores (2021).

Tabela 15 - Balanço de massa para o primeiro cultivo nos tanques TQ-104,105 e 106

Componentes	Entrada (kg)	Geração (kg)	Consumo (kg)	Saída (kg)	Acúmulo (kg)
Microalga	2,1331	19,2000	---	10,6666	10,6666
Ureia	$2,520 \times 10^{-2}$	---	$2,52 \times 10^{-2}$	---	---
Amônia	$2,148 \times 10^{-1}$	---	$2,15 \times 10^{-1}$	---	---
Óxido de Fosforo	$2,400 \times 10^{-1}$	---	$2,40 \times 10^{-1}$	---	---
Óxido de Potássio	$2,400 \times 10^{-1}$	---	$2,40 \times 10^{-1}$	---	---
Magnésio	$1,200 \times 10^{-3}$	---	$1,20 \times 10^{-3}$	---	---
Zinco	$6,000 \times 10^{-4}$	---	$6,00 \times 10^{-4}$	---	---
Manganês	$6,000 \times 10^{-4}$	---	$6,00 \times 10^{-4}$	---	---
Ferro	$1,200 \times 10^{-3}$	---	$1,20 \times 10^{-3}$	---	---
Cobre	$6,000 \times 10^{-4}$	---	$6,00 \times 10^{-4}$	---	---
Boro	$2,400 \times 10^{-4}$	---	$2,40 \times 10^{-4}$	---	---
Vitamina B	$6,000 \times 10^{-6}$	---	$6,00 \times 10^{-6}$	---	---
Água (NPK)	$4,756 \times 10^{-1}$	---	---	$2,378 \times 10^{-1}$	$2,378 \times 10^{-1}$
Água do cultivo anterior	2.991,0000	---	---	1.495,5000	1.495,5000
Água tratada	26.918,5244	---	---	13.459,2622	13.403,2246
Água evaporada	---	---	---	56,0875	---
<b>Total</b>	<b>29.912,8575</b>	<b>19,2000</b>	<b>0,7244</b>	<b>15.021,7541</b>	<b>14.909,5791</b>

Fonte: Autores (2021).

Figura 11 - Balanço de massa para os tanques de cultivo TQ-104,105 e 106 (segundo cultivo)



Fonte: Autores (2021)

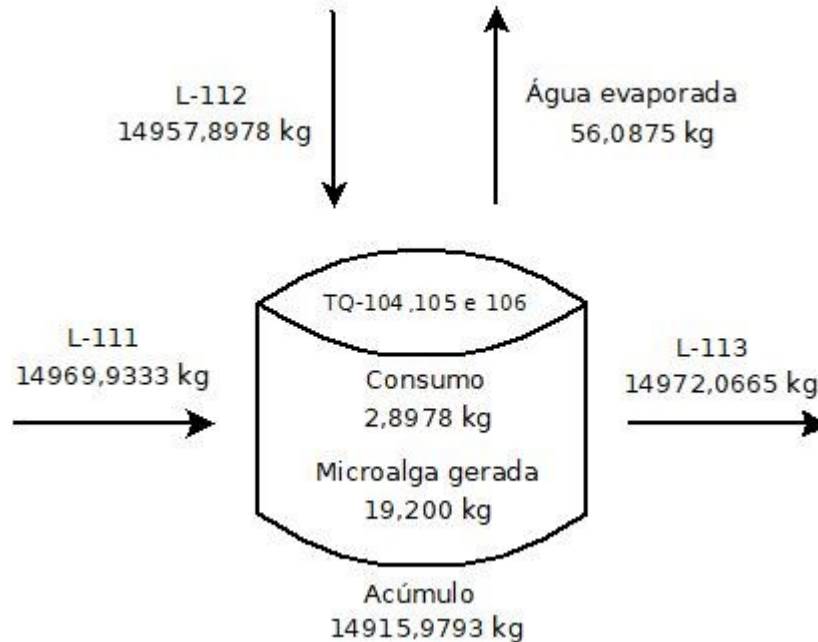


Tabela 16 - Balanço de massa para o secundo cultivo nos tanques TQ-104,105 e 106

Componentes	Entrada (kg)	Geração (kg)	Consumo (kg)	Saída (kg)	Acúmulo (kg)
Microalga	10,6666	19,2000	---	14,9333	14,9333
Ureia	$5,040 \times 10^{-2}$	---	$5,040 \times 10^{-2}$	---	---
Amônia	$4,296 \times 10^{-1}$	---	$4,296 \times 10^{-1}$	---	---
Óxido de Fosforo	$4,800 \times 10^{-1}$	---	$4,800 \times 10^{-1}$	---	---
Óxido de Potássio	$4,800 \times 10^{-1}$	---	$4,800 \times 10^{-1}$	---	---
Magnésio	$2,400 \times 10^{-3}$	---	$2,400 \times 10^{-3}$	---	---
Zinco	$1,200 \times 10^{-3}$	---	$1,200 \times 10^{-3}$	---	---
Manganês	$1,200 \times 10^{-3}$	---	$1,200 \times 10^{-3}$	---	---
Ferro	$2,400 \times 10^{-3}$	---	$2,400 \times 10^{-3}$	---	---
Cobre	$1,200 \times 10^{-3}$	---	$1,200 \times 10^{-3}$	---	---
Boro	$4,800 \times 10^{-4}$	---	$4,800 \times 10^{-4}$	---	---
Vitamina B	$1,200 \times 10^{-5}$	---	$1,200 \times 10^{-5}$	---	---
Água (NPK)	$9,511 \times 10^{-1}$	---	---	$4,755 \times 10^{-1}$	$4,755 \times 10^{-1}$
Água do cultivo anterior	14.955,0000	---	---	7.477,5000	7.477,5000
Água tratada	14.954,0489	---	---	7.477,0244	7.420,9369
Água evaporada	---	---	---	56,0875	---
<b>Total</b>	<b>29.922,1155</b>	<b>19,2000</b>	<b>1,4489</b>	<b>15.026,0207</b>	<b>14.913,8459</b>

Fonte: Autores (2021).

Figura 12 - Balanço de massa para os tanques de cultivo TQ-104,105 e 106 (terceiro cultivo)



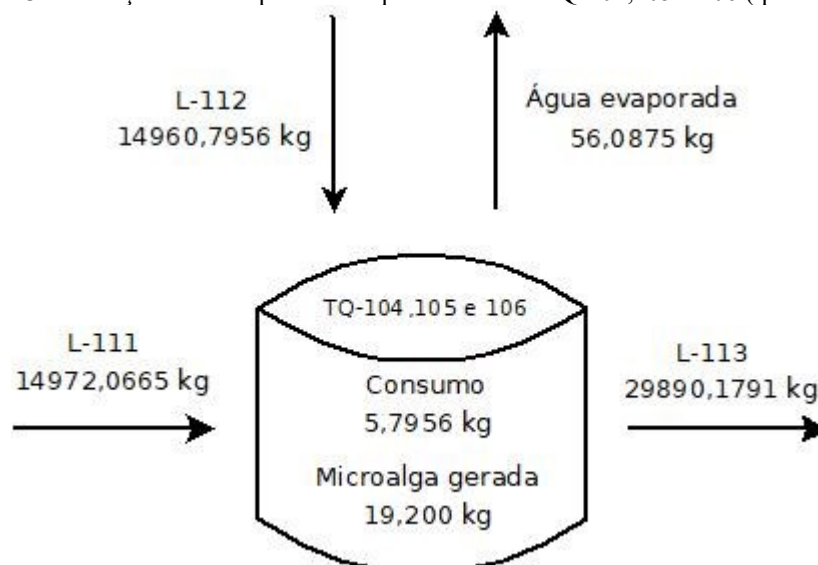
Fonte: Autores (2021)

Tabela 17 - Balanço de massa para o terceiro cultivo nos tanques TQ-104,105 e 106

Componentes	Entrada (kg)	Geração (kg)	Consumo (kg)	Saída (kg)	Acúmulo (kg)
Microalga	14,9333	19,2000	---	17,0666	17,0666
Ureia	$1,008 \times 10^{-1}$	---	$1,008 \times 10^{-1}$	---	---
Amônia	$8,592 \times 10^{-1}$	---	$8,592 \times 10^{-1}$	---	---
Óxido de Fosforo	$9,600 \times 10^{-1}$	---	$9,600 \times 10^{-1}$	---	---
Óxido de Potássio	$9,600 \times 10^{-1}$	---	$9,600 \times 10^{-1}$	---	---
Magnésio	$4,800 \times 10^{-3}$	---	$4,800 \times 10^{-3}$	---	---
Zinco	$2,400 \times 10^{-3}$	---	$2,400 \times 10^{-3}$	---	---
Manganês	$2,400 \times 10^{-3}$	---	$2,400 \times 10^{-3}$	---	---
Ferro	$4,800 \times 10^{-3}$	---	$4,800 \times 10^{-3}$	---	---
Cobre	$2,400 \times 10^{-3}$	---	$2,400 \times 10^{-3}$	---	---
Boro	$9,600 \times 10^{-4}$	---	$9,600 \times 10^{-4}$	---	---
Vitamina B	$2,400 \times 10^{-5}$	---	$2,400 \times 10^{-5}$	---	---
Água (NPK)	1,9020	---	---	0,9510	0,9510
Água do cultivo anterior	14.955,0000	---	---	7.477,5000	7.477,5000
Água tratada	14.953,0978	---	---	7.476,5489	7.420,4614
Água evaporada	---	---	---	56,0875	---
<b>Total</b>	<b>29.927,8311</b>	<b>19,2000</b>	<b>2,8978</b>	<b>15.028,1540</b>	<b>14.915,9793</b>

Fonte: Autores (2021).

Figura 13 - Balanço de massa para os tanques de cultivo TQ-104,105 e 106 (quarto cultivo)



Fonte: Autores (2021).

Tabela 18 - Balanço de massa para o quarto cultivo nos tanques TQ-104,105 e 106

<b>Componentes</b>	<b>Entrada (kg)</b>	<b>Geração (kg)</b>	<b>Consumo (kg)</b>	<b>Saída (kg)</b>
Microalga	17,0666	19,2000	---	36,2666
Ureia	$2,016 \times 10^{-1}$	---	$2,016 \times 10^{-1}$	---
Amônia	1,718	---	1,718	---
Óxido de Fosforo	1,920	---	1,920	---
Óxido de Potássio	1,920	---	1,920	---
Magnésio	$9,600 \times 10^{-3}$	---	$9,600 \times 10^{-3}$	---
Zinco	$4,800 \times 10^{-3}$	---	$4,800 \times 10^{-3}$	---
Manganês	$4,800 \times 10^{-5}$	---	$4,800 \times 10^{-5}$	---
Ferro	$9,600 \times 10^{-3}$	---	$9,600 \times 10^{-3}$	---
Cobre	$4,800 \times 10^{-3}$	---	$4,800 \times 10^{-3}$	---
Boro	$1,920 \times 10^{-3}$	---	$1,920 \times 10^{-3}$	---
Vitamina B	$4,800 \times 10^{-5}$	---	$4,800 \times 10^{-5}$	---
Água (NPK)	3,8040	---	---	3,8040
Água do cultivo anterior	14.955,0000	---	---	14.955,0000
Água tratada	14.951,1956	---	---	14.895,1081
Água evaporada	---	---	---	56,0875
<b>Total</b>	<b>29.932,8622</b>	<b>19,2000</b>	<b>5,7956</b>	<b>29.946,2666</b>

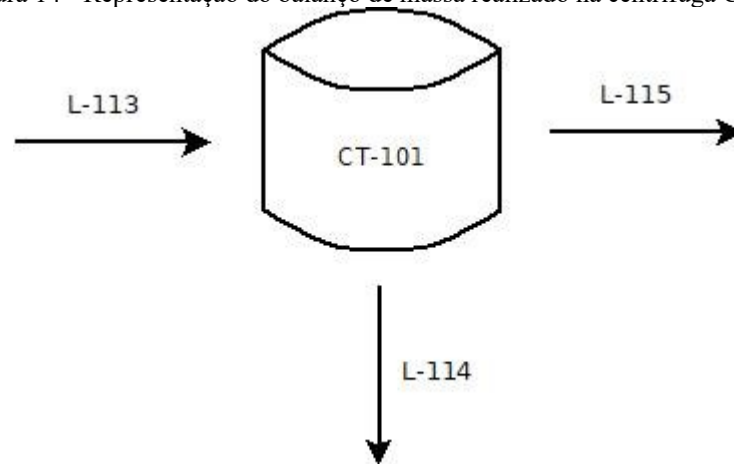
Fonte: Autores (2021).

Ao chegar no quarto cultivo dos tanques finais, todo conteúdo será destinado a centrifugação e filtração, de modo que nesse cultivo não haverá acúmulo.

### 7.3.5 Centrífuga CT-101

A cada oito dias, 50% do cultivo dos tanques TQ-104, 105 e 106 são enviados para a centrífuga a fim de separar a biomassa de microalga do meio de cultivo. Na centrífuga entra a corrente L-113 e saem as correntes L-114 e L-115. Na centrífuga retira-se água da corrente L-113 com o objetivo de concentrar o cultivo de microalga que sai na corrente L-114. A água retirada corresponde à corrente L-115. Essa corrente vai até o filtro F-102 para remover quaisquer células de microalga restante. A Figura 14 mostra as correntes de entrada e saída da centrífuga e as Tabelas 19, 20, 21 e 22 mostram as quantidades específicas de cada espécie para a coleta de cada uma das etapas do cultivo.

Figura 14 - Representação do balanço de massa realizado na centrífuga CT-101



Fonte: Autores (2021).

Tabela 19 - Balanço de massa para a centrifugação do primeiro cultivo dos tanques TQ-104, 105 e 106

<b>Componentes</b>	<b>Corrente</b>	<b>Entrada (kg)</b>	<b>Saída (kg)</b>
Concentrado de microalga (0,071% m/v)	L-113	14.965,6666	---
Água residual	L-115	---	9.592,8501
Concentrado de microalga (0,200% m/v)	L-114	---	5.372,8165
<b>Total</b>		14.965,6666	14.695,6666

Fonte: Autores (2021).

Tabela 20 - Balanço de massa para a centrifugação do segundo cultivo dos tanques TQ-104, 105 e 106

<b>Componentes</b>	<b>Corrente</b>	<b>Entrada (kg)</b>	<b>Saída (kg)</b>
Concentrado de microalga (0,100% m/v)	L-113	14.969,9333	---
Água residual	L-115	---	7.465,8925
Concentrado de microalga (0,200% m/v)	L-114	---	7.504,0408
<b>Total</b>		14.969,9333	14.699,9333

Fonte: Autores (2021).

Tabela 21 - Balanço de massa para a centrifugação do terceiro cultivo dos tanques TQ-104, 105 e 106

<b>Componentes</b>	<b>Corrente</b>	<b>Entrada (kg)</b>	<b>Saída (kg)</b>
Concentrado de microalga (0,114% m/v)	L-113	14.972,0666	---
Água residual	L-115	---	6.402,4138
Concentrado de microalga (0,200% m/v)	L-114	---	8.569,6529
<b>Total</b>		14.972,0666	14.972,0666

Fonte: Autores (2021).

Tabela 22 - Balanço de massa para a centrifugação do quarto cultivo dos tanques TQ-104, 105 e 106

<b>Componentes</b>	<b>Corrente</b>	<b>Entrada (kg)</b>	<b>Saída (kg)</b>
Concentrado de microalga (0,121% m/v)	L-113	29.946,2666	---
Água residual	L-115	---	11.741,3488
Concentrado de microalga (0,200% m/v)	L-114	---	18.204,9179
<b>Total</b>		29.946,2666	29.946,2666

Fonte: Autores (2021).

### 7.3.6 Resumo das Correntes do Balanço de Massa

A Tabela 23 apresenta um resumo das propriedades físicas e condições operacionais típicas das correntes principais do processo.

Tabela 23 - Propriedades físicas e condições operacionais das correntes do processo

	Unidade	L-101	L-102	L-103	L-104	L-105	L-106	L-107	L-108	L-109	L-110	L-111	L-112	L-113	L-114	L-115
Massa <sup>(1)</sup>	kg	2,9929	0,1332	---	---	---	---	---	---	29,5416	296,9761	---	---	---	---	---
Vazão mássica <sup>(2)</sup>	kg dia <sup>-1</sup>	---	---	---	---	---	---	2987,9560	---	---	---	47889,1146	71794,8667	74853,9331	39651,4281	35202,5052
Vazão mássica	kg h <sup>-1</sup>	---	---	7976	---	7976	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
<b>Por componente</b>																
Microalga	kg	0,0019	---	---	---	---	---	---	---	0,2110	0,2131	44,7996	---	78,9331	79,3029	---
NPK	kg	---	0,1332	---	---	---	---	---	---	---	---	---	18,0000	---	---	---
Água	kg	2,9928	0,0005	39880	---	39880	---	2987,9560	---	29,5205	296,7630	47676,0530	71776,8667	74775,0000	39572,4948	35202,5052

<sup>(1)</sup> Quantidade de massa adicionada uma única vez na batelada; <sup>(2)</sup> Quantidade de massa adicionada nas bateladas a cada oito dias;

Fonte: Autores (2021).

## 7.4 BALANÇOS DE ENERGIA MECÂNICA

O balanço de energia, devido às características do processo produtivo, foi realizado apenas para as etapas de bombeamento do projeto. Isso foi feito pois o processo de produção não exige controle mecânico, aquecimento ou resfriamento, há apenas controle de temperatura utilizando uma estufa agrícola no setor produtivo.

O balanço de energia para um sistema de bombeamento segue o seguinte princípio (Equação 5):

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Energia total que} \\ \text{entra no sistema} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{l} \text{Energia total que} \\ \text{sai do sistema} \end{array} \right] = [\text{Variação total da energia}] \quad (\text{Equação 5})$$

Considerando o balanço de energia mecânica e energia térmica em um sistema, a definição de energia interna (Equação 6) se torna o seguinte:

$$\frac{dE}{dt} = \dot{m}_e \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gh \right]_e - \dot{m}_s \left[ \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}v^2 + gh \right]_s + W + \dot{m}_e C_{p,e} T_e - \dot{m}_s C_{p,s} T_s + \dot{Q} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

$E$  = energia interna (J);

$t$  = tempo (s);

$\dot{m}_e$  = vazão mássica de entrada (kg/s);

$\dot{m}_s$  = vazão mássica de saída (kg/s);

$p$  = pressão (Pa);

$\rho$  = densidade do fluido (kg/m<sup>3</sup>);

$v$  = velocidade do fluido (m/s);

$g$  = aceleração da gravidade (m/s<sup>2</sup>);

$h$  = altura (m);

$C_p$  = calor específico (kJ/kg K);

$T$  = temperatura (K);

$W$  = taxa de realização de trabalho (Potência) (W);

$\dot{Q}$  = taxa de transferência de calor (W).

Aplicando a equação acima para uma tubulação obtêm-se a chamada Equação de Bernoulli. Essa equação pode ser considerada para um sistema com dissipação de energia mecânica e trabalho de eixo, tomando a seguinte forma (Equação 7):

$$\left(z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g}\right) + h_b = \left(z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g}\right) + h_p \quad (\text{Equação 7})$$

Em que:

$h_p$  = perda de carga (m);

$h_b$  = altura manométrica (“carga”) fornecida pela bomba ao fluido (m);

O fator perda de carga pode ser calculado a partir da equação de Darcy-Weisbach (Equação 8).

$$h_p = f \frac{\Sigma L}{D^5} \frac{8Q^2}{\pi^2 g} \quad (\text{Equação 8})$$

Em que:

$f$  = fator de atrito (adimensional);

$Q$  = vazão volumétrica (m<sup>3</sup>/s);

$\Sigma L$  = comprimento equivalente da tubulação (m);

$D$  = diâmetro do tubo (m).

O chamado comprimento equivalente refere-se a soma dos comprimentos de cada seção da tubulação mais o comprimento equivalente de cada acessório utilizado, como por exemplo, joelhos, válvulas, etc. O diâmetro equivalente de tais acessórios é encontrado no Anexo C.

A Equação de Bernoulli, com dissipação de energia mecânica, quando aplicada para uma bomba (Equação 9) permite o dimensionamento das bombas necessárias para sucção/despejo de um determinado fluido.

$$h_b = \left(z_2 + \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho_2 g}\right) - \left(z_1 + \frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho_1 g}\right) + h_p \quad (\text{Equação 9})$$



Em que:

$h_b$  = altura manométrica fornecida pela bomba ao sistema (m).

Por fim, a potência necessária para a bomba é calculada a partir da Equação 10:

$$W_b = \rho g Q h_b \quad (\text{Equação 10})$$

Em que:

$W_b$  = potência da bomba (W).

O dimensionamento das bombas foi realizado a partir das equações citadas anteriormente além das equações apresentadas na Tabela 24. Todas as equações foram obtidas e adaptadas de ÇENGEL (2014).

Tabela 24 - Equações adicionais para o cálculo de potência de bomba

Equação	Fórmula	
Reynolds – Regime de escoamento	$Re = \frac{4\rho Q_v}{\pi\mu D}$	Equação (11)
Fator de Atrito para $Re < 2100$	$f = \frac{64}{Re}$	Equação (12)
Fator de atrito para $5000 < Re < 10^8$	$f = \frac{1,325}{\left[ \ln\left(3,7 \frac{\varepsilon}{D}\right) + \frac{5,74}{Re^{0,9}} \right]^2}$	Equação (13)
Trabalho realizado	$W = H_m \times g$	Equação (14)
Potência Útil	$P_{\text{útil}} = \rho Q W$	Equação (15)

Fonte: Adaptado de ÇENGEL (2014).

Cada conjunto tanque-bomba foi considerado um sistema e sobre ele aplicado as equações acima apresentadas. Importante especificar que as propriedades do fluido foram assumidas sendo aproximadamente iguais aos da água a uma temperatura de 25°C.

Os cálculos seguiram as seguintes etapas, com os resultados apresentado na Tabela 25.

- Determinação da vazão de entrada do fluido;
- Determinação do diâmetro da tubulação;

- Determinação da distância dos tanques até a bomba e se há desnível entre os tanques;
- Cálculo do Número de Reynolds (Equação 11);
- Definição da rugosidade da tubulação com base no material de fabricação do mesmo. A rugosidade é encontrada no Anexo B;
- A partir do número de Reynolds, calcular o fator de atrito (Equação 12 ou 13);
- Definir o comprimento equivalente levando em consideração as tubulações e os acidentes (Anexo C);
- Cálculo da perda de carga (Equação 8);
- Cálculo da altura manométrica (Equação 9);
- Cálculo do trabalho realizado (Equação 14);
- Cálculo da potência útil (Equação 15).

Para a aquisição das bombas foi considerada a eficiência da bomba a ser comprada e a potência útil necessária para realizar o bombeamento, de modo a adquirir a bomba com potência suficiente para atender a demanda.

O processo de dimensionamento das bombas foi realizado para cada uma das bombas do sistema do mesmo modo descrito anteriormente. A cada sistema foi avaliada a distância entre a bomba e os tanques, diferença de altura e diâmetro da tubulação assim como quais componentes (joelho, curva, entrada, T, etc) são necessários.

Tabela 25 - Valores do dimensionamento das bombas

<b>Especificações</b>	<b>B-101</b>	<b>B-102</b>	<b>B-103</b>	<b>B-104</b>	<b>B-105</b>	<b>B-106</b>	<b>B-107</b>
<b>Distância do ponto de sucção até a bomba (m)</b>	1,50	2,00	2,00	2,00	24,00	4,00	1,50
<b>Distância da bomba até o despejo (m)</b>	1,50	2,00	43,00	30,00	1,50	4,00	42,00
<b>Diferença de altura (m)</b>	5,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,00
<b>Diâmetro da tubulação (m)</b>	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
<b>Comprimento equivalente (m)</b>	18,40	15,10	100,30	72,70	54,20	23,60	108,70
<b>Vazão de entrada (m<sup>3</sup>/s)</b>	0,0022	0,0022	0,0042	0,0083	0,0033	0,0033	0,0042
<b>Perda de carga (m)</b>	0,0375	0,0213	0,7337	1,3806	1,5347	0,0733	0,7952
<b>Altura manométrica (m)</b>	5,04	0,02	0,73	1,38	2,53	1,07	0,80
<b>Trabalho realizado (J/kg)</b>	46,24	0,20	6,74	12,67	23,27	9,85	7,30
<b>Potência (W)</b>	108,28	0,46	28,20	111,96	205,56	32,42	32,63

Fonte: Autores (2021).

## 7.5 ESPECIFICAÇÕES E DIMENSIONAMENTO DOS EQUIPAMENTOS

Nesse tópico serão apresentadas as especificações e dimensões dos equipamentos, esses dados influenciam diretamente na viabilidade econômica do projeto. Para a empresa em questão, não há necessidade de equipamentos altamente sofisticados como os da indústria de química fina, contudo, para facilitar a obtenção dos custos de equipamentos serão adotadas especificações plausíveis de serem encontradas na literatura.

Um ponto em comum a todos os tanques é a atenção especial dada a sua profundidade/altura. Conforme a profundidade e a concentração de biomassa algal aumenta no cultivo, a quantidade de luz solar que chega até as células presentes mais fundas no tanque é menor, e conseqüentemente, tais células tem o seu crescimento reduzido. A fim de garantir uma

distribuição otimizada e homogênea de luz solar às células considera-se a construção de tanques com profundidades pequenas e com sistemas de aeração/agitação pneumática e mecânica.

### 7.5.1 Tanque TQ-101

O tanque TQ-101 estará presente no interior do laboratório. Esse tanque será utilizado para receber o conteúdo do inóculo e garantir o crescimento de biomassa algal para dar continuidade ao cultivo. Após o tempo estipulado para cultivo todo seu conteúdo será destinado para os tanques seguintes.

O tanque TQ-101 deverá ser construído em formato cilíndrico para que não haja acúmulo de biomassa nas arestas com um orifício no centro para entrada de ar, possibilitando assim, a aeração e agitação do meio. Esse equipamento será construído de material plástico, assim como todos os demais tanques de cultivo do processo produtivo (Quadro 1).

Os cálculos são realizados a partir da equação para cálculo de volume e área superficial do cilindro (Equação 16 e 17). As dimensões do tanque e a sua representação estão descritas na Tabela 26 e Figura 15, respectivamente.

As representações foram elaboradas a partir do *software* COMSOL Multiphysics® v. 5.5, licença acadêmica.

$$V_{cilindro} = \pi \times r^2 \times h \quad \text{(Equação 16)}$$

$$A_{sup.circulo} = \pi \times r^2 \quad \text{(Equação 17)}$$

Em que:

r = raio do cilindro (m);

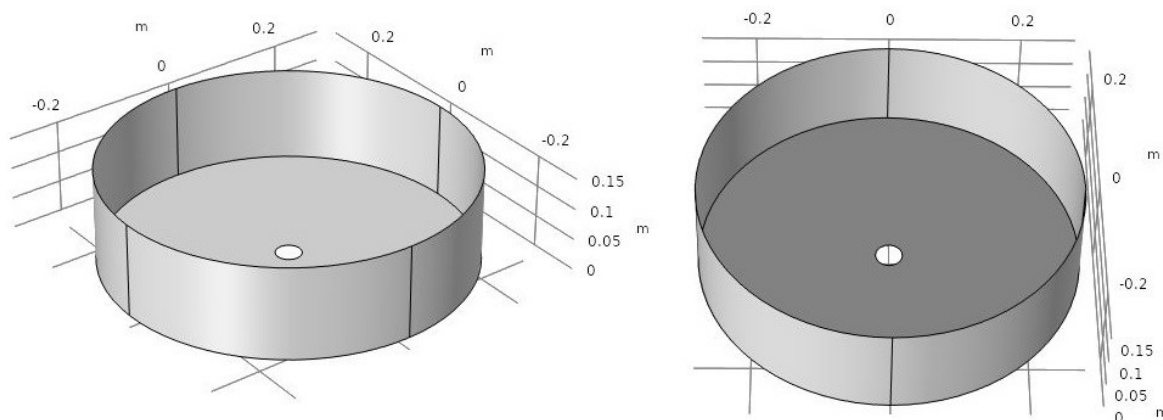
h = altura do cilindro (m).

Tabela 26 - Dimensões do tanque TQ-101

Tanque	Altura (m)	Raio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Razão A/V (m <sup>-1</sup> )
TQ-101	0,150	0,282	0,2500	0,0375	6,67

Fonte: Autores (2021).

Figura 15 - Perspectiva lateral e superior do tanque TQ-101



Fonte: Autores (2021).

Quadro 1 - Especificações técnicas do tanque (TQ-101)

Equipamento	Tanque
TAG	TQ-101
Quantidade	1
Material de Construção	Plástico
Juntas, visores e Vedações	Materiais inertes e não tóxicos
Formato	Cilíndrico
Acabamento interno	Revestimento em fibra de vidro
Agitação	Pneumática

Fonte: Autores (2021).

### 7.5.2 Tanque TQ-102

O tanque TQ-102 será construído do lado de fora do laboratório, sob proteção da estufa a fim de garantir o controle de temperatura e facilitar a transferência de um cultivo para outro. A aeração será feita através de dois orifícios localizados no fundo do tanque pelos quais o compressor C-101 injetará ar. O tanque TQ-102 estará conectado ao próximo tanque por uma tubulação que permitirá a transferência de cultivo.

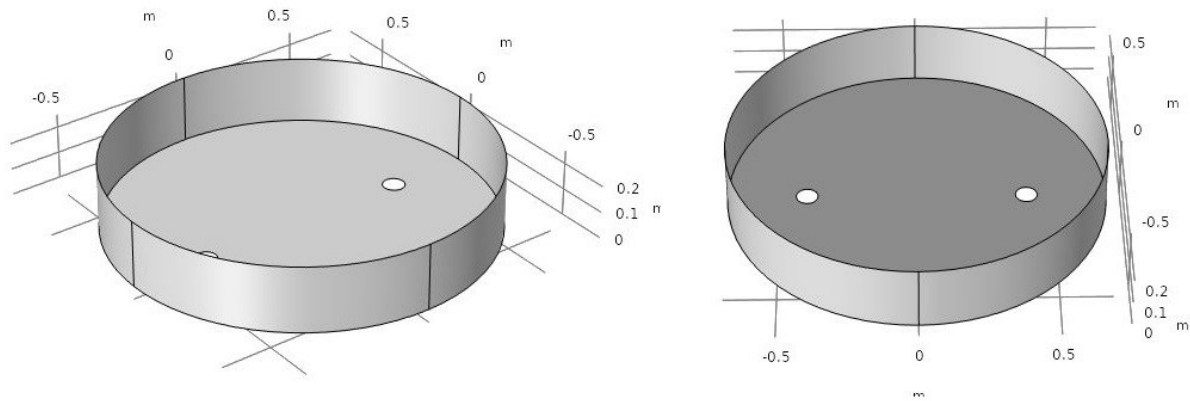
O tanque será construído no formato cilíndrico (Figura 16) de modo que exista um desnível em relação ao tanque anterior (Tabela 27). O Quadro 2 apresenta de forma simplificada as especificações necessárias para o tanque TQ-102.

Tabela 27 - Dimensões do tanque TQ-102

Tanque	Altura (m)	Raio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Razão A/V (m <sup>-1</sup> )
TQ-102	0,250	0,691	1,500	0,375	4,00

Fonte: Autores (2021).

Figura 16 - Perspectiva lateral e superior do tanque TQ-102



Fonte: Autores (2021).

Quadro 2 - Especificações técnicas do tanque (TQ-102)

Equipamento	Tanque
TAG	TQ-102
Quantidade	1
Material de Construção	Concreto armado
Juntas, visores e Vedações	Materiais inertes e não tóxicos
Formato	Cilíndrico
Acabamento interno	Revestimento em fibra de vidro
Agitação	Pneumática

Fonte: Autores (2021).

### 7.5.3 Tanque TQ-103

Da mesma forma que o tanque anterior, o tanque TQ-103 será construído fora do laboratório sob a estufa ao lado do tanque TQ-102. Será projetado de modo que possua uma diferença de altura em relação ao tanque TQ-104, 105 e 106, para que seja possível a transferência do seu conteúdo para os tanques finais sem a necessidade de uma bomba, somente com a força da gravidade. Cerca de um terço do cultivo presente no tanque TQ-103 será destinado para cada um dos tanques finais de modo que cada um receba a quantidade ideal de cultivo para iniciar o crescimento celular.

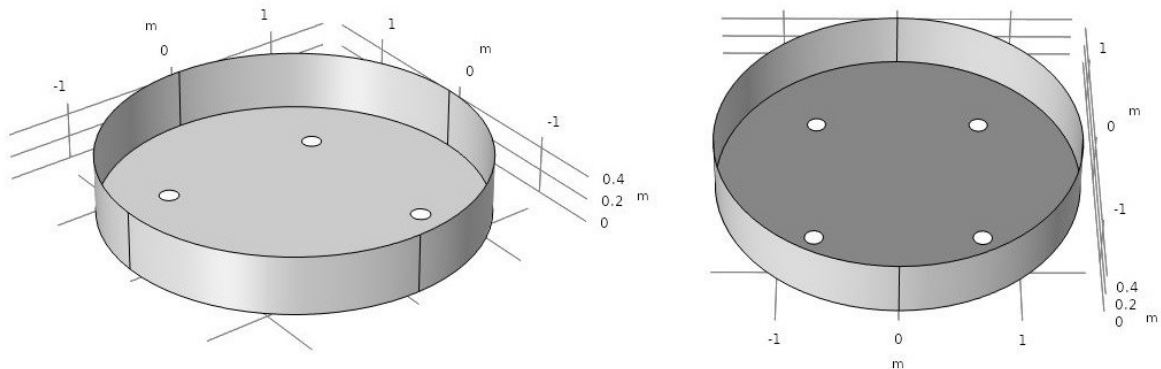
Será projetado na forma cilíndrica (Tabela 28) com um total de quatro orifícios para entrada de ar de aeração (Figura 17). O Quadro 3 apresenta de forma simplificada as especificações necessárias para o tanque TQ-103.

Tabela 28 - Dimensões do tanque TQ-103

Tanque	Altura (m)	Raio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Razão A/V (m <sup>-1</sup> )
TQ-103	0,500	1,545	7,500	3,750	2,00

Fonte: Autores (2021).

Figura 17 - Perspectiva lateral e superior do tanque TQ-103



Fonte: Autores (2021).

Quadro 3 - Especificações técnicas do tanque (TQ-103)

Equipamento	Tanque
TAG	TQ-103
Quantidade	1
Material de Construção	Concreto armado
Juntas, visores e Vedações	Materiais inertes e não tóxicos
Formato	Cilíndrico
Acabamento interno	Revestimento em fibra de vidro
Agitação	Pneumática

Fonte: Autores (2021).

#### 7.5.4 Tanque TQ-104, TQ-105 e TQ-106

Ao todo, o volume de cultivo necessário para atender a demanda é 30.000 L, logo são necessários três tanques, cada um cultivando 10.000 L. Esses tanques estarão localizados em um nível menor em referência ao tanque anterior e conectados a esse para garantir a transferência de cultivo. Serão construídos no formato cilíndrico (Tabela 29) da mesma maneira que os outros, porém possuirá ao total oito orifícios para aeração (Figura 18). O Quadro 4 apresenta de forma simplificada as especificações necessárias para o tanque TQ-104, TQ-105 e TQ-106.

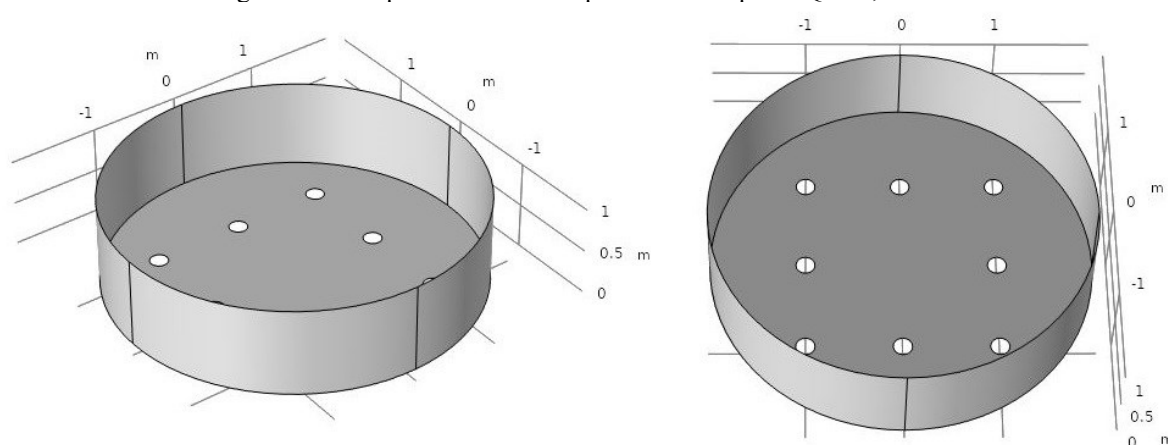
Tabela 29 - Dimensões dos tanques TQ-104, 105 e 106

Tanques	Altura (m)	Raio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Razão A/V (m <sup>-1</sup> )
TQ-104, 105 e 106	1,000	1,995	12,500	12,500	1,00

\*As dimensões apresentadas são iguais para os três tanques de mesmo volume

Fonte: Autores (2021).

Figura 18 - Perspectiva lateral e superior dos tanques TQ-104, 105 e 106



Fonte: Autores (2021).

Quadro 4 - Especificações técnicas do tanque (TQ-104; TQ-105; TQ-106)

Equipamento	Tanque
TAG	TQ-104; TQ-105; TQ-106
Quantidade	3
Material de Construção	Concreto armado
Juntas, visores e Vedações	Materiais inertes e não tóxicos
Formato	Cilíndrico
Acabamento interno	Revestimento em fibra de vidro
Agitação	Pneumática

Fonte: Autores (2021).

### 7.5.5 Tanques de água TT-101 e TT-102

Os tanques TT-101 e TT-102 serão utilizados para receber a água do poço artesiano e os produtos designados para sua limpeza. Ao todo serão construídos dois tanques, um para a etapa de cloração e o outro para decloração. O volume dos tanques de água deverá comportar o mesmo volume dos cultivos finais, ou seja, 30.000 L mais uma quantidade adicional de água a ser utilizada pelo laboratório, setor administrativo, banheiros, entre outras aplicações. Foi estipulado um volume de 40.000 L. Por não se tratar mais de um tanque para cultivo não é necessário cuidado com sua altura para garantir uma iluminação uniforme.



Ambos os tanques, como já dito, recebem reagentes utilizados para o tratamento da água. Dessa forma é necessário que haja agitação no meio para que o produto adicionado atue em todo o volume. A agitação será realizada mecanicamente através de impelidores do tipo pá inclinada. As dimensões foram calculadas de acordo com os padrões apresentados por Stanbury *et al.*, (1994).

As dimensões dos tanques de tratamento e do sistema de agitação estão representadas na Tabela 30 e 31, respectivamente, e as especificações no Quadro 5.

Tabela 30 - Dimensões dos tanques de água TT-101 e TT-102

Tanque	Altura (m)	Raio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Razão A/V (m <sup>-1</sup> )
TT-101 e 102	8,000	1,278	5,130	41,000	0,125

Fonte: Autores (2021).

Tabela 31 - Dimensões do sistema de agitação dos tanques TT-101 e TT-102

Tanque	Altura (m)	Diâmetro (m)	Diâmetro impelidor (m)	Altura das pás (m)	Largura das pás (m)	Nº de Impelidores
TT-101 e 102	8,000	2,6	1,3	0,260	0,325	5

Fonte: Autores (2021).

Quadro 5 - Especificações técnicas dos tanques de tratamento (TT-101; TT-102)

Equipamento	Tanque
TAG	TT-101; TT-102
Quantidade	2
Material de Construção	Concreto armado
Juntas, visores e Vedações	Materiais inertes e não tóxicos
Formato	Cilíndrico
Acabamento interno	Revestimento em fibra de vidro
Agitação	Mecânica
Impelidores	5

Fonte: Autores (2021).

### 7.5.6 Tanque de mistura TM-101

O tanque TM-101 é responsável por receber toda a água dos tanques de cultivo final, ou seja, 30000 L. Juntamente com a água de cultivo entrará o meio NPK o qual será diluído no volume já presente no tanque e então encaminhado para os tanques finais. Para garantir uma diluição uniforme será realizado uma agitação mecânica, com auxílio de impelidores do tipo pá inclinada, no tanque. Visto a necessidade de uma agitação, o volume real do tanque deverá ser

maior que o estipulado. Dessa forma, o volume real do tanque é de 31 m<sup>3</sup> enquanto o volume útil é de 30 m<sup>3</sup>.

O processo de dimensionamento será realizado da mesma forma que foi realizado com o tanque de água para garantir o volume com a menor quantidade de material (Tabela 32, 33 e Quadro 6).

Tabela 32 - Dimensões do tanque TM-101

Tanque	Altura (m)	Raio (m)	Área (m <sup>2</sup> )	Volume (m <sup>3</sup> )	Razão A/V (m <sup>-1</sup> )
TM-101	4,00	1,571	7,750	31,000	0,250

Fonte: Autores (2021).

Tabela 33 - Dimensões do sistema de agitação do tanque TM-101

Tanque	Altura (m)	Diâmetro (m)	Diâmetro impelidor (m)	Altura das pás (m)	Largura das pás (m)	Nº de Impelidores
TT-101 e 102	4,00	3,14	1,57	0,314	0,393	1

Fonte: Autores (2021).

Quadro 6 - Especificações técnicas do tanque de mistura (TM-101)

Equipamento	Tanque de mistura
TAG	TM-101
Quantidade	1
Material de Construção	Concreto armado
Juntas, visores e Vedações	Materiais inertes e não tóxicos
Formato	Cilíndrico
Acabamento interno	Revestimento em fibra de vidro
Agitação	Mecânica
Impelidores	1

Fonte: Autores (2021).

### 7.5.7 Centrífuga CT-101

A centrífuga possui a função de receber o cultivo proveniente dos tanques TQ-104, TQ-105 e TQ-106 e separar a biomassa de microalga da água de cultivo. Algumas considerações devem ser levadas em conta ao fazer o seu dimensionamento:

- A densidade e viscosidade da solução serão aproximadas aos da água a 25°C;

- O diâmetro de corte será definido inicialmente com base no diâmetro médio das células da microalga *Chlorella vulgaris*, valor esse obtido com base no trabalho de Oliver *et al.* (1981);
- O dimensionamento da centrífuga é realizado considerando o cenário de maior exigência da mesma, ou seja, no caso em que todo o cultivo dos tanques finais precisa ser centrifugado.

O dimensionamento da centrífuga foi realizado empregando-se a Equação 18, a qual permite o cálculo do número de rotações que a centrífuga necessita realizar para a separação correta das correntes.

$$q = \frac{\omega^2 \times (\rho_p - \rho) \times D_c}{18 \times \mu \times \ln(2 \times r_2 / (r_1 + r_2))} \times V \quad (\text{Equação 18})$$

Em que:

$q$  = vazão volumétrica de entrada (m<sup>3</sup>/s);

$\omega$  = velocidade angular (Rad/s);

$\rho_p$  = densidade da partícula (kg/m<sup>3</sup>);

$\rho$  = densidade da solução (kg/m<sup>3</sup>);

$D_c$  = diâmetro de corte (m);

$\mu$  = viscosidade da solução (Pa.s)

$r_1$  = raio interno (m);

$r_2$  = raio externo (m);

$V$  = volume da centrífuga (m<sup>3</sup>).

Substituindo os dados obtêm-se a velocidade angular da qual, a partir da Equação 19, encontra-se o número de rotação da centrífuga (N).

$$\omega = \frac{2 \times \pi \times N}{60} \quad (\text{Equação 19})$$

A Tabela 34 mostra os dados utilizados no dimensionamento, a Tabela 35 mostra o resultado do dimensionamento e o Quadro 7 descreve as especificações do equipamento que melhor corresponde a necessidade produtiva segundo o catálogo do fornecedor Flottweg SE.

Tabela 34 - Parâmetros utilizados para o dimensionamento da centrífuga CT-101

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Densidade da solução (25°C)	997	kg/m <sup>3</sup>
Densidade da microalga (OLIVER <i>et al.</i> , 1981)	1040	kg/m <sup>3</sup>
Viscosidade da solução (25°C)	8,91 x 10 <sup>-3</sup>	Pa.s
Vazão de entrada	8,3 x 10 <sup>-3</sup>	m <sup>3</sup> /s
Diâmetro da microalga	5,71 x 10 <sup>-6</sup>	m
Diâmetro de corte	6,00 x 10 <sup>-6</sup>	m
Altura da centrífuga	1,00	m
Raio 1	0,4	m
Raio 2	0,8	m


Fonte: Autores (2021).

Tabela 35 - Dimensões da centrífuga CT-101

<b>Parâmetro</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Diâmetro de corte	6,00 x 10 <sup>-6</sup>	m
Volume	1,51	m <sup>3</sup>
Rotações	12.068	RPM

Fonte: Autores (2021).

Quadro 7 - Especificações técnicas da centrífuga (CT-101)

TAG	C-101	
Modelo	AC 2000	
Quantidade	1	
Material	Aço inoxidável Super Duplex	
Capacidade hidráulica (L/h)	45000	
Volume máx. da câmara (L)	25	
Volume máx. de sólidos (L)	11,5	
Peso bruto (kg)	2900	
Comprimento (mm)	2000	
Altura (mm)	2000	
Largura (mm)	1100	
Potência do motor (kW)	37	

Fonte: Catálogo Flottweg SE (2021).

#### 7.5.8 Filtro rotativo F-102

Ao final do processo de centrifugação a água resultante será filtrada em um filtro do tipo tambor rotativo a vácuo com o objetivo de remover quaisquer resíduos. A corrente resultante do filtro retornará ao processo, especificadamente aos tanques de cultivo.

Para dimensionar qual o tamanho do equipamento, foi utilizada a Equação 20.

$$A_{filtro} = \frac{\dot{m}}{\frac{dF}{dt}} \quad (\text{Equação 20})$$

Em que:

$\dot{m}$  = vazão mássica que entra no filtro (kg/h);

$dF/dt$  = taxa de filtração ( $\text{kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ ) (Anexo D).

Considerações:

- Resistência do meio filtrante desprezível;
- Informações referente a torta não serão considerados, como porosidade e resistência e espessura da torta;
- Fração submersa do filtro será de 30%;
- Dimensionamento baseado no cenário de maior demanda, ou seja, após quatro cultivos nos tanques finais, totalizando cerca de 120 kg de microalgas.

A corrente de entrada do filtro F-102 possui uma massa de aproximadamente 11.742 kg enquanto a massa de microalga corresponde a aproximadamente 36,267 kg, aproximadamente 0,2% do valor total. A taxa de filtração para uma mistura com concentração próxima a 0,1% de soluto foi obtida a partir do Anexo D, fornecendo um valor de  $0,1 \text{ gal.min}^{-1}.\text{sq.ft}^{-1}$  ou então  $243,7 \text{ kg h}^{-1} \text{m}^{-2}$ . A quantidade total de massa será filtrada em 1 hora, logo, a vazão mássica de entrada do filtro é 11.742 kg/h. A Tabela 36, o Quadro 8 e Figura 19 demonstram as dimensões e as especificações estruturais do equipamento.

Tabela 36 - Dimensões do filtro tambor rotativo a vácuo

Vazão mássica (kg/h)	Taxa de filtração (kg/h m <sup>2</sup> )	Área (m <sup>2</sup> )
11.742	243,7	48,2

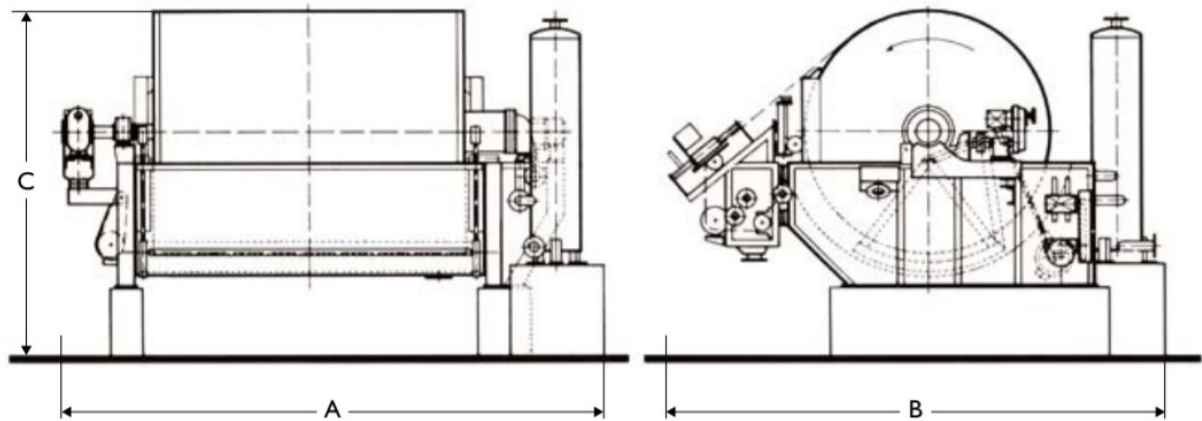
Fonte: Autores (2021).

Quadro 8 - Especificações técnicas do filtro rotativo (F-102)

TAG	F-102
Modelo	TSF 31.4/50
Quantidade	1
Material	Aço carbono
Diâmetro do tambor (mm)	3140
Largura do tambor (mm)	5000
Número de células	24
Dimensão A (mm)	7400
Dimensão B (mm)	4700
Dimensão C (mm)	4000
Peso total do filtro (ton)	36
Potência (kW)	8
Modo de operação	Contínuo
Modo de descarga da torta	Raspador, rolo.

Fonte: Catálogo TEFSA, 2021.

Figura 19 - Representação do filtro rotativo a vácuo



Fonte: Catálogo TEFSA, 2021.

## 8. ENGENHARIA DE PROJETO

Nesse item serão descritos e justificados o controle e instrumentação do projeto, bem como o *layout* e o mapa de risco.

### 8.1 CONTROLE E INSTRUMENTAÇÃO

O sistema de controle de um processo industrial é indispensável para garantir a eficiência do processo atuando diretamente na melhoria da qualidade, na redução do desperdício energético e aumentando a produtividade de maneira segura. Para isso são utilizados instrumentos de medição e controle, como indicadores, registradores, controladores, transmissores e válvulas, que possibilitam manter as variáveis controladas no valor especificado de acordo o *set point* definido (valor de referência), além de possibilitar o monitoramento e garantir a segurança dentro da indústria.

#### 8.1.1 Diagrama de Tubulação e Instrumentação

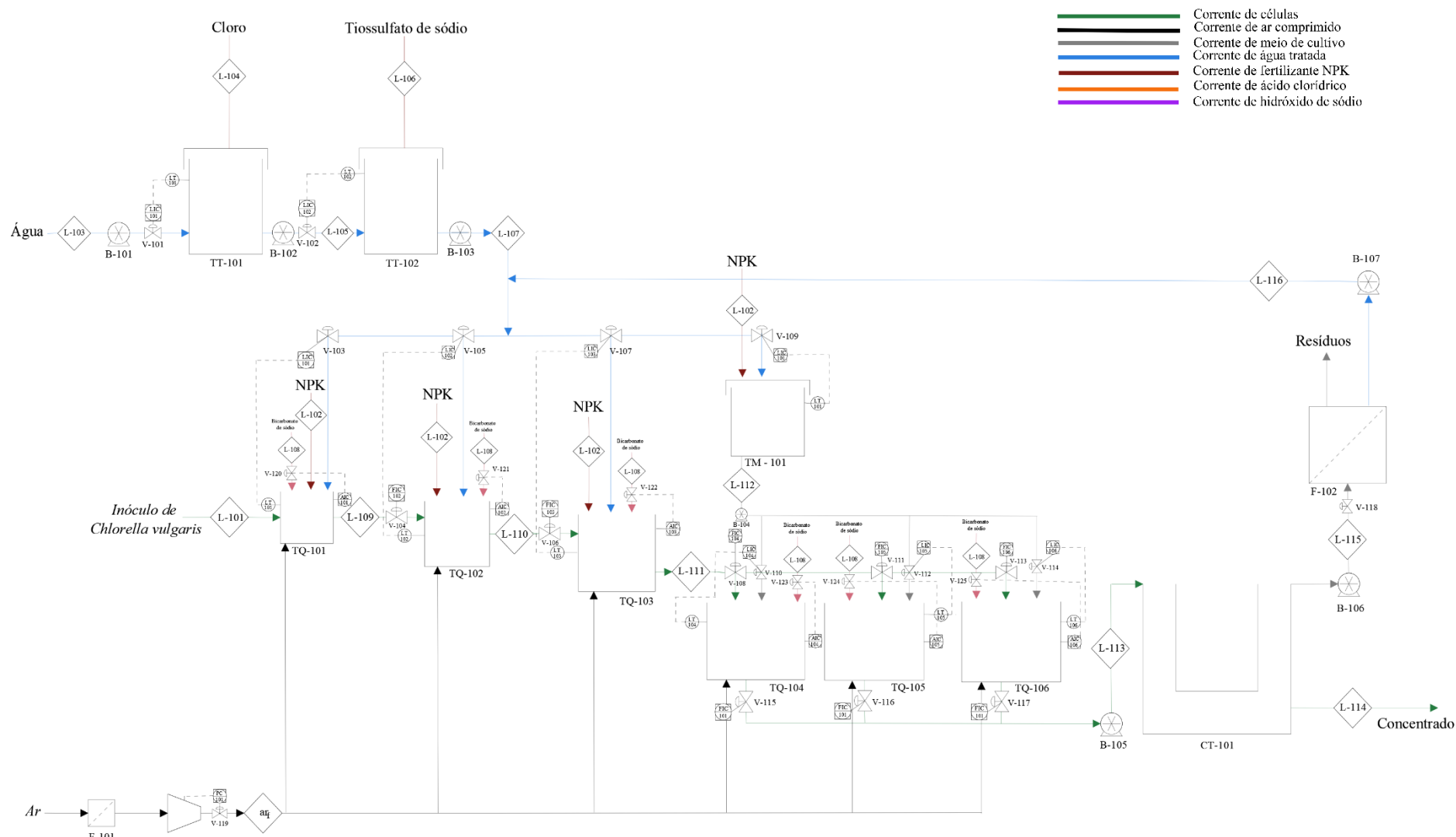
Para ilustrar as malhas de controle aplicadas no processo de produção de biomassa de *Chlorella vulgaris*, desenvolveu-se um Diagrama de Tubulação e Instrumentação (P&ID – *Piping and Instrumentation Diagram*) através do *software* livre Dia Gnome, que ilustra os principais instrumentos e sistemas de controle do processo (Figura 20), as definições das simbologias utilizadas no diagrama estão descritas na Tabela 37.

Tabela 37 - Simbologia utilizada no diagrama de tubulação e instrumentação do processo

<b>Nomenclatura</b>	<b>Definição</b>
V	Válvula guilhotina
LT	Sensor/transmissor de nível
LC	Controlador de nível
FIC	Controlador/indicador de vazão
AIC	Sensor/indicador/controlador de pH
PIC	Controlador/indicador de pressão

Fonte: Autores (2021).

Figura 20 - Diagrama de tubulação e instrumentação da indústria de produção de biomassa de *Chlorella vulgaris*





### 8.2.1 Tanques de Cultivos

O tanque de cultivo TQ-101, possui um controlador de nível, ou seja, possui um sensor de nível mínimo, que tem como função emitir um sinal pneumático ao controlador quando o nível do tanque de cultivo estiver baixo. Além disso, possui um sensor de nível máximo, transmitindo um sinal pneumático quando o tanque atinge o limite de segurança do reservatório. Ambos os limites atuam na válvula V-103 através do controlador, presente no painel LC-101, regulando a vazão de entrada de água tratada. Esse tanque também possui um sensor de pH (AIC-101) que indica o pH do cultivo no painel de controle para que as adições de bicarbonato de sódio ou o controle de vazão de CO<sub>2</sub>.

Assim como descrito no tanque de cultivo TQ-101, o tanque de cultivo TQ-102 e o TQ-103 possuem o mesmo sistema de controle de nível (nível máximo e mínimo) e esses atuam nas válvulas V-105 e V-107, respectivamente, regulando a vazão de água tratada através do controlador de cada corrente (LC-102 e LC-103). Assim como o tanque anterior, os tanques TQ-102 e TQ-103 possuem um sensor de pH (AIC-102 e AIC-103) que indica o pH do cultivo no painel de controle para que as adições de bicarbonato de sódio ou o controle de vazão de CO<sub>2</sub>.

Já nos tanques TQ-104, TQ-105 e TQ-106 também existe um sistema de controle de nível (nível máximo e mínimo), um sistema de controle de pH e um controlador de vazão. No TQ-104 o controlador LC-104 recebe o sinal de nível do tanque e atua gerando resposta na válvula V-110 regulando a vazão da mistura de água e NPK. No mesmo tanque também está localizado um sensor de pH (AIC-104), o qual envia um sinal ao painel de controle. O mesmo procedimento de controle é realizado para os tanques TQ-105 (controlador LC-105; sensor de pH AIC-105; e válvula V-112) e TQ-106 (controlador LC-106; sensor de pH AIC-106; e válvula V-114). Nesses tanques de cultivo por ser um sistema em batelada alimentada as válvulas do processo também possuem um controlador indicador de vazão.

### 8.2.2 Tanque de Mistura (TM-101)

O tanque de mistura TM-101 possui sensores e transmissores de nível mínimo e de nível máximo a fim de garantir a segurança e evitar problemas como o fenômeno de cavitação da bomba e o derramamento do tanque. Esses sinais são recebidos pelo controlador de nível LC-101 que atua na válvula V-109 regulando a vazão necessária a mesma.

#### 8.2.4 Centrifugação (CT-101)

Para que a produção de biomassa se mantenha relativamente contínua, a vazão de saída dos tanques TQ-104, TQ-105 e TQ-106 e de entrada na centrífuga deve ser controlada. Dessa forma, utiliza-se um sensor/controlador de vazão FIC-101, cuja função é manipular a vazão na tubulação pelas válvulas V-115, V-116 e V-117.

#### 8.2.6 Filtro rotativo a vácuo (F-102)

No filtro de tambor rotativo F-102 é necessário a implantação de um controlador de vazão (FIC-102) e um controlador de pressão (PIC-102) que atua na válvula V-118, a fim de garantir a segurança e eficiência do equipamento.

#### 8.2.7 Filtro (F-101) e compressor (C-101)

Na etapa de purificação do ar é necessário um controlador de pressão (PC-101) na válvula (V-119) atuando no compressor de ar, a fim de evitar acidentes com a tubulação e com o equipamento.

#### 8.2.8 Tanque de tratamento (TT-101 e TT-102)

Os tanques de tratamento TT-101 e TT-102 possuem sensores e transmissores de nível mínimo e de nível máximo a fim de evitar problemas como o fenômeno de cavitação da bomba e o derramamento do tanque. Esses sinais são recebidos pelo controlador de nível LC-101 e LC-102 que atuam diretamente nas válvulas V-101 e V-102, respectivamente, regulando a vazão de líquido desses dispositivos.

### 8.2 SISTEMA HIDRÁULICO

Nesse tópico serão especificadas as tubulações e as válvulas adequadas a cada etapa do projeto. De uma forma geral, as válvulas controlam o caudal e a pressão dos fluidos em um sistema hidráulico, ainda, para cada propriedade e função é necessário um tipo de dispositivo. O mesmo acontece com as tubulações, para cada utilidade há a necessidade de um tubo

específico visto que dependem de variáveis como o fluido a ser conduzido, condições de pressão, vazão, possíveis incrustações, entre outros.

### 8.2.1 Válvulas

Para a escolha das válvulas é necessário conhecimento prévio sobre sua serventia, se será aplicada para controlar o caudal ou para interromper a circulação do fluido. Após essa determinação é feita a verificação de qual tipo de fluido passará pelo dispositivo, se é gás ou líquido, corrosivo ou neutro e se há necessidade de condições específicas de higiene. Ainda, deve-se levar em consideração o sistema de acionamento das válvulas, se manual ou automático (DIRECT INDUSTRY, 2021).

No presente projeto as válvulas utilizadas são do tipo guilhotina, pois, apesar de operar principalmente como válvula de bloqueio, também podem ser utilizadas como válvula de controle através da abertura parcial do obturador. Esse modelo de dispositivo é apropriado para fluidos com sólidos em suspensão, como águas residuais e lamas, sendo recorrentes na indústria do papel, química, mineração, centrais de energia e na indústria agroalimentar (DIRECT INDUSTRY, 2021).

### 8.2.2 Tubulações

As tubulações industriais são o conjunto de tubos, válvulas e conexões voltado para o transporte de fluidos em um processo industrial. Podem representar 70% do custo dos equipamentos e 25% do custo total de instalação da planta, assim, sendo necessário conhecer as reais necessidades do projeto, otimizando o processo e evitando gastos desnecessários com manutenções e falhas (PROPEQ, 2020). São os detalhes desse conjunto que irão garantir a segurança e o bom desenvolvimento da obra referente ao projeto.

O material de fabricação das tubulações diverge para cada aplicação, podendo ser metálicos ou não metálicos. A escolha desse material depende das características do processo como pressão, temperatura, vazão e viscosidade do fluido a ser transportado, além disso, há necessidade de conferir a compatibilidade entre o fluido transportado e o material a ser escolhido. E ainda, a comparação entre os materiais selecionados deve equilibrar o preço com os fatores de custo, para enfim, escolher o melhor investimento a longo prazo.

Além da escolha do material, o correto dimensionamento das tubulações permite o bom funcionamento do processo produtivo. Esse dimensionamento é referente ao diâmetro dos tubos, que varia em função da natureza do fluido, vazão, pressão, velocidade de escoamento e as perdas de carga durante o escoamento. Para boa execução do projeto, esses cálculos devem alcançar um ponto de equilíbrio entre custos e rendimento da produção.

Assim, o dimensionamento das tubulações será feito pelo conceito de diâmetro econômico, ou seja, reduzindo ao mínimo a soma dos custos de tubulação e energia. Para esse cálculo leva-se em conta a velocidade de escoamento dos fluidos, quando elevados acarretam danos aos equipamentos e quando demasiadamente lentos podem provocar depósito de sólidos nas linhas. Esse dimensionamento será realizado de forma terceirizada, pela empresa responsável pelo projeto hidráulico com supervisão direta pelos gestores do projeto em questão.

Os tubos mais utilizados industrialmente são constituídos de aço carbono, feito a partir de uma liga metálica, não corrosiva e com alta resistência. Essa liga possui aplicações como condução de líquidos, gases e oleodutos. Dentre seus benefícios está a boa resistência do material, a instalação rápida e simples, além de ser reciclável e não gerar emissão de gases para atmosfera, assim, considerado ecologicamente correto (TUBOS ABC, 2021). No presente projeto, o aço carbono será utilizado para transporte da biomassa algal, pois não é reativo com o material transportado.

Para a tubulação do poço artesiano o material será o aço galvanizado, devido suas peças serem mergulhadas em uma substância de zinco, essa liga possui maior resistência a agentes corrosivos, o que aumenta sua durabilidade (CAMPEZZA, 2021).

O material conhecido como PVC, policloreto de vinila, é um polímero indicado para tubulações de água fria. Assim, sendo o escolhido para o transporte de água ao longo do processo produtivo; para o transporte do meio de cultivo entre o tanque de mistura e os tanques de cultivo; e ainda, para transporte da solução de bicarbonato de sódio.

Por fim, a tubulação responsável pelo transporte de ar comprimido será constituída de PPR, polipropileno copolímero random. Esse material é considerado uma evolução dos tubos de PVC, que trazem melhor qualidade da rede de tubulação, deixando mínimas as chances de vazamento do fluido (TIGRE, 2021).

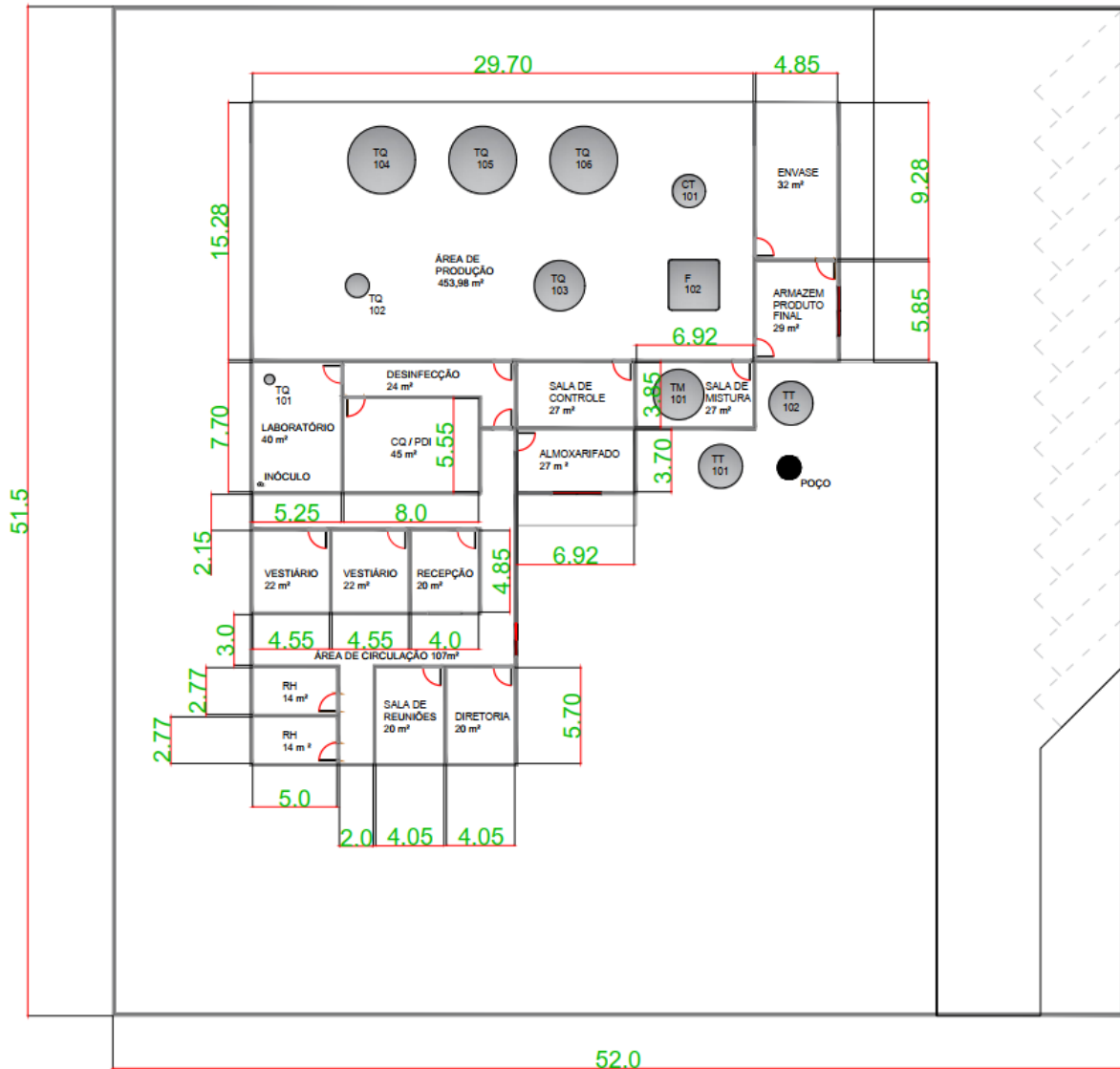
### 8.3 LAYOUT GERAL

O *layout* proposto para o projeto de indústria de produção de biomassa de *Chlorella vulgaris* está representado na Figura 21 com as cotas representadas em metros. A proposta contém todas as áreas úteis da indústria de maneira geral e, em maiores detalhes, a área produtiva. Toda a área produtiva estará coberta por uma estufa responsável pela manutenção da temperatura dos cultivos. Os tanques, apesar de aparentar possuir a mesma altura por estarem sendo representados em duas dimensões, porém, como explicado no dimensionamento, cada um possui altura diferente em relação aos demais.

A disposição dos setores foi determinada a fim de facilitar o fluxo do processo, mantendo próximas as áreas que possuem necessidade de estarem interligadas.

Os equipamentos dispostos no sistema produtivo seguiram a normativa NR-12 que trata da segurança no trabalho em máquinas e equipamentos (BRASIL, 2019). Assim, seguindo a norma, os equipamentos foram instalados facilitando o trânsito entre as operações e também obedecendo o limite de segurança de 2 metros de distância entre eles. Para construção do *layout* foi utilizado o *software* AutoCAD 2019, da Autodesk, Inc. (licença acadêmica).

Figura 21 - Planta baixa proposta para empresa Nutrialga



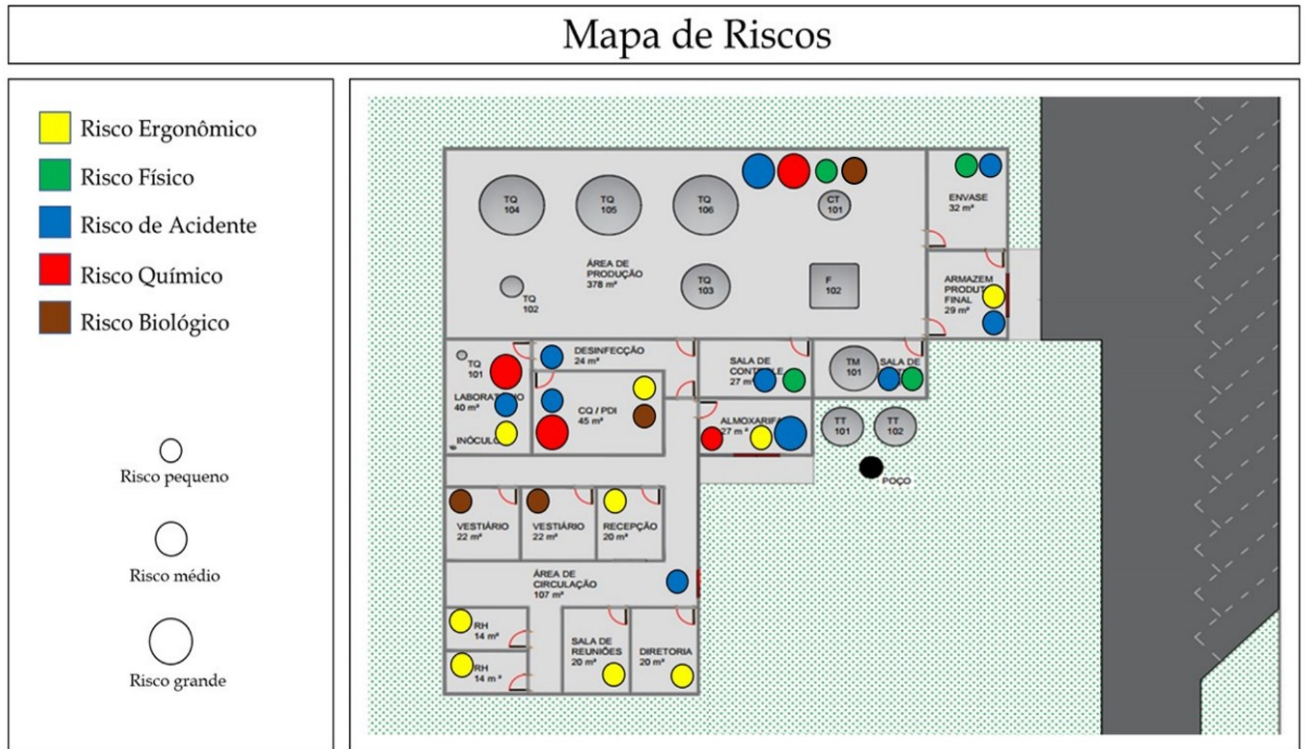
Fonte: Autores (2021).

#### 8.4 MAPA DE RISCO

No mapa de risco realizado para a indústria em questão serão apresentados os riscos atrelados a cada setor de produção de biomassa de *Chlorella vulgaris*. Utilizando o layout humanizado da indústria foram adicionadas as nomenclaturas atreladas aos cinco riscos, sendo eles os riscos ergonômicos (e.g. esforço físico excessivo, levantamento e transporte de peso, controle rígido de produtividade, postura inadequada, monotonia e repetitividade); mecânicos (e.g. probabilidade de incêndio e explosão, arranjo físico inadequado e armazenamento inadequado); físicos (e.g. ruído, calor, frio, pressão, umidade, radiações ionizantes e não-ionizantes e vibração); químicos (e.g. contaminação química por exposição a pele, ingestão ou

inalação nas formas de poeiras, gases, névoas, vapores ou líquidos); e biológicos (e.g. exposição a bactérias, vírus e/ou fungos). Na Figura 22 foram considerados todos os setores, com exceção dos estacionamento.

Figura 22 - Mapa de risco da empresa Nutrialgas



Fonte: Autores (2021).

## 9. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Antes de implementar uma indústria há necessidade de realizar a análise econômica, pois é nessa etapa que se determina se a proposta apresentada é viável ou não. Para fazer o estudo dessa área existe a Engenharia Econômica, responsável por estudar técnicas e ferramentas utilizadas para tomar decisões de investimento (HAFEMANN, 2017).

Para essa análise os custos são divididos em várias partes, mas de forma principal são divididos em Custo de Investimento e Custo de Manufatura. Sendo o primeiro responsável pela quantia gasta na instalação e organização dos componentes da indústria e início de funcionamento (*start-up*) e o segundo os responsáveis pelo funcionamento do processo produtivo.

No presente projeto, essa etapa foi realizada de forma preliminar, podendo exigir maiores especificações para uma tomada de decisão completa.

### 9.1 CUSTOS DE CONSTRUÇÃO

Os custos de instalação (CAPEX) são o montante do capital necessário para aquisição dos bens de capital que serão utilizados na construção e operação de uma planta industrial (HOFMANN et al., 2012). Para esses considera-se os custos referentes à compra de equipamentos, instrumentos, tubulações e utilidades necessárias para o processo, considerando custos de construção e instalação, inflação, fluxo de caixa, entre outros.

### 9.2 CUSTOS DO PROJETO

Para a cotação dos equipamentos considerou-se informações provenientes de diferentes fontes: (i) o portal online Matches (Matches Chemical Engineering, 2021), como uma estimativa preliminar e referencial e (ii) análise com vendedores diretos, buscando encontrar os menores valores e configurações mais adequadas para cada equipamento. Os preços obtidos são referentes há vários anos, assim, para cada ano foi necessário realizar ajustes para correção, de forma que todos pudessem condizer com o ano de 2021. Os ajustes são feitos através do Índice de Custo de Plantas de Engenharia Química (CEPCI), levando em consideração a variação do preço pela inflação. A Tabela 38 foi mostra os índices aplicados para o projeto em questão.



Tabela 38 - Valores do CEPCI utilizados na viabilidade econômica do projeto

Ano	CEPCI
2014	576,1
2020	723,4

Fonte: Chemical Engineering Online (2020).

Os índices apresentados foram aplicados na Equação 21:

$$\frac{C_2}{C_1} = \frac{I_2}{I_1} \quad (\text{Equação 21})$$

Em que:

C<sub>1</sub>: Custo referente a 2014 (R\$);

C<sub>2</sub>: Custo referente a 2021 (R\$);

I<sub>1</sub>: CEPCI de 2014 (-);

I<sub>2</sub>: CEPCI de 2021 (-).

Outro fator que influencia no valor dos equipamentos é a localização, atuando diretamente na diferença de preço dos produtos, na disponibilidade de mão-de-obra especializada para trabalhar com os equipamentos, infraestrutura, transporte dos mesmos, entre outros pontos. Assim, uma vez que o portal Matches utiliza a Costa do Golfo, EUA, como referencial, reajustes são necessários. Turton *et al.* (2008) lista alguns fatores adimensionais de localização, como o Brasil, cujo valor é de 1,14. Fator, esse, utilizado no projeto em questão através do balanço econômico expressado na Equação 22. Quando os equipamentos são adquiridos diretamente com fornecedores brasileiros, esse fator não entra no cálculo final, uma vez que não há necessidade de importar os equipamentos.

$$C_E = C_2 f_l \quad (\text{Equação 22})$$

Em que:

C<sub>E</sub>: Custo corrigido em relação a inflação e localização;

f<sub>l</sub>: Fator localização.

Por fim, a instalação, fator que também influencia na aquisição dos equipamentos. Towler & Sinott (2012) propuseram valores para processos que envolvam fluidos. Uma vez

que o fluxograma e o dimensionamento dos equipamentos estejam prontos, o fator de instalação pode ser estimado considerando os fatores de custo, como simplificado pela Tabela 39.

Tabela 39 - Fator de instalação utilizado na viabilidade econômica do projeto

<b>Equipamento</b>	<b>Fator de Instalação</b>
Compressores	2,5
Equipamentos diversos	2,5
Bombas	4,0
Instrumentos	4,0

Fonte: TOWLER; SINNOTT, 2012.

A instalação é aplicada ao processo pela Equação 23:

$$C_{TE} = \sum C_E f_i \quad (\text{Equação 23})$$

Em que:

$C_{TE}$ : Custo total do equipamento;

$C_E$ : Custo corrigido em relação a inflação e localização;

$f_i$ : fator instalação.

A Tabela 40 mostra os custos finais obtidos para cada equipamento, a quantidade de equipamentos presentes no processo e o custo total dos mesmos ( $C_{TE}$ ) em dólares. Devido à dificuldade de contactar fornecedores e de encontrar valores referentes ao custo dos equipamentos no Brasil, primeiramente os dados foram listados levando utilizando a ferramenta Matches, contudo, nesse banco de dados não foram encontrados os equipamentos exatos.

As metodologias para custeio dos equipamentos são estimativas generalistas e muitas vezes os índices não representam o valor real do equipamento (por exemplo, o fator de localização para o Brasil), ou seja, a realidade de valores encontradas no mercado real. Desta forma, sabe-se que estas são estimativas primárias as quais serão atualizadas para valores mais representativos nas etapas posteriores de projeto (isto é, no projeto detalhado).

Tabela 40 - Equipamentos, quantidade e custo total conforme o Matches

<b>Equipamentos</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo total (\$)</b>
Bombas (B-101/107)	7	300.610,94
C – 101	1	194.323,50
CT – 101	1	216.153,58
F – 102	1	1.266.502,50
<b>CTE</b>	<b>10</b>	<b>1.977.590,52</b>

Fonte: Autores (2021).

A Tabela 40 foi montada expressando equipamentos industriais que somente são obtidos a partir de fornecedores, ou seja, sem os tanques que visam ser construídos ao invés de comprados. Para as bombas o material utilizando como referência foi o ferro fundido; para o compressor e o filtro foi utilizado aço carbono; e para a centrífuga, aço inoxidável. As bombas utilizadas na simulação são do tipo centrífuga. Os tanques de cultivo, tratamento e mistura, presentes no projeto, serão projetados com estrutura de concreto, assim, necessitando apenas do custo do material para a análise.

Assim, o cálculo do material utilizado nos tanques foi feito a partir da espessura de cada um, sendo 15 cm para TQ – 102/103, pro TT – 101/102 e TM – 101; 20 cm para TQ – 104/105/106. Todos os tanques juntos totalizam 35,60 m<sup>3</sup> de volume, e o valor do metro cúbico de concreto é de R\$422,00, conforme orçamento (CONCRESUPER, 2021). Ainda, nesses equipamentos haverá revestimento com manta de fibra de vidro e resina para laminação, para isso serão utilizados aproximadamente 30 kg da manta, totalizando R\$1.048,00 de revestimento aos tanques. O TQ – 101 por ser de menor volume, foi considerado de plástico e cotado no valor de R\$150,00.

Por fim, foram cotadas as válvulas do tipo guilhotina, solenoides, que totalizam 27 unidades ao longo do processo. O material determinado para análise de custo desses dispositivos foi o ferro fundido, nessa condição o valor emitido pelo fornecedor foi de R\$567,00 por válvula (NET VAL, 2021).

Devido aos valores, obtidos na Tabela 40, buscou-se encontrar uma relação, em porcentagem, dos custos norte americanos e brasileiros. Para isso, os valores em dólares foram transformados em Real, sendo, no dia 8 de agosto de 2021, considerando o câmbio de R\$ 5,24 por US\$ 1,00; com esses valores em Real, e os fornecidos pelas empresas no Brasil, determinou-se uma redução de custos média de 98,70% em relação aos encontrados na ferramenta Matches. Assim, com essa porcentagem estabelecida, a quantidade de concreto determinada e as válvulas orçadas, a Tabela 41 foi montada como forma de simular os custos em território nacional.

Ainda, foram descontados o fator localização para os equipamentos cotados pelo Matches e adicionados o fator instalação para os tanques e as válvulas, conforme a Tabela 39.

Tabela 41 - Equipamentos, quantidade e custo total simulado para o Brasil

<b>Equipamentos</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Custo total (R\$)</b>
Bombas	7	20.477,61
C – 101	1	13.249,75
CT – 101	1	14.724,38
F – 102	1	86.274,15
Tanques	9	38.751,45
Válvulas	27	61.236,00
<b>CTE</b>	<b>46</b>	<b>234.713,34</b>

Fonte: Autores (2021).

Assim, como mostrado demonstrado nas Tabelas 40 e 41, a diferença de custo entre a base de dados da ferramenta Matches e a simulação para o Brasil é grande, o que pode interferir na aplicação do projeto em questão. Apesar disso, a Tabela 41 traz valores mais condizentes com a realidade, ressaltando o valor teórico e referencial da ferramenta Matches.

### 9.2.1 Custo do Terreno

A localização é um dos fatores a ser levado em consideração nos custos pois influencia na diferença de preços, disponibilidade de mão de obra especializada, infraestrutura, transporte, mercado consumidor, dentre outros fatores já mencionados no Item 4 desse projeto (Estudo da Localização).

A área encontrada que se adéqua às necessidades do projeto industrial, situa-se na Rodovia PR – 317, km 02, próximo a CMIX Mineração Ltda – Pedreira. O terreno pode ser visto com mais detalhes na Figura 23. De acordo com a Lei Municipal N°2.233 de 16 de setembro de 2016, o Art. 41 define a região da pedreira como zoneamento urbano. O Art. 6, por sua vez, permite a utilização de zonas rurais para industriais definidas no inciso III do artigo 56 da mesma lei, o qual enquadra a indústria aqui apresentada como adequada para se instalar na zona rural escolhida (TOLEDO, 2016).

Figura 23 – Imagem de satélite do terreno de instalação da indústria com perímetro e área representados



Fonte: Google Earth, 2021.

O custo médio para compra do terreno, segundo o mercado imobiliário local, é de R\$320,36 por metro quadrado, sendo 2.690,31 m<sup>2</sup> a área total do terreno.

### 9.2.2 Custo do Poço Artesiano

Para o cálculo do custo do poço artesiano foi levado em consideração o valor médio de R\$250,00 por m<sup>2</sup> e a média de 60 metros de profundidade. Com a profundidade escolhida, o poço é considerado semiartesiano, nesse caso necessita de tratamento, como já proposto no projeto em questão (PERFURARTE, 2020).

Ainda, na determinação desse preço estão inclusos o orçamento da empresa cotada para o serviço; a legislação envolvida na autorização da perfuração; o material de revestimento; o diâmetro de perfuração; a profundidade escolhida; o conjunto de bombeamento; e a outorga de uso da água. Assim, contando com a média encontrada, o poço sugerido para o projeto em questão tem um valor total de R\$15.000,00.

### 9.2.3 Custo de Capital Total

Para o cálculo do custo total foi considerado o custo dos equipamentos em território nacional, o custo da aquisição do terreno e o capital de giro, que corresponde a 15% da soma do custo total de equipamentos, do poço artesiano e do terreno (TOWLER; SINNOTT, 2012).

Para melhor visualização, os valores referentes às despesas em bens de capital (CAPEX) estão demonstrados na Tabela 42.

Tabela 42 - Custo de capital total (CAPEX)

<b>Tipos de custo</b>	<b>Custo (R\$)</b>
Custo total de equipamentos	234.713,34
Poço Artesiano	15.000,00
Terreno	861.867,71
Capital de Giro	166.737,16
<b>CAPEX</b>	<b>1.278.318,21</b>

Fonte: Autores (2021).

### 9.3 CUSTOS DE OPERAÇÃO

Os valores referentes às despesas operacionais (OPEX) são as despesas operacionais de um processo, ou seja, as que estão diretamente ligadas as necessidades do projeto para que esse possa produzir seu produto de interesse. Podem ser divididos em custos fixos e custos variáveis.

#### 9.3.1 Custos Fixos

Os custos fixos envolvem as despesas de organização, administração, mão de obra e depreciação de equipamentos. Para determinar o número de operadores, considerou-se que a empresa trabalhará com um turno, sendo necessário manter apenas o cargo de vigia no integral. Para tal utilizou-se da Equação 24 (TURTON, 2008):

$$N_{OL} = (6,29 + 31,7P^2 + 0,23N_{np})^{0,5} \quad (\text{Equação 24})$$

Em que:

$N_{OL}$  = Número de operadores por turno;

$P$  = Etapas do processo envolvendo sólidos particulados;

$N_{np}$  = Etapas de processamento não particulados.

Com a Equação 24, determinou-se que o número de operadores por turno seria de 22, contudo, para o presente projeto esse valor se torna inviável pois a empresa Nutrialgas não demanda tantos trabalhadores. Para tornar o cálculo dos custos mais realista, considerou-se o número de trabalhadores como 10, levando em conta tanto os trabalhadores do processo

produtivo (4) quanto os administrativos (6). Para os cargos administrativos levou-se em consideração gestão e desenvolvimento de recursos humanos; administração de produção e serviços; tesouraria; gestão de compras, vendas e cobranças; e o controle de qualidade.

Além do número de trabalhadores é necessário determinar o salário e os custos com encargos trabalhistas, esses correspondentes a 32,82% dos salários (Guia Trabalhista, 2021). E assim, se obtém o custo da mão-de-obra ( $C_{OL}$ ) do projeto, mostrado na Tabela 43. Para determinar o salário dos operadores foi utilizado como base o valor do salário mínimo nacional de R\$1100,00, conseqüentemente, os encargos ficaram em R\$361,02 por operador.

Tabela 43 - Custo da mão-de-obra mensal

Número de turnos	1
Quantidade de operadores	10
Salário de cada operador (R\$)	1.100,00
Encargos trabalhistas total (R\$)	3.610,20
<b>Custo total da mão de obra (R\$)</b>	<b>14.610,20</b>

Fonte: Autores (2021).

Partindo do custo total da mão de obra, obtém-se os custos de supervisão (18% do  $C_{OL}$ ), suprimentos operacionais (6%) e laboratoriais (10%). Ainda, os custos de manutenção (10% do Capital Fixo de Investimento ou FCI), taxas e seguros (1,4%) (TURTON, 2008). Também há os custos indiretos da planta que simbolizam 50% da soma dos custos de mão de obra, supervisão e manutenção, e os custos administrativos (15%). Finalizando, os custos de venda, distribuição, pesquisa e desenvolvimento foram considerados como 2 e 5% do custo total de operação, respectivamente. A Tabela 44 mostra os custos fixos de operação.

Tabela 44 - Custos fixos de operação mensal

<b>Fator</b>	<b>Custo mensal (R\$)</b>
Mão de obra	14.610,20
Supervisão	2.629,84
Suprimentos operacionais	876,61
Suprimentos laboratoriais	1.461,20
Manutenção	109.658,11
Taxas e seguros	15.352,13
Custos indiretos	63.449,08
Administração	19.034,72
Venda e distribuição	4.541,44
Pesquisa e desenvolvimento	11.353,59
<b>Total</b>	<b>242.966,92</b>

Fonte: Autores (2021).

### 9.3.2 Custos Variáveis

Representa os custos que podem variar com a taxa de produção, para esse projeto serão consideradas as principais utilidades e insumos do processo. A matéria-prima utilizada no cultivo da biomassa é o NPK 20:20:20, cuja demanda é de aproximadamente 200 kg por ano, sendo R\$149,90 o preço de referência (AGROCLIQUE, 2021). Além do fertilizante, foi estimado o gasto anual de energia elétrica e das embalagens, a água por sua vez não será contabilizada pois o projeto dispõe de um poço artesiano.

A determinação do custo de energia elétrica foi realizado em duas partes: na primeira levantou-se o custo de energia elétrica para os equipamentos do processo produtivo (bombas, centrífuga, filtro rotativo, compressor de ar, painel de controle e agitação mecânica de alguns tanques) com base nas horas de funcionamento e potência dos mesmos; e segundo, o custo para a parte administrativa da empresa, ou seja, o custo com computadores, ar condicionado, impressora, equipamentos do laboratório, etc. A empresa em questão será enquadrada como Grupo B – Rural, ou seja, empresas com tensão exigida menor que 2,3 kV. Para esse grupo o custo do kWh é de R\$ 0,39338 conforme Resolução nº 2.559, de 18 de junho de 2019.

Enquanto o cálculo das embalagens foi considerado o valor R\$19,37 para bombonas de 10 L como encontrado no fornecedor (FILTROS CURITIBA, 2021). E assim, anualmente serão utilizadas 21.960 embalagens para 219.600 L de cultivo, como resumido na Tabela 45.

Tabela 45 - Custos variáveis de operação

<b>Fatores</b>	<b>Custo (R\$/ano)</b>
Eletricidade	26.299,87
NPK	29.980,00
Embalagem	425.365,20
<b>Total</b>	<b>481.645,07</b>

Fonte: Autores (2021).

Com os custos de operação determinados, obteve-se o custo de operação total (OPEX), e conseqüentemente o preço do produto, mostrados na Tabela 46. Para cálculo do custo geral do produto, em litros, os valores obtidos ao longo da análise de custo foram normalizados para 1 ano de funcionamento do processo produtivo. Essa normalização foi feita devido a diferença de produção ao longo do ano, uma vez que por ser batelada alimentada a quantidade final de produto muda a cada 8 dias de cultivo.

Ainda, para determinação dos custos de operação (OPEX), foi levado em consideração a produção anual da biomassa, ou seja, 219.600 L, como mencionado 4.3.5 desse projeto. Para



estabelecer o preço de venda do produto, foi determinado o percentual de 35% de lucro em relação ao custo geral do produto.

Tabela 46 – Custo de operação total (OPEX)

	<b>Custo (R\$)</b>
Custos fixos	2.915.963,04
Custos variáveis (anual)	481.645,07
<b>OPEX (anual)</b>	<b>3.397.608,11</b>
<b>Custo geral do produto (R\$/L)</b>	<b>15,47</b>
<b>Preço estabelecido (R\$/L)</b>	<b>20,88</b>

Fonte: Autores (2021).

### 9.3.3 Comparação de preço do concentrado microalgal com zooplanctons

Como forma de visualizar a concorrência do mercado, nesse tópico será feita a comparação entre o preço do concentrado de microalgas e zooplanctons, utilizados na alimentação de larvas de peixes. Para isso, a Tabela N resume as fontes nutricionais, o consumo diário para cada fonte, levando em consideração todo o potencial de mercado do projeto em questão e o gasto mensal (4 semanas) que os produtores possuem com cada tipo de fonte. Ressaltando que o uso de ambas as fontes ocorre 2 vezes por semana na larvicultura de peixes.

O valor comercial do zooplâncton foi obtido de fornecedores online, sendo de R\$96,35 cada frasco contendo 250 mL (AMAZON, 2021).

Tabela 47 – Fontes nutricionais para larvas de peixe e respectivos consumo diário e gasto mensal do produtor

<b>Fonte nutricional</b>	<b>Consumo diário (L)</b>	<b>Custo (R\$)</b>
Concentrado de microalga	1600	267.264,00
Zooplâncton	1333	4.109.905,60

Fonte: Autores (2021).

## 9.4 FLUXO DE CAIXA

Para o fluxo de caixa, alguns conceitos se fazem necessários, como forma de analisar a viabilidade do projeto em questão.

### 9.4.1 *Payback*

Segundo Ferreira (2020), *Payback* é um método básico para a análise de um investimento, esse cálculo determina o tempo necessário para recuperar o valor investido. Seu

cálculo é feito através da soma dos rendimentos auferidos, período por período, até que atinja o valor do investimento inicial.

#### 9.4.2 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A TIR é uma métrica utilizada para analisar o percentual de retorno financeiro de um projeto. Para cálculo dessa taxa é necessário conhecer a variação do dinheiro no tempo, uma vez que nessa é utilizada a relação entre juros e tempo (NEXOOS, 2021).

#### 9.4.3 Valor Presente Líquido (VPL)

Calculando o valor presente líquido também é possível analisar os investimentos realizados. Nessa análise as entradas e saídas do fluxo de caixa, em um determinado período, são convertidas em valores presentes para serem comparadas ao investimento inicial. O período é determinado pela vida do projeto (WARREN, 2020).

#### 9.4.4 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

A taxa mínima de atratividade é uma taxa de desconto sobre os valores, que representa o retorno mínimo que um investimento deve gerar para ser considerado atrativo. Trata-se de uma taxa de juros que representa o valor mínimo que o investidor deseja ganhar quando aplica seus recursos, ou o máximo que está disposta a pagar quando faz um financiamento, em outras palavras, mostra quanto dinheiro vai ganhar considerando o investimento feito (GARRÁN, 2021).

#### 9.4.5 Relação Custo-Benefício (RCB)

A análise de custo-benefício é uma avaliação dos custos e dos benefícios econômicos de um determinado projeto em relação a um cenário base. Os principais objetivos dessa análise são a maximização dos benefícios para um dado conjunto de custos; maximização de benefícios quando tanto os benefícios quanto os custos variam; e minimização dos custos para atingir um certo nível de benefícios (DIAS, 2021).

#### 9.4.6 Fluxo de caixa e indicadores econométricos

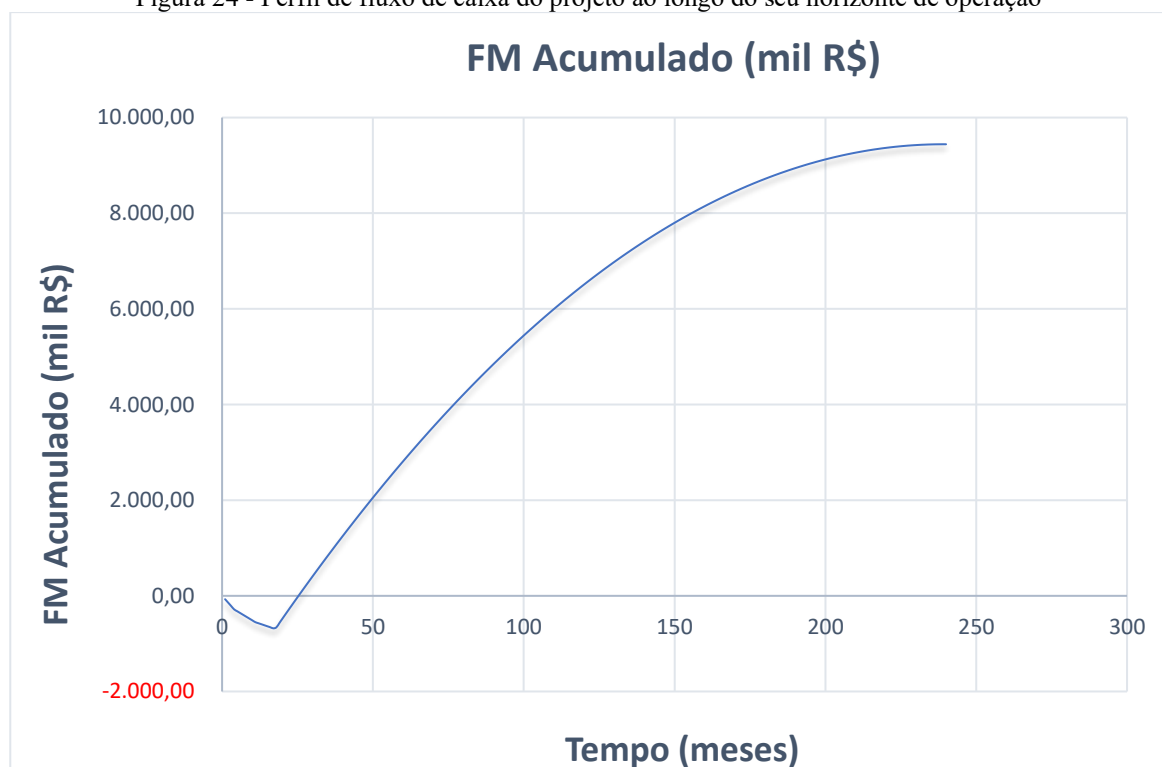
Baseado no trabalho de Souza *et al.* (2019), foi considerada uma depreciação de 0,35% ao mês e a vida útil da empresa em 20 anos, pois o presente projeto é considerado de mais fácil instalação e operação que muitos processos industriais, visto a simplicidade dos tanques e número baixo de equipamentos utilizados acarretando assim na baixa depreciação apresentada. A Tabela 48 apresenta os resultados dos indicadores econômicos avaliados, atestando a viabilidade do projeto, assim como o gráfico mostrado na Figura 24.

Tabela 48 - Indicadores econômicos do projeto

<b>Payback</b>	26 meses
<b>TIR</b>	6,23% ao mês
<b>TMA</b>	0,50% ao mês
<b>RCB (VP)</b>	1,1609 R\$/R\$
<b>VPL</b>	R\$ 5.946.430,17
<b>Fluxo monetário acumulado</b>	<b>R\$ 9.441.956,00</b>

Fonte: Autores (2021).

Figura 24 - Perfil de fluxo de caixa do projeto ao longo do seu horizonte de operação



Fonte: Autores (2021).

Com esses parâmetros econômicos, é possível visualizar que o projeto em questão apresenta viabilidade, vide relação custo-benefício em valor presente ( $RCB = 1,1609 \text{ R\$/R\$}$ ) o qual indica que os benefícios/receitas do projeto são maiores que os custos ( $RBC > 1$ ). O tempo de retorno do investimento (*payback*) é de 2 anos e 2 meses, um tempo considerado baixo. É possível avaliar também a viabilidade econômica do processo ao comparar o valor da Taxa Interna de Retorno (TIR) e a Taxa Mínima de Atratividade (TMA). Caso a TIR seja maior que o TMA o processo é considerado viável, pois desse modo os retornos estão sendo maiores que o mínimo desejado. Ainda, o valor presente líquido atestado indica que o mesmo apresenta baixo investimento em relação ao retorno obtido futuramente.

## 10. CONCLUSÕES

O presente projeto possibilitou maior entendimento sobre o processo produtivo para obtenção de biomassa de *Chlorella vulgaris*, além da aplicação interdisciplinar dos conceitos adquiridos no curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, uma vez que na área de projetos industriais o tema escolhido apresenta limitações em conteúdo. Além de consultas à literatura, o projeto foi desenvolvido com o auxílio de referências externas, como profissionais da área de aquicultura, tornando possível a realização de uma pesquisa de potencial de mercado; a idealização e construção de um fluxograma de produção com as etapas necessárias ao cultivo da microalga *Chlorella vulgaris*; e, a partir disso, o dimensionamento de equipamentos, demanda de matéria-prima e insumos.

Embora o projeto de indústria proposto se trate de um projeto preliminar, tanto em questões estruturais quanto econômicas, a viabilização do projeto se mostrou satisfatória, visto que a empresa alcançaria um retorno financeiro em um prazo de 2 anos e 2 meses, considerado um retorno financeiro em curto prazo quando comparado com os custos de investimento no complexo industrial.

De maneira geral, o projeto preliminar de uma indústria para produção de biomassa de *Chlorella vulgaris* com a aplicação voltada para a piscicultura na região do Paraná apresentou indicadores econométricos favoráveis, o que demonstra o elevado potencial desse produto no mercado. No entanto, existem possibilidades a serem discutidas em estudos posteriores a fim de baratear os custos do processo produtivo e tornar o produto final cada vez mais acessível aos produtores de peixes.

Dentre as possibilidades mencionadas estão a substituição da matéria-prima, utilizando os efluentes de piscicultura e aquicultura como fonte de carbono para os cultivos de microalgas; a utilização de um mix de microalgas, que além de melhorar a resistência das células pelo crescimento em simbiose ainda fornecerá um maior teor nutritivo aos organismos aquáticos; a implementação de sistema de iluminação artificial, uma vez que a adição de novos períodos fotossintéticos pode acarretar em maiores concentrações finais de biomassa ao fim do processo (i.e. maior produtividade); e por fim, a venda de créditos de carbono e realização de parcerias com empresas, como cimenteiras, que contribuiriam com o CO<sub>2</sub>, considerando o efluente do seu processo industrial.

Por fim, com o projeto de indústria na área de biomassa microalgal, incluindo equipamentos necessários para obtenção do concentrado de microalga, valor nutritivo que a alimentação natural fornece aos organismos aquáticos e a melhoria na qualidade dos produtos

finals, é possível notar o grande potencial para ampliação do mercado consumidor. Passando a atender, dessa forma, a produção de larvas de peixes e ainda vários setores da aquicultura como na alimentação de ostras, camarões e cavalos-marinho. Sendo assim, são necessários estudos posteriores experimentais a fim de validar a proposta de produção do concentrado de *Chlorella vulgaris*, além de comprovar o aumento da qualidade dos organismos aquáticos comercializados.

## REFERÊNCIAS

- ACIÉN, F. G., FERNÁNDEZ, J. M., GRIMA, E. M. *Costs analysis of microalgae production. In: Biomass, Biofuel and Biochemicals*. 2 ed. Elsevier, 2019, p. 551-565.
- ACIÉN, F. G., FERNÁNDEZ, J. M., MAGÁN, J. J., MOLINA, E. Production cost of a real microalgae production plant and strategies to reduce it. **Biotechnology Advances**. v. 30, n. 6, p. 1344-1353, 2012.
- ACIÉN, F. G., SERRANO, C. G., AMARAL, M. M. M., FERNÁNDEZ, J. M., GRIMA, E. M. Wastewater treatment using microalgae: how realistic a contribution might it be to significant urban wastewater treatment? **Applied Microbiology and Biotechnology**. v. 100, n. 21, p. 9013-9022, 2016.
- AGROCLIQUE. **Fertilizante Plantafol – Valagro – NPK Foliar 20 – 20 – 20 1 kg**. Salto, 2021. Disponível em: <<https://agroclique.com.br/produto/fertilizante-plantafol-valagro-npk-foliar-20-20-20-pacote-1kg/>>. Acesso em: 08 de ago. 2021.
- ALAM, Md. A.; WANG, Z. **Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment**. Editora Springer Nature Singapore Pte Ltd., pg. 569 – 634, 2019.
- ALGASUL. **Biotecnologia e nutrição**. Disponível em: <<https://www.algasul.com.br/>> Acesso em: 08 de ago. 2021.
- AMAZON, **Seachem Reef Zooplankton 250 mL Alimento Corais Reef Marinho Seachem Para Peixes**. Acessórios para Aquário, 2021. Disponível em: <[https://www.amazon.com.br/Seachem-Zooplankton-Alimento-Corais-Marinho/dp/B004YLLJ2I2/ref=pd\\_day0\\_1/143-3686931-7899111?pd\\_rd\\_w=nQsV&pf\\_rd\\_p=f8fbb395-09a0-46a4-a17c-8f7cd5155e6a&pf\\_rd\\_r=PTJ3DF6090SYJTRJ53KX&pd\\_rd\\_r=b05dfd42-5d94-4758-bd40-58d41ecc924f&pd\\_rd\\_wg=WJopi&pd\\_rd\\_i=B004YLLJ2I2&psc=1](https://www.amazon.com.br/Seachem-Zooplankton-Alimento-Corais-Marinho/dp/B004YLLJ2I2/ref=pd_day0_1/143-3686931-7899111?pd_rd_w=nQsV&pf_rd_p=f8fbb395-09a0-46a4-a17c-8f7cd5155e6a&pf_rd_r=PTJ3DF6090SYJTRJ53KX&pd_rd_r=b05dfd42-5d94-4758-bd40-58d41ecc924f&pd_rd_wg=WJopi&pd_rd_i=B004YLLJ2I2&psc=1)>. Acesso em: 19/08/2021.
- AMMAR, S. H. Cultivation of Microalgae *Chlorella vulgaris* in Airlift photobioreactor for Biomass Production using commercial NPK Nutrients. **Al-Khwarizmi Engineering Journal**, vol. 12, n. 1, p. 90-99, 2016.
- AMOTZ, B. A. *Industrial production of microalgal cell-mass and secondary products – major industrial species – Dunaliella*. In: **Handbook of microalgal culture**. 1 ed. Blackwell, Oxford, 2004, p. 273-280.
- ANDRADE, D. S., FILHO, C. A. **Microalgas de águas continentais**. v. 1, Londrina: IAPAR, 2014.
- ANDRADE, M. R.; COSTA, J. A. V. Cultivo da microalga *spirulina platensis* em fontes alternativas de nutrientes. **Ciênc. agrotec.**, Lavras, v. 32, n. 5, p. 1551-1556, set./out., 2008.

ANDRADE, D. S. et al. The Brazilian microalgae production chain and alternatives for its consolidation. **Journal of Cleaner Production**. v. 250, 2020.

ARAÚJO, M. T. **Cultivo intensivo da tilápia do Nilo *Oreochromis niloticus* suplementado com microalga *Chlorella vulgaris* em sistema de bioflocos**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura, Recife, 2018.

ASKEW, K. **Unilever and Algenuity discuss the potential of microalgae: ‘Algenuity’s technology unlocks a wealth of food applications’**. Disponível em: <<https://www.foodnavigator.com/Article/2020/07/30/Unilever-and-Algenuity-discuss-the-potential-of-microalgae-Algenuity-s-technology-unlocks-a-wealth-of-food-applications>>. Acesso em: 27 de jul. de 2021.

AVERSARI, M. **Aquicultura de microalgas: uma proposta para a melhoria na qualidade de vida de pescadores do nordeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

BÉCHET, Q., SHILTON, A., FRINGER, O. B., MUNÕZ, R., GUIEYSSE, B. Mechanistic modelling of broth temperature in outdoor photobioreactors. **Environmental Science and Technology**, v. 44, n. 6, p. 2197-2203, 2010.

BECKER, W. *Microalgae in human and animal nutrition*. In: **Handbook of microalgal culture**. Blackwell, Oxford, p. 312-351, 2004.

BEHRENS, P. W. *Photobioreactors and fermenters: the light and dark side of growing algae*. In: **Algal Culturing Techniques**. Burlington: Elsevier Academic Press, 2005. p. 189-203.

BEZERRA, J. H. C. **Produção da microalga *Nannochloropsis oculata* e seu uso como aditivo na ração do camarão *Litopenaeus vannamei***. Tese (Doutorado em Ciências Marinhas Tropicais). Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, 2020.

BOROWITZKA, M. A. Commercial production of microalgae: ponds, tanks, tubes and fermenters. **Journal of Biotechnology**. v. 70, p. 313-312, 1999.

BOROWITZKA, M. A. High-value products from microalgae: their development and commercialization. **Journal of Applied Physics**. v. 23, n. 3, p. 743-756, jan. 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução nº 2.559, de 18 de junho de 2019**. Homologa o resultado do Reajuste Tarifário Anual de 2019, as Tarifas de Energia – TE e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição – TUSD referente à Copel Distribuição S/A. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/reh20192559ti.pdf>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

BRASIL. Agência Reguladora de Serviços Públicos Delegados do Paraná. **Resolução nº 015, de 15 de abril de 2021**. Homologa a tarifa preliminar da 1ª Fase da 2ª Revisão Tarifária Periódica do saneamento básico. Disponível em: <<https://www.legislacao.pr.gov.br/legislacao/listarAtosAno.do?action=exibir&codAto=25093>>



9&indice=1&totalRegistros=30&anoSpan=2021&anoSelecionado=2021&mesSelecionado=0&isPaginado=true>. Acesso em: 08 ago. 2021.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde. **Manual de Cloração de Água em Pequenas Comunidades Utilizando o Clorador Simplificado Desenvolvido pela Funasa**. Fundação Nacional de Saúde – Brasília: Funasa, 2014.

BRASIL. **NR-12: Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. 2020. Disponível em: <<https://www.gov.br/trabalho/pt-br/inspecao/seguranca-e-saude-no-trabalho/normas-regulamentadoras/nr-12.pdf/view>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

BRITO L. O. *et al.* Effects of two commercial feeds with high and low crude protein content on the performance of white shrimp *litopenaeus vannamei* raised in an integrated biofloc system with the seaweed *gracilaria birdiae*. **Spanish Journal of Agriculture Research**, v. 16, n. 1, p. 1-7, 2018.

BUX, F. Biotechnological Applications of Microalgae. **International e-Journal of Science, Medicine and Education**. v. 6, p. 24-37, 2013.

CAMPEZZA. **Tubo edutor para poço artesiano**. Campezza Irrigação e Equipamentos. Disponível em: <<https://www.campezza.com.br/tubo-edutor-poco-artesiano>>. Acesso em: 25 jul. 2021.

CAVALCANTI, D. L. **Potencial Biotecnológico de *Chlorella vulgaris*: aplicação em biocélulas a combustível fotossintética, produção de energia e sequestro de CO<sub>2</sub>**. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Pernambuco – Centro de Ciências Biológicas, Recife, 2016.

ÇENGEL, Y. A., BOLES, M. A. **Thermodynamics: An engineering approach**. Mc.Graw Hill Education, 8 ed. 2014.

CHA, K. H., KANG, S. W., KIM, C. Y., UM, B. H., NA, Y. R., PAN, C. H. Effect of Pressurized Liquids on Extraction of Antioxidants from *Chlorella vulgaris*. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 58, p. 4756-4761, 2010.

CHEMICAL ENGINEERING ONLINE. **The chemical engineering plant cost index**. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/cepci-august-2020-pdf-free.html?fbclid=IwAR1Ya0ecGevkhMt7jEG3CCiGVvt269GifYwdEpZRcZgkASUXZSZi8AH6qfA>>. Acesso em: 31 jul. 2021.

CHEW, K. W *et al.*, Effects of water culture medium, cultivation systems and growth modes for microalgae cultivation: A review. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 9, n. 8, p. 1-13, 2018.

CHISTI, T. Biodiesel from microalgae. **Biotechnology Advances**. v. 25, p. 294-306, 2007.

CHOI, H. I; et. al. Performance and potential appraisal of various microalgae as direct combustion fuel. **Bioresource Technology**, 273, (2019), 341–349.

CHU, W. L. Biotechnological applications of microalgae. **International e-Journal of Science, Medicine & Education**, v. 6, p. 24-37, 2012.

CLIMA TEMPO. **Climatologia em Curitiba - Paraná**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/271/curitiba-pr>. Acesso em: 21 jul. 2021.

CLIMA TEMPO. **Climatologia em Toledo - Paraná**. Disponível em: <https://www.climatempo.com.br/climatologia/1336/toledo-pr>. Acesso em: 21 jul. 2021.

COÊLHO, D. F. *et al.* **Microalgae: Cultivation Aspects and Bioactive Compounds**. **Braz. arch. biol. technol.**, Curitiba, v. 62, jun. 2019.

CORNET, J. F. Le technoscope: les photobioréacteurs. **Biofutur**. v. 176, p. 1-10, 1998.

CORNÉLIO, J. P. S. **Isolamento e produção de *Chlorella sp* (CHLOROPHYCEAE) e *Moina sp.* (CLADOCERA) para utilização na larvicultura de Matrinxã (*Brycon amazonicus*)**. Dissertação (Mestrado em Aquicultura) – Universidade Nilton Lins, 2012.

CORRÊA, H. L. **Administração de produção e operações: manufatura e serviços: uma abordagem estratégica**. 4 ed. São Paulo:Atlas,2019.

COSTA, F. T. M. **Influência da utilização da microalga *Chlorella sp.* durante a reversão sexual da Tilápia do Nilo (*Oreochromis niloticus*)**. Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Engenharia de Pesca, Fortaleza, 2010.

CONCRESUPER; **Orçamentos**. Super tecnologia em concretos, 2021. Disponível em: <<https://congresuper.com.br/contato/orcamentos/>>. Acesso em: 05 ago. 2021.

DENNER, R. B. Aplicações biotecnológicas das microalgas. **Revista Panorama da Aquicultura**. 2006. Disponível em: <<https://panoramadaaquicultura.com.br/aplicacoes-biotecnologicas-das-microalgas/>>. Acesso em: 08 mai. 2021.

DIAS, J; **Análise de Custo-Benefício**. Engenharia 360, 2021. Disponível em: <<https://engenharia360.com/aprenda-usar-analise-custo-beneficio-na-avaliacao-de-projetos/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

DINESHBABU, G.; et al. Microalgae–nutritious, sustainable aqua- and animal feed source. **Journal of Functional Foods**. v. 62. 2019.

DIRECT INDUSTRY, **Guia de compras: Que válvula escolher?** Marselha, 2021. Disponível em: <<https://guide.directindustry.com/pt/que-valvula-escolher/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

EMPREENDEDOR. **Ocean Drop é a nova investida do fundo Caravela Capital**. Disponível em: <<https://empreendedor.com.br/noticia/ocean-drop-e-a-nova-investida-do-fundo-caravela-capital/>> Acesso em 07 ago. 2021.

FALCÃO, L. T. G. N. **Efeito da *Chlorella sp.* na dieta de larvas de paulistinha (*Danio rerio*)**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Pesca) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, 2018.

FERNANDES, T. V., SHRESTHA, R., SUI, Y., PAPINI, G., ZEEMAN, G. Closing domestic nutrient cycles using microalgae. **Environmental Science & Technology**. v. 49, n. 20, 2015.

FERREIRA, R.; **O que é o Payback?** Sociedade do Investidor, 2020. Disponível em: <<https://sociedadedoinvestidor.com.br/financas/payback/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

FEUGA, M. A. Microalgues marines. **Les enjeux de la recherche**. Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer, Plouzané, 1996.

FILTROS CURITIBA. **Bombona industrial – PEAD Natural – Homologada – 10 litros – P70 – B10LRT63001**. Curitiba, 2021. Disponível em: <[https://www.filtrosctba.com.br/loja/index.php?route=product/product&product\\_id=1100](https://www.filtrosctba.com.br/loja/index.php?route=product/product&product_id=1100)>. Acesso em: 08 ago. 2021.

FLOTTWEG SE. **Separador Flottweg**. Disponível em: <[https://www.flottweg.com/fileadmin/user\\_upload/data/pdf-downloads/Separator-PTB.pdf](https://www.flottweg.com/fileadmin/user_upload/data/pdf-downloads/Separator-PTB.pdf)>. Acesso em: 08 ago. de 2021.

(FAO) FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of world fisheries and aquaculture**. Rome, 2016. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/a-i5555e.pdf>>. Acesso em 30 mai. 2021.

(FAO) FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS *et al.* **The state of food security and nutrition in the world 2017. Building resilience for peace and food security**. Rome, 2017. Disponível em: <<https://www.fao.org/3/a-I7695E.pdf>>. Acesso em 30 mai. 2021.

GALANTE, J. R. A. **Indução da carotenogênese em *Chlorella sp.* para alteração da cor da biomassa**. Relatório de Estágio (Mestrado), Biotecnologia dos Recursos Marinhos, 2018.

GARRÁN, F.; TMA – Taxa Mínima de Atratividade. Mundo Financeiro, Finanças, 2021. Disponível em: <<https://www.mundofinanceiro.com.br/taxa-minima-de-atratividade/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

GERALDES, V. S. M. **Utilização da *Nannochloropsis oculata* (Droop) Hibberd, 1981 (viva, concentrada e liofilizada) no cultivo do linguado, *Solea senegalensis* Kaup, 1858: Enriquecimento do alimento vivo e cultivo em "água verde"**. Mestrado em Pesca e Aquicultura, Universidade de Lisboa, Faculdade de Ciências, Departamento de Biologia Animal, Lisboa, 2007.

GONZÁLEZ, G. M., MORENO, J., MANZANO, J. C., FLORENCIO, F. J., GUERRERO, M. G. Production of *Dunaliella salina* biomass rich in 9-cis- $\beta$ -carotene and lutein in a closed tubular photobioreactor. **Journal of Biotechnology**. v. 115, p. 81-90, 2005.

GUIA TRABALHISTA; **Cálculos de encargos sociais e trabalhistas**. Curitiba, 2021. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/tematicas/custostrabalhistas.htm>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

GUIL-GUERRERO, J. L., JUÁREZ, N. R., MARTÍNEZ, J. C. MADRID, C. P., FUENTES, R. M. M. Functional properties of the biomass of three microalgal species. **Journal of Food Engineering**. v. 65, p. 511-517 (2004).

GRAEFF, A. *et al.*, Cultivo de carpa comum (*Cyprinus carpio L.*) em recria com oferta de alimentos naturais como *Chlorella minutissima* em comparação com dejetos orgânicos e ração comercial. **Revista Eletrônica de Veterinária**. v. 13, n. 11, 2012.

HOEGH-GULDBERG, O. *et al.*, **Reviving the Ocean Economy: the case for action** – 2015, Geneva: WWF, 2015. Disponível em: <<https://goo.gl/GtqLgT>>. Acesso em: 30 mai. 2021.

HOFMANN, E.; MAUCHER, D.; HORNSTEIN, J.; DEN OUDEN, R. **Capital equipment purchasing: Optimizing the total cost of CapEx sourcing**. Springer Science & Business Media, 2012.

IDR-PARANÁ. **Psicultura**. Paraná, 2021. Disponível em: <http://www.idrparana.pr.gov.br/Pagina/Piscicultura#>. Acesso em 29 mai. 2021.

JENSEN, G. S., GINSBERG, D. I., DRAPEAU, M. S. Blue-green algae as an immune-enhancer and biomodulator. **Journal of the American Nutraceutical Association**. v. 3, p. 24-30, 2001.

KESSLER, E. Upper limits of temperature for growth in *Chlorella*. **Plant Systematics and Evolution**, v. 151, p. 191-208, 1985.

KOOPMANS, M. V., WIJFFELS, R. H., BARBOSA, M. J., EPPINK, M. H. Biorefinery of microalgae for food and fuel. **Bioresource Technology**. v. 135, p. 142-149, 2013.

KROUMOV, A. D. *et al.* A systems approach for CO<sub>2</sub> fixation from flue gas by microalgae—Theory review. **Process Biochemistry**. v. 51. ed. 11. 2016. pg. 1817–1832.

KUBITZA, F. Aquicultura no Brasil: Conquistas e desafios. **Panorama da Aquicultura**, v. 25, n. 150, p. 10-23, 2015.

LEE, Y. K., CHEN, W., SHEN, H., HAN, D., LI, Y., JONES, H. D. T., TIMLIN, J. A., HU, Q. Basic culturing and analytical measurement techniques. *In*: **Handbook of Microalgae culture: applied phycology and biotechnology**, Wiley Blackwell, 2013, p. 37-68.

LÉON, R., MARTÍN, M., VIGARA, J., VILCHEZ, C., VEGA, J. M. Microalgae mediated photoproduction of  $\beta$ -carotene in aqueous-organic two phase systems. **Biomolecular Engineering**. v. 20, p. 177-182, 2003.

LI, W. K. W. Temperature adaptation in phytoplankton: cellular and photosynthetic characteristics. *In*: **Falkowski PG**, Plenum press, Nova York, p. 259-279, 1980.

LIMA, J. F. **Cultivo e secagem da microalga *Chlorella sp.* em diferentes concentrações de nutrientes**. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, Campina Grande, 2016.

- MAHMOOD, K. H., MASHHADANI, A. L., KHUDHAIR, E. M. Experimental study for commercial fertilizer NPK (20:20:20+TE N:P:K) in microalgae cultivation at different aeration periods. **Iraqi Journal of Chemical and Petroleum Engineering**, v. 18, n. 1, marc. 2017.
- 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, p. 217-232, 2010.
- MATCHES. **Chemical Engineering**. Costa do Golfo. Disponível em: <<https://www.matche.com/>> Acesso em: 05 de ago. 2021.
- MEDEIROS, F. **Anuário 2021: Peixe BR da piscicultura**. Associação Brasileira da Piscicultura, São Paulo, 2021.
- METSOVITI, M. N. *et al.* Current and Potential Applications of Microalgae: A Mini Review. **Oceanography Fisheries Open Access Journal**. v. 11. 2019. Disponível em: <<https://juniperpublishers.com/foaj/pdf/OFOAJ.MS.ID.555811.pdf>> Acesso 19 jan. 2021.
- MILLEDDGE, J. The potential yield of microalgal oil. **Biofuels International**. Reino Unido, v. 4, p. 44 – 45, 2010.
- MONÇÃO, F. S. *et al.* Microalgas e biocombustíveis: integração de cadeias produtivas. **Rev. Virtual Quim**, v. 10, n. 4, jul. – ago. 2018. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br/imagebank/pdf/MoncaoNoPrelo.pdf>. Acesso 19 jan. 2021.
- MTAKI, K.; et al. **Supplementing wastewater with NPK fertilizer as a cheap source of nutrients in cultivating live food (*Chlorella vulgaris*)**. *Annals of Microbiology*, 2021.
- NETO, W. A. F., MENDES C. R. B., ABREU, P. C. Carotenoid production by the marine microalgae *Nannochloropsis oculata* in different low-cost culture media. **Aquaculture Research**, v. 49, n. 7, p. 2527-2535, 2018.
- NET VAL. **Contato**. Disponível em: < <http://www.netval.com.br/contato.html>>. Acesso em: 05 ago. 2021.
- NEXOOS; **Taxa Interna de Retorno (TIR): saiba como ela pode impactar seus investimentos com a Nexoos**. Guia de Investimentos, 2021. Disponível em: <<https://www.nexoos.com.br/guia-de-investimentos/tir/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.
- NITSCHKE, P. R., CARAMORI, P. H., RICCE, da. W. S., PINTO, L. F. D. Atlas Climático do Estado do Paraná. **Instituto Agrônômico do Paraná (IAPAR)**, p. 210, Londrina, 2019.
- NORSKER, N. H., BARBOSA, M. J., VERMUE, M. H., WIJFFELS, R. H. Microalgal production: a close look at the economics. **Biotechnology Advances**. v. 29, n. 1, p. 24-27, 2011.
- OHSE, S.; et al. Revisão: Sequestro de carbono realizado por microalgas e florestas e a capacidade de produção de lipídios pelas microalgas. **INSULA**, n. 36, p. 39-74. Florianópolis, 2007.

OLIVER, R. L., KINNEAR, A. J., GANF, G. G. Measurements of cell density of three freshwater phytoplankters by density gradient centrifugation. **Limnology and Oceanography**, v. 26, n. 2, p. 285-294, 1981.

OLSON. Quem somos. Disponível em: <<https://www.olson.com.br/pagina/3/quem-somos>> Acesso em 07 ago. 2021.

OOSTLANDER, P. C. *et al.* Microalgae production cost in aquaculture hatcheries. **Aquaculture**. v. 525. 2020.

PERFURARTE; **Poço artesiano: quanto custa a perfuração e qual o preço por metro?** Perfurarte: poços artesianos, jul. 2020. Disponível em: <<https://www.perfurarte.com.br/post/poco-artesiano-preco>>. Acesso em: 19/08/2021.

PERFURARTE; **Poço artesiano: profundidade ideal e profundidade média em SP e MG.** Perfurarte: poços artesianos, set. 2020. Disponível em: <<https://www.perfurarte.com.br/post/poco-artesiano-profundidade>>. Acesso em: 19/08/2021.

PACHECO, D. *et al.* Microalgae Water Bioremediation: Trends and Hot Topics. **Applied Sciences**. v. 10. n. 1886. 2020.

PROFISSÃO BIOTEC. **Microalgas: a busca por uma beleza natural e sustentável.** 04 nov. 2017. Disponível em: <<https://profissaobiotec.com.br/microalgas-busca-por-uma-beleza-natural-e-sustentavel/>>. Acesso em: 20 jan. 2021.

PROPEQ. **Tubulações na Indústria: como escolhê-las de forma adequada?** Campinas, 2020. Disponível em: < <https://propeq.com/tubulacoes-industriais/>>. Acesso em: 08 ago. 2021.

RAS, M., STEYER, J. P. Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 12, p. 153-164, 2013.

RASTOGI, R. P. *et al.* **Algal Green Chemistry: Recent progress in biotechnology.** Amsterdam: Copyright, 2017.

RATH, I. P. B. Commercial and industrial applications of microalgae: A review. **Journal of Algal Biomass Utilization**. v. 3, n. 4, p. 89-100, 2012.

RIBEIRO, R. L. L. **Modelagem matemática e simulação de fotobiorreatores tubulares compactos para cultivo de microalgas.** 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

RIZWAN, M. *et al.* Exploring the potential of microalgae for new biotechnology , 03.applicationsand beyond: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 92. 2018.

SALES, R. **Quem somos**. Santa Catarina, 17 nov. 2020. Disponível em: <[https://www.instagram.com/p/CHsFNYDpj4J/?utm\\_medium=copy\\_link](https://www.instagram.com/p/CHsFNYDpj4J/?utm_medium=copy_link)> Acesso em 07 ago. 2021.

SECRETARIA DA AGRICULTURA E ABASTECIMENTO. **Produção de Tilápias transforma vida no oeste do Paraná**. Paraná, 2020. Disponível em: <https://www.agricultura.pr.gov.br/Noticia/Producao-de-tilapia-transforma-vidas-no-Oeste-do-Parana>. Acesso em 29 mai. 2021.

SEIXAS, M. A. C. **Sobrevivência e crescimento de larvas de pintado *Pseudoplatystoma corruscans* alimentadas com *Branchionus rotundiformis* Tschugunoff, 1921 (Rotifera: Brachionidae)**. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Híbridos) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2001.

SHAH, M. R., LUTZU, G. A., ALAM, A., SARKER, P., CHOWDHURY, M. A. K., PARSAEIMEHR, A., LIANG, Y., DAROCH, M. Microalgae in aquafeeds for a sustainable aquaculture industry. **Journal of Applied Phycology**, v. 30, p. 197-2013, 2018.

SIQUEIRA, T. V. Aquicultura: a nova fronteira para produção de alimentos de forma sustentável. **Revista do BNDES**, v. 23, n. 49, p. 119-170, 2018.

SELESU, N. F. H. **Desenvolvimento do processo de produção de microalgas em fotobiorreator industrial usando efluente suíno biodigerido**. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais). Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia. Curitiba, 2015.

SHAHID, A. *et al.* Cultivating microalgae in wastewater for biomass production, pollutant removal, and atmospheric carbon mitigation: a review. **Science of the Total Environment**. v. 704. 2019/2020.

SOUZA, E. C. et al.; **Projeto industrial de produção de ácido láctico utilizando permeado de soro de leite como substrato para a fermentação**. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2019.

SPOLAORE, P., CASSAN, C. J., DURAN, E., ISAMBERT, A. Commercial Applications of Microalgae: Review. **Journal of Bioscience and Bioengineering**. v. 101, n. 2, p. 87-96, 2006.

STANBURY, P. WHITAKER, A., HALL, S. **Principles of Fermentation Technology**, 3 ed. Butterworth Heinemann, 367 p. 1994.

TIGRE. **Obras e Reformas – PPR Termofusão**. Disponível em: <<https://www.tigre.com.br/obras-e-reformas/tubos-e-conexoes-para-agua-quente/ppr-termofusao>>. Acesso em: 08 de ago. de 2021.

TEFSA. **Vacuum Filters**. Disponível em: <[https://gruptefsa.com/vacuum\\_filters/06%20Vacuum%20Filters%20Catalogue%20TAP.pdf](https://gruptefsa.com/vacuum_filters/06%20Vacuum%20Filters%20Catalogue%20TAP.pdf)> Acesso em: 08 de ago. de 2021.

TREDICI, M. R. *et al.* Advances in microalgal culture for aqua-culture feed and other uses. *In: New Technologies in Aqua-culture: Improving Production Efficiency, Quality and Environmental Management*, Cambridge: Woodhead Publishing, 2009. p. 610-676.

TOLEDO. Prefeitura do Município de Toledo. **Lei N°2.233, de 16 de setembro de 2016.** Dispões sobre o zoneamento do uso e da ocupação do solo urbano no Município de Toledo. Disponível em: <[https://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/lei\\_2233\\_zoneamento.pdf](https://www.toledo.pr.gov.br/sites/default/files/lei_2233_zoneamento.pdf)>.

TUBOS ABC. **O que são tubos de aço carbono?** Disponível em: <[https://www.tubosabc.com.br/tubos/tubos-aco-carbono/#Tubos\\_de\\_aco\\_carbono\\_com\\_e\\_sem\\_costura](https://www.tubosabc.com.br/tubos/tubos-aco-carbono/#Tubos_de_aco_carbono_com_e_sem_costura)>. Acesso em: 25 de jul. de 2021.

TURTON, R.; BAILIE, R. C.; WHITING, W. B.; SHAEIWITZ, J. A. **Analysis, synthesis and design of chemical processes.** Pearson Education, 2008.

TOWLER, G.; SINNOTT, R. **Chemical engineering design: principles, practice and economics of plant and process design.** Elsevier, 2012.

UNITED NATIONS (UN). **World population 2015.** Disponível em: <[https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/Files/World\\_Population\\_2015\\_Wallchart.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/Files/World_Population_2015_Wallchart.pdf)>. Acesso em: 30 mai. 2021.

UTEX. **Algal culture media.** Disponível em: <<https://utex.org/pages/algal-culture-media>>. Acesso em: 30 jun. 2021.

WARREN; **Valor Presente Líquido: como usar para avaliar investimentos.** Warren Mercado Financeiro, 2020. Disponível em: <<https://warren.com.br/blog/valor-presente-liquido/>>. Acesso em: 08 de ago. 2021.

WIJFFELS, R. H. Microalgae for production of bulk chemicals and biofuels. **Chemie Ingenieur Technik.** v. 81, n. 8, 2009.

WONG, Y. K., HO, Y. H., HO, K. C., LEUNG, H. M., YUNG K. K. L. Growth medium screening for *Chlorella vulgaris* growth and lipid production. **Journal of Aquaculture & Marine Biology**, v. 6, n. 1, 2017.

YAMAGUCHI, K. Recent advances in microalgal bioscience in Japan, with special reference to utilization of biomass and metabolites: a review. **Journal of Applied Physics.** v. 8, p. 487-502, 1997.

ZANATA, A. C. **Obtenção de biomassa microalgal de *Chlorella vulgaris* tolerante a herbicidas.** Dissertação (Mestrado em biotecnologia) – Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2020.





## ANEXOS

## ANEXO A – Tabela de propriedades da água saturada

**TABELA A-9**  
Propriedades da água saturada

Temp. T, °C	Pressão de saturação P <sub>sat</sub> , kPa	Densidade de ρ, kg/m <sup>3</sup>		Entalpia de vaporização h <sub>fg</sub> , kJ/kg	Calor específico c <sub>p</sub> , kJ/kg · K		Condutividade térmica k, W/m · K		Viscosidade dinâmica μ, kg/m · s		Número de Prandtl Pr		Coeficiente de expansão volumétrica β, 1/K líquido
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0,01	0,6113	999,8	0,0048	2.501	4.217	1.854	0,561	0,0171	1,792 × 10 <sup>-3</sup>	0,922 × 10 <sup>-3</sup>	13,5	1,00	-0,068 × 10 <sup>-3</sup>
5,0	8721	999,9	0,0068	2.490	4.205	1.857	0,571	0,0173	1,519 × 10 <sup>-3</sup>	0,934 × 10 <sup>-3</sup>	11,2	1,00	0,015 × 10 <sup>-3</sup>
10	1,2276	999,7	0,0094	2.478	4.194	1.862	0,580	0,0176	1,307 × 10 <sup>-3</sup>	0,946 × 10 <sup>-3</sup>	9,45	1,00	0,733 × 10 <sup>-3</sup>
15	1,7051	999,1	0,0128	2.466	4.185	1.863	0,589	0,0179	1,138 × 10 <sup>-3</sup>	0,959 × 10 <sup>-3</sup>	8,09	1,00	0,138 × 10 <sup>-3</sup>
20	2,339	998,0	0,0173	2.454	4.182	1.867	0,598	0,0182	1,002 × 10 <sup>-3</sup>	0,973 × 10 <sup>-3</sup>	7,01	1,00	0,195 × 10 <sup>-3</sup>
25	3,169	997,0	0,0231	2.442	4.180	1.870	0,607	0,0186	0,891 × 10 <sup>-3</sup>	0,987 × 10 <sup>-3</sup>	6,14	1,00	0,247 × 10 <sup>-3</sup>
30	4,246	996,0	0,0304	2.431	4.178	1.875	0,615	0,0189	0,798 × 10 <sup>-3</sup>	1,001 × 10 <sup>-3</sup>	5,42	1,00	0,294 × 10 <sup>-3</sup>
35	5,628	994,0	0,0397	2.419	4.178	1.880	0,623	0,0192	0,720 × 10 <sup>-3</sup>	1,016 × 10 <sup>-3</sup>	4,83	1,00	0,337 × 10 <sup>-3</sup>
40	7,384	992,1	0,0512	2.407	4.179	1.885	0,631	0,0196	0,653 × 10 <sup>-3</sup>	1,031 × 10 <sup>-3</sup>	4,32	1,00	0,377 × 10 <sup>-3</sup>
45	9,593	990,1	0,0655	2.395	4.180	1.892	0,637	0,0200	0,596 × 10 <sup>-3</sup>	1,046 × 10 <sup>-3</sup>	3,91	1,00	0,415 × 10 <sup>-3</sup>
50	12,35	988,1	0,0831	2.383	4.181	1.900	0,644	0,0204	0,547 × 10 <sup>-3</sup>	1,062 × 10 <sup>-3</sup>	3,55	1,00	0,451 × 10 <sup>-3</sup>
55	15,76	985,2	0,1045	2.371	4.183	1.908	0,649	0,0208	0,504 × 10 <sup>-3</sup>	1,077 × 10 <sup>-3</sup>	3,25	1,00	0,484 × 10 <sup>-3</sup>
60	19,94	983,3	0,1304	2.359	4.185	1.916	0,654	0,0212	0,467 × 10 <sup>-3</sup>	1,093 × 10 <sup>-3</sup>	2,99	1,00	0,517 × 10 <sup>-3</sup>
65	25,03	980,4	0,1614	2.346	4.187	1.926	0,659	0,0216	0,433 × 10 <sup>-3</sup>	1,110 × 10 <sup>-3</sup>	2,75	1,00	0,548 × 10 <sup>-3</sup>
70	31,19	977,5	0,1983	2.334	4.190	1.936	0,663	0,0221	0,404 × 10 <sup>-3</sup>	1,126 × 10 <sup>-3</sup>	2,55	1,00	0,578 × 10 <sup>-3</sup>
75	38,58	974,7	0,2421	2.321	4.193	1.948	0,667	0,0225	0,378 × 10 <sup>-3</sup>	1,142 × 10 <sup>-3</sup>	2,38	1,00	0,607 × 10 <sup>-3</sup>
80	47,39	971,8	0,2935	2.309	4.197	1.962	0,670	0,0230	0,355 × 10 <sup>-3</sup>	1,159 × 10 <sup>-3</sup>	2,22	1,00	0,633 × 10 <sup>-3</sup>
85	57,83	968,1	0,3536	2.296	4.201	1.977	0,673	0,0235	0,333 × 10 <sup>-3</sup>	1,176 × 10 <sup>-3</sup>	2,08	1,00	0,657 × 10 <sup>-3</sup>
90	70,14	965,3	0,4235	2.283	4.206	1.993	0,675	0,0240	0,315 × 10 <sup>-3</sup>	1,193 × 10 <sup>-3</sup>	1,96	1,00	0,676 × 10 <sup>-3</sup>
95	84,55	961,5	0,5045	2.270	4.212	2.010	0,677	0,0246	0,297 × 10 <sup>-3</sup>	1,210 × 10 <sup>-3</sup>	1,85	1,00	0,691 × 10 <sup>-3</sup>
100	101,33	957,9	0,5978	2.257	4.217	2.029	0,679	0,0251	0,282 × 10 <sup>-3</sup>	1,227 × 10 <sup>-3</sup>	1,75	1,00	0,705 × 10 <sup>-3</sup>
110	143,27	950,6	0,8263	2.230	4.229	2.071	0,682	0,0262	0,255 × 10 <sup>-3</sup>	1,261 × 10 <sup>-3</sup>	1,58	1,00	0,798 × 10 <sup>-3</sup>
120	198,53	943,4	1,121	2.203	4.244	2.120	0,684	0,0288	0,213 × 10 <sup>-3</sup>	1,330 × 10 <sup>-3</sup>	1,33	1,01	0,913 × 10 <sup>-3</sup>
130	270,1	934,6	1,496	2.174	4.263	2.177	0,684	0,0301	0,197 × 10 <sup>-3</sup>	1,365 × 10 <sup>-3</sup>	1,24	1,02	0,970 × 10 <sup>-3</sup>
140	361,3	921,7	1,965	2.145	4.286	2.244	0,683	0,0316	0,183 × 10 <sup>-3</sup>	1,399 × 10 <sup>-3</sup>	1,16	1,02	1,025 × 10 <sup>-3</sup>
150	475,8	916,6	2,546	2.114	4.311	2.314	0,682	0,0316	0,183 × 10 <sup>-3</sup>	1,399 × 10 <sup>-3</sup>	1,16	1,02	1,025 × 10 <sup>-3</sup>
160	617,8	907,4	3,256	2.083	4.340	2.420	0,680	0,0331	0,170 × 10 <sup>-3</sup>	1,434 × 10 <sup>-3</sup>	1,09	1,05	1,145 × 10 <sup>-3</sup>
170	791,7	897,7	4,119	2.050	4.370	2.490	0,677	0,0347	0,160 × 10 <sup>-3</sup>	1,468 × 10 <sup>-3</sup>	1,03	1,05	1,178 × 10 <sup>-3</sup>
180	1,002,1	887,3	5,153	2.015	4.410	2.590	0,673	0,0364	0,150 × 10 <sup>-3</sup>	1,502 × 10 <sup>-3</sup>	0,983	1,07	1,210 × 10 <sup>-3</sup>
190	1,254,4	876,4	6,388	1.979	4.460	2.710	0,669	0,0382	0,142 × 10 <sup>-3</sup>	1,537 × 10 <sup>-3</sup>	0,947	1,09	1,280 × 10 <sup>-3</sup>
200	1,553,8	864,3	7,852	1.941	4.500	2.840	0,663	0,0401	0,134 × 10 <sup>-3</sup>	1,571 × 10 <sup>-3</sup>	0,910	1,11	1,350 × 10 <sup>-3</sup>
220	2,318	840,3	11,60	1.859	4.610	3.110	0,650	0,0442	0,122 × 10 <sup>-3</sup>	1,641 × 10 <sup>-3</sup>	0,865	1,15	1,520 × 10 <sup>-3</sup>
240	3,344	813,7	16,73	1.767	4.760	3.520	0,632	0,0487	0,111 × 10 <sup>-3</sup>	1,712 × 10 <sup>-3</sup>	0,836	1,24	1,720 × 10 <sup>-3</sup>
260	4,688	783,7	23,69	1.663	4.970	4.070	0,609	0,0540	0,102 × 10 <sup>-3</sup>	1,788 × 10 <sup>-3</sup>	0,832	1,35	2,000 × 10 <sup>-3</sup>
280	6,412	750,8	33,15	1.544	5.280	4.835	0,581	0,0605	0,094 × 10 <sup>-3</sup>	1,870 × 10 <sup>-3</sup>	0,854	1,49	2,380 × 10 <sup>-3</sup>
300	8,581	713,8	46,15	1.405	5.750	5.980	0,548	0,0695	0,086 × 10 <sup>-3</sup>	1,965 × 10 <sup>-3</sup>	0,902	1,69	2,950 × 10 <sup>-3</sup>
320	11,274	667,1	64,57	1.239	6.540	7.900	0,509	0,0836	0,078 × 10 <sup>-3</sup>	2,084 × 10 <sup>-3</sup>	1,00	1,97	—
340	14,586	610,5	92,62	1,028	8,240	11,870	0,469	0,110	0,070 × 10 <sup>-3</sup>	2,255 × 10 <sup>-3</sup>	1,23	2,43	—
360	18,651	528,3	144,0	720	14,690	25,800	0,427	0,178	0,060 × 10 <sup>-3</sup>	2,571 × 10 <sup>-3</sup>	2,06	3,73	—
374,14	22,090	317,0	317,0	0	—	—	—	—	0,043 × 10 <sup>-3</sup>	4,313 × 10 <sup>-3</sup>	—	—	—

Nota 1: A viscosidade cinemática  $\nu$  e a difusividade térmica  $\alpha$  podem ser calculadas a partir de suas definições,  $\nu = \mu/\rho$  e  $\alpha = k/\rho c_p = \nu Pr$ . As temperaturas de 0,01 °C, 100 °C e 374,14 °C são as dos pontos triplo de ebulição e crítico da água, respectivamente. As propriedades listadas acima (exceto a densidade de vapor) podem ser usadas em qualquer pressão com erro desprezível, exceto em temperaturas perto do valor do ponto crítico.

Nota 2: A unidade kJ/kg°C para o calor específico é equivalente a kJ/kg · K, e a unidade W/m°C para condutividade térmica é equivalente a W/m · K.

Fonte: Os dados de viscosidade e condutividade térmica foram obtidos a partir de J. V. Sengers e J. T. R. Watson, *Journal of Physical and Chemical Reference Data* 15 (1986), pp. 1291–1322. Outros dados foram obtidos a partir de várias fontes ou são calculados.

## ANEXO B – Tabela de valores de rugosidade absoluta de tubulações de diferentes materiais

MATERIAL	Rugosidade Absoluta (mm)
Aço comercial novo	0,045
Aço laminado novo	0,04 a 0,10
Aço soldado novo	0,05 a 0,10
Aço soldado limpo, usado	0,15 a 0,20
Aço soldado moderadamente oxidado	0,4
Aço soldado revestido de cimento centrifugado	0,10
Aço laminado revestido de asfalto	0,05
Aço rebitado novo	1 a 3
Aço rebitado em uso	6
Aço ou ferro galvanizado	0,15
Ferro forjado	0,05
Ferro fundido novo	0,25 a 0,50
Ferro fundido com leve oxidação	0,30
Ferro fundido velho	3 a 5
Ferro fundido centrifugado	0,05
Ferro fundido com cimento centrifugado (uso)	0,10
Ferro fundido com revestimento asfáltico	0,12 a 0,20
Ferro fundido oxidado	1 a 1,5
Cimento amianto novo	0,025
Concreto centrifugado novo	0,16
Concreto armado liso, vários anos de serviço	0,20 a 0,30
Concreto com acabamento normal	1 a 3
Concreto protendido Freyssinet	0,04
Cobre, latão, aço revestido de epoxi, PVC,	0,0015

## ANEXO C – Tabela de perda carga localizada para diferentes acessórios

Diâmetro nominal D		<div style="display: flex; justify-content: space-between; font-size: 8px;"> <span>Cotovelo 90°</span> <span>Raio longo 90°</span> <span>Cotovelo 90°</span> <span>Raio médio 90°</span> <span>Cotovelo 90°</span> <span>Raio curto 45°</span> <span>Curva 90°</span> <span>Rd - 1/2</span> <span>Curva 90°</span> <span>Rd - 1</span> <span>Curva 45°</span> <span>Entrada Normal</span> <span>Entrada de borba</span> <span>Entrada de gaveta aberto</span> <span>Entrada de globo aberto</span> <span>Entrada de globo aberto</span> <span>Tê passagem direta</span> <span>Tê passagem de lado</span> <span>Tê saída bilateral</span> <span>Válvula de pé e crivo</span> <span>Saída da canaliz.</span> <span>Válvula de retenção tipo leve</span> <span>Válvula de retenção tipo pesado</span> </div>																		
(mm)	(pol.)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
18	1/2	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	3/4	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,2	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 1/4	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 1/2	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 1/2	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,5	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

Os valores indicados para registro de globo aplicam-se também às torneiras, válvulas para chuveiros e válvulas de descargas.

Fonte: Macintyre, 2017

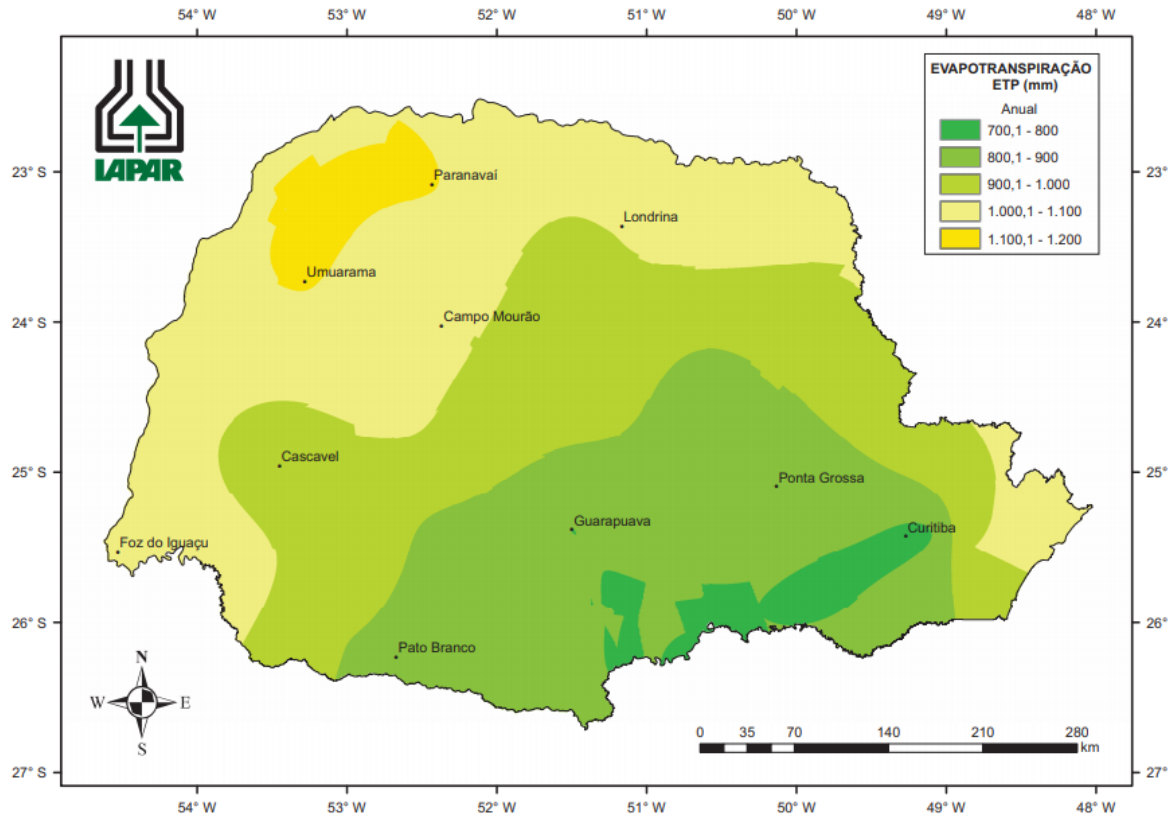
## ANEXO D - Tabela referência para determinação da dimensão de filtros

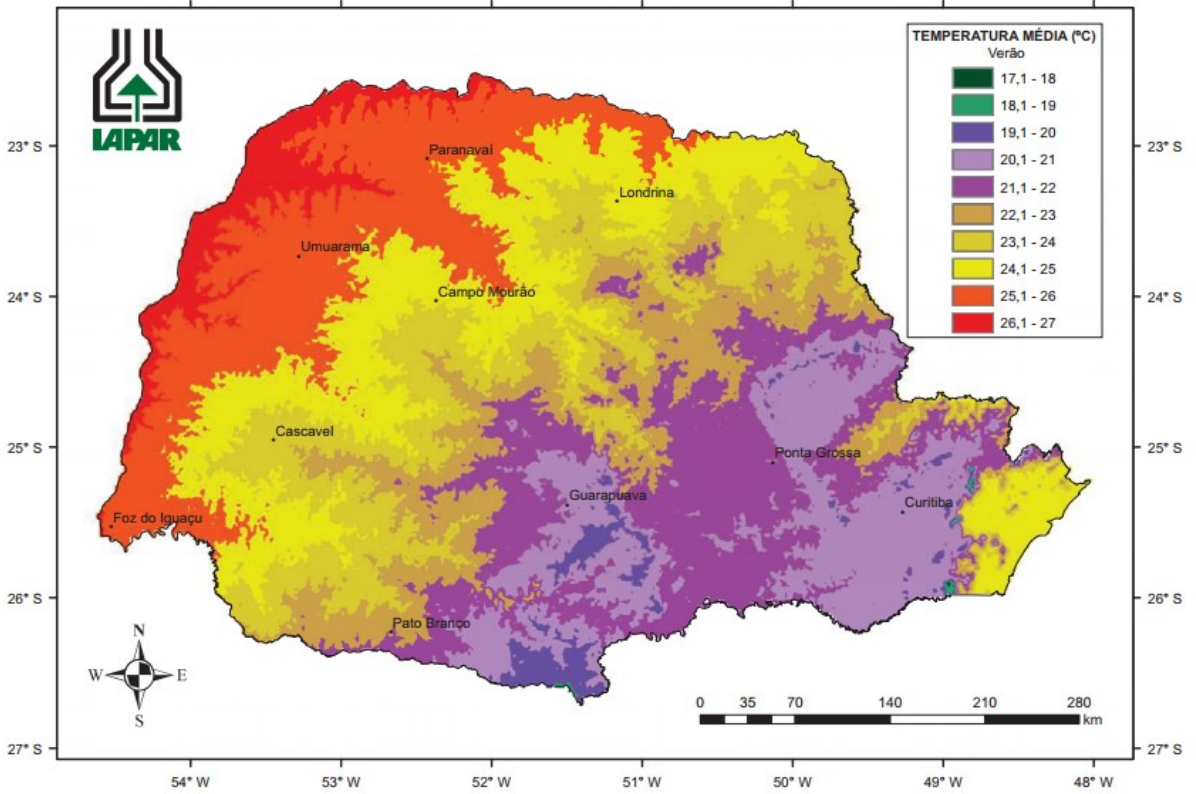
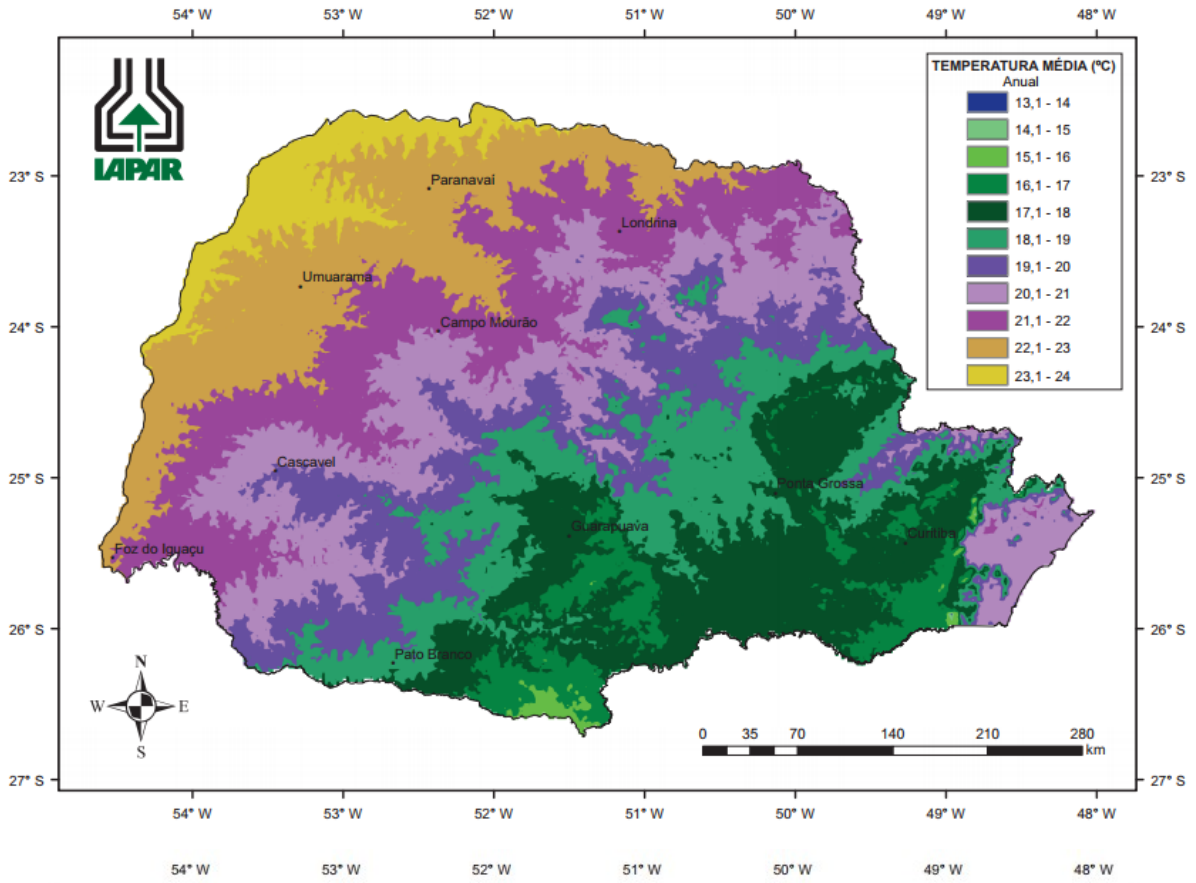
**Table 3.** Guide to Filter Selection

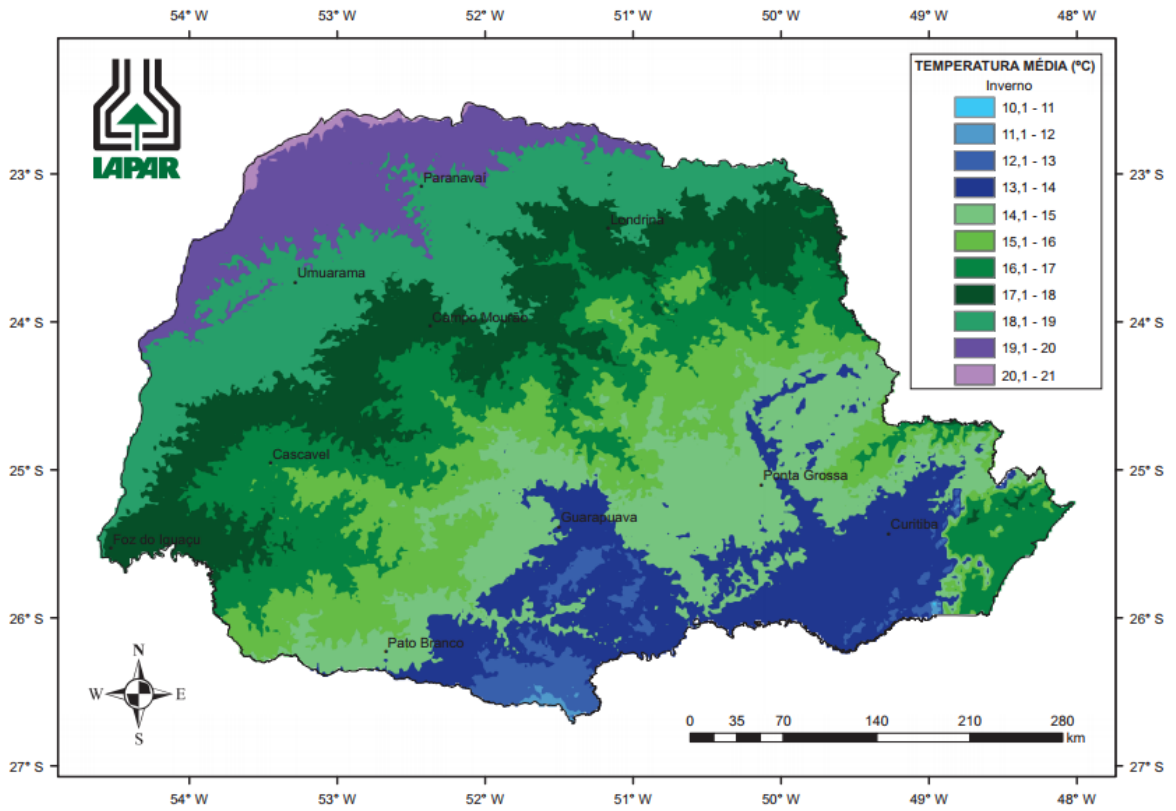
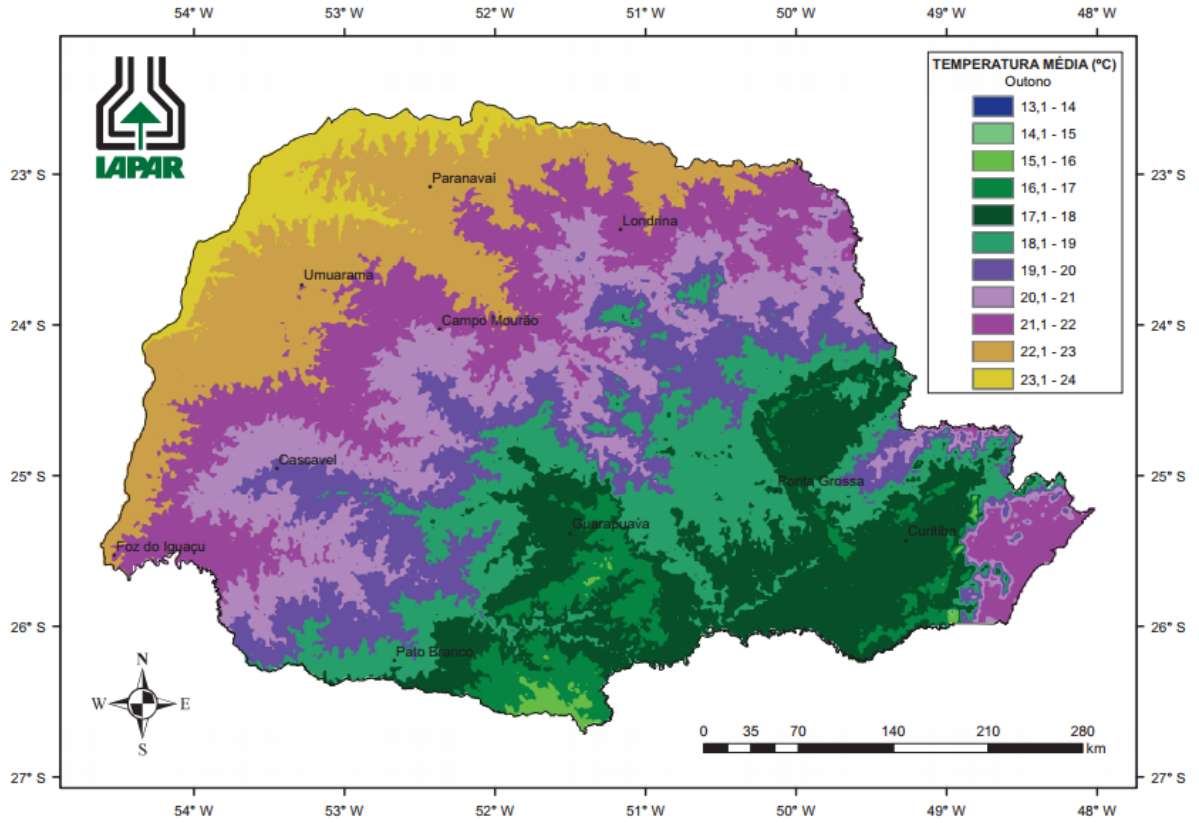
Slurry Characteristics	Fast Filtering	Medium Filtering	Slow Filtering	Very Dilute	Dilute
Cake Formation	in/sec.	in/sec	0.05 to 0.25 in/min	0.05 in/min	no cake
Normal concentration	20%	10 to 20%	1 to 10%	5%	0.1%
Settling rate	rapid, difficult to suspend	fast	slow	slow	–
Leaf test rate, lb/hr/sq ft	500	50 to 500	5 to 50	5	–
Filtrate Rate, gal/min/sq ft	5	0.2 to 5	0.01 to 0.02	0.01 to 2	0.01 to 2
<u>Filter Application</u>					
Continuous Vacuum					
Multicompartment drum					
Single-compartment drum					
Dorroco					
Hopper dewaterer					
Top feed					
Scroll-discharge					
Tilting-pan					
Belt-discharge					
Continuous vacuum disk					
Continuous vacuum Precoat					
Continuous pressure Precoat					
Batch vacuum leaf					
Batch nutsche					
Batch pressure filters					
plate-and-frame					
vertical leaf					
tubular					
horizontal plate					
cartridge edge					

Fonte: VOGEL (2014).

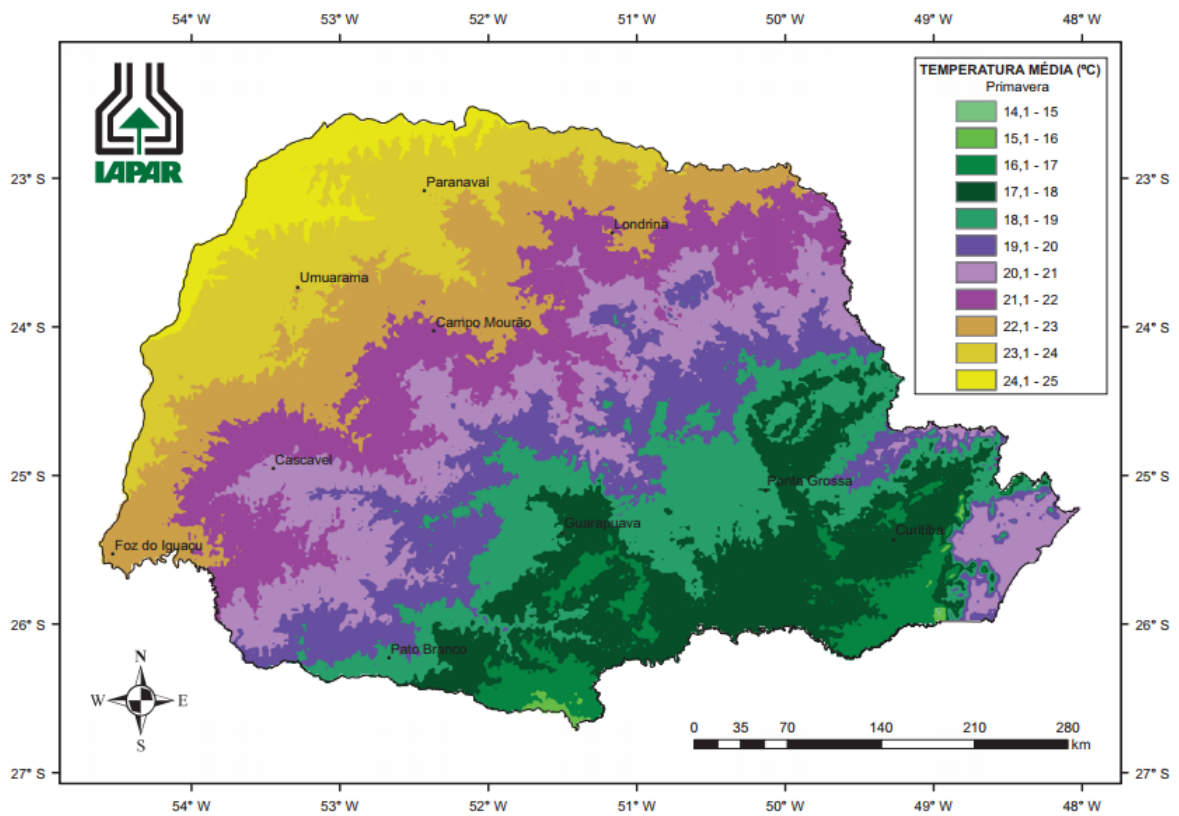
## ANEXO E – Dados climáticos na região do Paraná no ano de 2019











Fonte: NITSCHKE *et al.*, 2019.