



**Universidade do Minho**  
Escola de Engenharia

Lúis Pedro Costa Guimarães

# Projeto e construção de um fotobiorreator para crescimento acelerado de microalgas

Tese de mestrado

Mestrado integrado em engenharia mecânica

Trabalho efetuado sobre a orientação da

**Professora Doutora Cândida Vilarinho**

**Doutora Joana Carvalho**

Outubro de 2012



## Agradecimentos

À minha orientadora, a professora Cândida Vilarinho pelo apoio científico prestado ao longo do período de dissertação

À Doutora Joana Carvalho, pela disponibilidade total no auxílio de toda e quaisquer questões, como também, pela sua dedicação e partilha de conhecimento científicos.

Ao Dr. André Ribeiro pela total comparência nas atividades executadas com dedicação e empenho.

À empresa "Grupomigas" por ter acreditado no projeto desenvolvido e ter patrocinado a execução do mesmo.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para este trabalho.



## Resumo

Este trabalho consistiu no projeto e construção de um fotobiorreator com o objetivo de cultivar microalgas num meio artificial de forma acelerada, obtendo biomassa como produto final com alto teor em óleo. Esta biomassa, posteriormente submetida a processos de extração do óleo viabilizará a produção de biodiesel, com as consequentes vantagens daí inerentes.

Inicialmente, foi efetuada uma pesquisa e análise do estado da arte, estudando as técnicas e tecnologias já utilizadas na cultura de microalgas, bem como as tipologias de fotobiorreatores existentes, percebendo assim a melhor orientação a dar ao projeto. Paralelamente, foi ainda abordado, do ponto de vista teórico, a necessidade e pertinência do desenvolvimento de biocombustíveis alternativos aos combustíveis fósseis, bem como as técnicas, métodos e matérias primas que lhe dão origem.

Após analisado o estado da arte, foi elaborado o projeto e construção do fotobiorreator, bem como realizados ensaios com vista à otimização da instalação.

Finalmente, foram efetuadas duas culturas de microalgas da espécie *Chlorella Emersonii* na instalação desenvolvida para avaliação da eficiência e operacionalidade da mesma, sendo analisados os seus resultados e feita a comparação entre as diferentes culturas, nomeadamente no que respeita aos sólidos totais secos e a densidade ótica. Foram abordados os aspetos técnicos e económicos do projeto, construção e funcionamento do fotobiorreator desenvolvido.

O trabalho desenvolvido permitiu verificar que a produção de biodiesel através de microalgas em fotobiorreatores ainda é um processo em desenvolvimento. Apesar de o cultivo de microalgas em fotobiorreatores permitir o controlo das condições ideais para o seu crescimento acelerado, os resultados encontrados neste trabalho não foram benéficos a nível de rentabilidade económica mas, porém, a taxa de crescimento das microalgas foi satisfatória. Mesmo assim, verificaram-se melhorias possíveis a executar em trabalhos futuros.

**Palavras chave: Projeto, Fotobiorreator, Microalgas, Biodiesel, Meio de cultivo.**



## Abstract

This project consisted in the design and built of a fotobiorreactor whose propose was to cultivate, in a faster way, micro algae in an artificial environment, getting as final product a biomass with a high content of oil. This biomass subsequently subjected to oil extraction processes will enable the production of biodiesel, with consequent advantages inherent there.

Initially, we conducted a survey and analysis of the state of the art, studying the techniques and technologies already used in the cultivation of microalgae as well as the existing types of photobioreactors, thus realizing the best advice to give to the project. Alongside yet been addressed, the theoretical point of view, the need and desirability of developing biofuel alternative to fossil fuels, as well as the techniques, methods and raw materials that make them exist.

After examining the state of the art, the project was designed and construction fotobiorreactor and trials conducted with a view to optimizing the installation.

Finally, we made two cultures of microalgae *Chlorella Emersonii* kind, during the installation developed to evaluate the efficiency and operability of the same, and analyzed the results and made the comparison between different cultures, in particular with respect to total solids dried and optical density. Addressed the technical and economic aspects of the design, construction and operation of fotobiorreactor developed.

The work showed that the production of biodiesel by microalgae in photobioreactors is still an evolving process. Although the cultivation of microalgae in photobioreactors allow control of ideal conditions for the rapid growth, the results found in this study were not beneficial in terms of cost effectiveness but, however, the growth rate of microalgae was satisfactory. Even so, there were possible improvements to be implemented in future work.

**Keywords: Project, Fotobioreactor, Microalgae, Biodiesel, Culture medium.**





## Índice

Agradecimentos .....	ii
Resumo .....	iv
Abstract .....	vi
Índice de figuras .....	xii
Índice de tabelas .....	xviii
1. Capítulo I - Fundamentos teóricos .....	1
1.1. Enquadramento do tema e objetivos .....	1
1.1.1 Aplicação do biodiesel em motores a Diesel .....	3
1.2. Impacto ambiental dos combustíveis fósseis .....	7
1.3. Biodiesel .....	9
1.3.1 Contexto em Portugal e no Mundo .....	9
1.3.2. Propriedades do Biodiesel .....	12
1.3.3. Enquadramento Legal do Biodiesel .....	17
1.4. Matérias-primas .....	17
1.4.1. Óleos Vegetais .....	18
1.4.2. Óleos alimentares usados .....	19
1.4.3. Macroalgas .....	22
1.4.4. Microalgas .....	25
2. Capítulo II - Produção de biodiesel através de microalgas .....	29
2.1 Métodos de cultura .....	29
2.2. Métodos de colheita das microalgas .....	34
2.2.1. Centrifugação .....	34
2.2.2 Flotação .....	35
2.2.3. Flocculação .....	35
2.2.4. Filtração .....	36
2.3 Processamento .....	36
2.4. Extração do óleo da biomassa .....	37
2.5. Produção do Biodiesel a partir de microalgas .....	37
3. Capítulo III - Fotobiorreatores .....	41
3.1 Tipos de fotobiorreatores existentes .....	41
3.1.1. Fotobiorreatores tubulares .....	42

3.1.2.	Fotobiorreatores "airlifts".....	44
3.1.3.	Fotobiorreatores de placas planas verticais ou horizontais.....	45
3.1.4.	Fotobiorreatores de tanque agitado .....	45
3.2	Vantagens e desvantagens dos fotobiorreatores analisados .....	46
4.	Capítulo IV - Projeto e construção do fotobiorreator.....	47
4.1.	Condições requeridas para o funcionamento do fotobiorreator.....	47
4.2.	Protótipo do fotobiorreator projetado .....	49
4.3.	Descrição dos elementos do fotobiorreator: .....	50
4.3.1	Depósito de água.....	50
4.3.2.	Suporte do depósito.....	54
4.3.3.	Torre central de apoio à iluminação artificial .....	55
4.3.4.	Torneira de recolha de amostras.....	57
4.3.5.	Sistema de agitação.....	57
4.3.6.	Espelhos.....	59
4.3.7.	Botija de dióxido de carbono.....	60
4.3.8.	Resistência de aquecimento .....	61
4.3.9.	Medidor de pH .....	62
4.4.	Construção do fotobiorreator .....	63
4.5.	Projeto de automatização do funcionamento do fotobiorreator .....	66
4.5.1.	Introdução ao tema.....	66
4.5.2.	Equipamentos de automatização do fotobiorreator .....	68
4.5.3.	Grafcet de programação.....	69
4.5.4.	Linguagem Ladder.....	73
5.	Capítulo V - Ensaio e validação do fotobiorreator construído .....	77
5.1.	Meio de cultura e sua preparação .....	77
5.2.	<i>Kick off</i> da actividade do fotobiorreator .....	79
5.3.	Validação e otimização da instalação.....	80
5.4.	Ensaio realizados às microalgas .....	80
5.4.1.	Sólidos totais.....	80
5.4.2.	Medição do nível de pH.....	82
5.4.3.	Densidade ótica.....	82
Capítulo VI.	Demonstração e análise de resultados .....	85
6.1.	Resultados e considerações do 1º ensaio .....	85

6.1.1.	Resultados do ensaio de sólidos totais.....	85
6.1.2.	Resultados do ensaio de D.O. do 1º ensaio.....	87
6.2.	Problemas encontrados e respetivas soluções.....	88
6.3.	Resultados e considerações do 2º ensaio .....	89
6.3.1.	Resultados do ensaio de sólidos totais secos do 2º ensaio .....	90
6.3.2.	Resultados do ensaio de D.O. do 2º ensaio.....	91
6.4.	Comparação entre culturas .....	92
6.5.	Recolha das microalgas (Colheita).....	95
6.6.	Avaliação técnica e económica do projeto.....	96
6.7.	Comparação de resultados de taxas de crescimento entre o fotobiorreator piloto em estudo e instalações reais em funcionamento .....	99
7.	Capítulo VII. Conclusões e trabalhos futuros .....	101
8.	Bibliografia e referências.....	103
9.	Anexos .....	107



## Índice de figuras

Ilustração 1- Motor do modelo CUMMINS 4BTA 3.9.

Ilustração 2, 3 e 4- a) Curvas de potência para o Diesel e o B100; b) Curva de binário para o Diesel e o B100; c) Curva de consumo específico para o Diesel e o B100.

Ilustração 5, 6 e 7- a) Curvas de potência para o Diesel e o B20; b) Curva de binário para o Diesel e o B20; c) Curva de consumo específico para o Diesel e o B20.

Ilustração 8- Evolução do consumo mundial final de combustíveis.

Ilustração 9- Evolução das emissões de dióxido de carbono por tipo de combustível a nível mundial.

Ilustração 10- Produção Mundial de Biodiesel.

Ilustração 11- Diferentes tipos de sementes oleaginosas e a sua respetiva percentagem aproximada de óleo.

Ilustração 12- Acumulação de óleo utilizado proveniente do ramo da restauração.

Ilustração 13- Circuito de produção, recolha e valorização de óleos alimentares usados.

Ilustração 14- Processo de produção pelo processo de transesterificação de biodiesel através de óleos alimentares usados.

Ilustração 15- Espécies de macroalgas: *Caulerpa racemosa*; *Sargassum* sp. e *Caulerpa sertularioides*. *Acanthophora spicifera*, *Ulva lactuca* e *Colpomenia*; *Enteromorpha intetisnalis*; *Dichotomar marginata* e *Centroceras clavulatum* .

Ilustração 16- Sequência de lavagem e secagem do "sargaço".

Ilustração 17- Sequência de lavagem e secagem de algas pretas.

Ilustração 18- Biomassa resultante da prensagem.

Ilustração 19- Sargaço e algas pretas após passarem no moinho de lâminas.

Ilustração 20, 21 e 22- a) Tanque utilizado para cultivo de microalgas em sistemas "abertos" no Instituto Nacional de Tecnologia em Brasília, Brasil; b) Sistema aberto localizado na empresa Cyanotech; c) Fotobiorreator utilizado no NPDEAS (Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia autossustentável).

Ilustração 23 e 24- a) Esquema de uma pista Raceway; b) Fotografia de uma piscina Raceway para produção da espécie *Spirulina*, situada na empresa Earthrise Nutritionals, em Califórnia, Estados Unidos .

Ilustração 25- Processo de centrifugação em microalgas da espécie *Chlorella vulgaris*.

Ilustração 26- Processo de flotação em microalgas.

Ilustração 27- Evolução do processo de floculação em microalgas.

Ilustração 28- Processo de filtração do meio de cultura com microalgas.

Ilustração 29- Diferentes formas de obtenção de energia através de biomassa.

Ilustração 30- Processos de conversão de energia a partir de microalgas.

Ilustração 31- Produção de biodiesel por transesterificação.

Ilustração 32- Reações de transesterificação nos triglicéridos.

Ilustração 33- Esquema de um biorreator do tipo tubular.

Ilustração 34 e 35- a) Fotobiorreator com orientação vertical; b) Fotobiorreator tubular de orientação horizontal.

Ilustração 36- Fotobiorreator tubular vertical com iluminação artificial exterior.

Ilustração 37- Esquema de um fotobiorreator tubular em alfa.

Ilustração 38 e 39 - a) Esquema de funcionamento de um fotobiorreator do tipo airlift com dois canais [32]; b) esquema de funcionamento de um fotobiorreator do tipo airlift com três canais .

Ilustração 40- Conjunto de fotobiorreatores de placas planas.

Ilustração 41- Esquema de um fotobiorreator do tipo tanque agitado.

Ilustração 42 e 43- Desenho em Solidworks do fotobiorreator projetado.

Ilustração 44 e 45- a) Vista frontal do desenho em Solidworks do depósito da água; b) Vista superior do desenho em Solidworks do depósito da água.

Ilustração 46 e 47- a) Propriedades óticas do acrílico tipo EX (espectro de transmissão UV, visível e LR para as dimensões apresentadas); -b) Comparação da transmissão luminosa em percentagem de vários tipos de acrílicos e plásticos, ao longo de uma década.

Ilustração 48- Desenho em Solidworks do suporte do depósito

Ilustração 49- desenho em Solidworks da "torre" central.

Ilustração 50- Picos de absorção de luz da clorofila a e b.

Ilustração 51 e 52- a) Duas ilustrações de desenhos em Solidworks da torneira de recolha de amostras;  
b) Ilustração da torneira escolhida.

Ilustração 53 e 54- a) Desenho em Solidworks do sistema de agitação do meio; - b) Ilustração da bomba de circulação de água utilizada.

Ilustração 55- Simulação das velocidades de escoamento da água no interior da tubagem com uma bomba instalada.

Ilustração 56- Desenho em Solidworks do espelho de reflexão da luz.

Ilustração 57 e 58- a) Desenho em Solidworks do fotobiorreator com a botija.; b) Botija de dióxido de carbono.

Ilustração 59- Kit de CO2 da CrystalRed

Ilustração 60- Ilustração da resistência de aquecimento da água do depósito

Ilustração 61, 62 e 63- a) Medidor de pH electronic; b) Fitas de medição de pH; c) Tabela de cores para medição de pH.

Ilustração 64- Montagem do depósito em acrílico.

Ilustração 65 e 66- a) Teste à vedação do depósito; b) Cedência do depósito.

Ilustração 67- Veio central acoplado com as 4 lâmpadas T5

Ilustração 68 e 69- a) Construção do depósito; b) Teste a vedação do depósito

Ilustração 70- Teste a vedação da torneira de amostras

Ilustração 71 e 72- a) Carrinho de suporte com o depósito; b) Testes à vedação e iluminação.

Ilustração 73- Colocação das bombas no depósito.

Ilustração 74- Esquema de funcionamento de um PLC.

Ilustração 75- Ciclo simplificado do funcionamento de um PLC.

Ilustração 76, 77, 78 - a) PLC CPM1A; b) Termostato eletrónico E5L-A; c) Luxímetro DMC 337; d) Transmissor de pH digital 8205.

Ilustração 79- Esquema explicativo de um Grafcet e seus constituintes.

Ilustração 80- Grafcet de funcionamento do leitor de pH.

Ilustração 81- Grafcet de funcionamento da resistência

Ilustração 82- Grafcet de funcionamento da iluminação.

Ilustração 83- Esquema do fluxo energético num diagrama de Ladder.

Ilustração 84- Transições e ações do Ladder da iluminação.

Ilustração 85 e 86- a) Transições do Ladder da resistência; b) Ações do Ladder da resistência.

Ilustração 87 e 88- a) Transições do Ladder do leitor de pH; b) Ações do Ladder do leitor de pH.

Ilustração 89 e 90- Imagens microscópicas de *Chlorella emersonii*.

Ilustração 91- Início do funcionamento do fotobiorreator.

Ilustração 92 e 93- Sólidos totais secos.

Ilustração 94- Curva de crescimento de microrganismos e suas etapas

Ilustração 95- Amostras da primeira cultura.

Ilustração 96- Curva de resultados do ensaio de sólidos totais da 1ª cultura.

Ilustração 97- Separação por fases da curva de resultados do ensaio de sólidos totais da primeira cultura.

Ilustração 98- Curva de resultados do ensaio de D.O. da 1ª cultura

Ilustração 99 e 100- Fotobiorreator em funcionamento com a agitação deficiente; Fotobiorreator em funcionamento com alterações na agitação.

Ilustração 101 e 102- Fundo do depósito com acumulação de biomassa; Fundo do depósito com marcas de arrastamento da biomassa do fundo do depósito.

Ilustração 103- Amostras da segunda cultura.

Ilustração 104- Curva de resultados do ensaio de sólidos totais da 2ª cultura.

Ilustração 105- Curva de resultados do ensaio de D.O. da 2ª cultura

Ilustração 106- Curvas de resultados do ensaio de sólidos totais das duas culturas executadas.



Ilustração 107- Gráfico comparativo da percentagem de crescimento das duas culturas elaboradas.

Ilustração 108- Comparação de resultados do ensaio de D.O. das duas culturas

Ilustração 109- Processo de floculação: a) Biomassa sem floculante; b) introdução do floculante; c) atuação do floculante (4min depois); d) atuação do floculante - final

Ilustração 110 e 111- Amostras da biomassa recolhida.



## Índice de tabelas

Tabela 1- Misturas de combustíveis utilizadas nos ensaios.

Tabela 2- Valores de potência para todas as misturas de combustível testados.

Tabela 3- Valores de binário para todas as misturas de combustíveis testados.

Tabela 4- Valores de consumo específico para todas as misturas de combustíveis testados.

Tabela 5- Valores máximos e mínimos obtidos durante os ensaios.

Tabela 6- Tipologia do setor dos biocombustíveis nos seus maiores produtores.

Tabela 7- Propriedades do Biodiesel segundo a norma EN 14214.

Tabela 8- Comparação das características usuais de um Biodiesel com o Diesel normal.

Tabela 9- Comparação entre várias matérias primas usadas no fabrico de biodiesel.

Tabela 10- Teor em óleo de algumas espécies de microalgas.

Tabela 11- Constituintes celulares e poder calorífico de diferentes espécies de *Chlorella* cultivadas em meio completo e meio deficiente em azoto .

Tabela 12- Comparação de produtividade entre fotobiorreatores e pistas raceway .

Tabela 13- Comparação entre fotobiorreatores e sistemas "abertos".

Tabela 14- Resumo das características dos catalisadores básicos e ácidos

Tabela 15- Classificação de vários tipos de fotobiorreatores sobre diversos fatores.

Tabela 16 e 17- Propriedades do acrílico tipo EX.

Tabela 18- Propriedades do acrílico

Tabela 19- Propriedades do vidro

Tabela 20- Comparação entre os resultados das propriedades de cada material

Tabela 21- Características da bomba selecionada.

Tabela 22- Valores de velocidade em m/s por zona da tubagem da 1ª simulação.

Tabela 23- Designação de cada componente do sistema de automação e a sua respetiva função.

Tabela 24 e 25- Legenda das ações do Grafcet do med. pH; Legenda das transições do grafcet do med. pH.

Tabela 26- Legenda de ações do graficet da resistência.

Tabela 27- Legenda de transições do graficet da resistência

Tabela 28- Legenda das ações do graficet da iluminação

Tabela 29- Legenda das transições do graficet da iluminação

Tabela 30- Legenda das transições e ações do diagrama de Ladder da iluminação.

Tabela 31 e 32- Legenda das transições e ações do diagrama de Ladder da resistência.

Tabela 33 e 34- Legenda das transições e ações do diagrama de Ladder do leitor de pH.

Tabela 35- Lista de características da espécie *Chlorella emersonii*

Tabela 36- Meio de cultivo indicado pela ACOI para a espécie *Chlorella emersonii*

Tabela 37- Constituição da solução de micronutrientes inserida no meio de cultivo

Tabela 38- Resultados do ensaio de sólidos totais da 1ª cultura.

Tabela 39- Análise dos resultados dos ensaios de sólidos totais da 1ª cultura.

Tabela 40- Resultados do ensaio de D.O. da 1ª cultura

Tabela 41- Resultados do ensaio de sólidos totais da 2ª cultura.

Tabela 42- Análise dos resultados dos ensaios de sólidos totais da 2ª cultura.

Tabela 43- Resultados do ensaio de D.O. da 2ª cultura

Tabela 44- Comparação do crescimento total e diário das duas culturas realizadas.

Tabela 45- Comparação das duas cultura a nível da quantidade de biomassa extraída e respetivo lucro.

Tabela 46- Litragem de biodiesel hipoteticamente retirada

Tabela 47- Cálculo dos custos dos equipamentos do fotobiorreator

Tabela 48- Análise dos custos operacionais dos equipamentos do fotobiorreator.

Tabela 49- Cálculo da produção mensal

## 1. Capítulo I - Fundamentos teóricos

### 1.1. Enquadramento do tema e objetivos

Desde o virar do século que se tem observado, mais concretamente, as alterações climáticas no nosso planeta, derivadas, essencialmente, da poluição ocasionada pelo crescente consumo global de combustíveis fósseis. Juntando este acréscimo de consumo de combustíveis fósseis à diminuição das reservas mundiais dos mesmos, o seu preço tem vindo a aumentar exponencialmente, sendo esta uma das razões para a recente crise económica nos países não possuidores de reservas desta tipologia de combustíveis. Devido às razões anteriormente mencionadas, a corrida pelo desenvolvimento de energias alternativas tem-se vindo a intensificar nos países desenvolvidos, tendo sido o protocolo de Kyoto um grande impulsionador, visto que estabeleceu a redução de 5,2% nos gases com efeito de estufa até ao presente ano de 2012, gases estes provenientes essencialmente da queima de combustíveis fósseis. No ramo de energias renováveis, podemos incluir a energia eólica, a utilização da biomassa, a energia das marés, a utilização de biocombustíveis, entre outras. Este esforço tem sido feito, essencialmente pelo governo dos Estados Unidos e também pelos Departamentos de Energia da União Europeia, juntamente com empresas privadas e estabelecimento de ensino superior. Devido a este empenho generalizado, a utilização de energias renováveis já se encontra patente um pouco por todo o mundo, tendo vindo a aumentar o seu uso como também a sua eficiência.

De entre as várias formas de energia renovável acima referidas, este estudo centrar-se-á essencialmente nos biocombustíveis, mais concretamente, no Biodiesel. Como definição, biocombustíveis são considerados quaisquer combustíveis de origem biológica, que não seja fóssil, apresentando-se por isso como uma fonte de energia renovável. Uma energia renovável é uma energia que é repostada naturalmente a uma taxa igual ou superior à do seu consumo <sup>[1]</sup>.

Toda a história recente do ramo dos motores está associada, principalmente, ao uso do petróleo na sua alimentação mas, já no século passado, Henry Ford e Rudolf Diesel, utilizavam motores alimentados a álcool e a óleo de amendoim respetivamente, tendo ambos alterado a alimentação dos seus motores para combustíveis derivados do petróleo, visto que este combustível possui uma maior energia por litro que os anteriormente referidos <sup>[2]</sup>.

Considerou-se pertinente o projeto e construção de um fotobiorreator para produção acelerada de microalgas, por forma a desenvolver conhecimentos e adquirir resultados nesta área de forma a colmatar a falta de informação científica e os poucos casos práticos de sucesso realizados neste domínio.

Inicialmente, no capítulo 1, apresenta-se o enquadramento do tema na atualidade mundial e nacional, as definições e as propriedades do biodiesel, como também, as suas matérias primas.

No capítulo 2, desenvolve-se todo o processo de produção de biodiesel através de microalgas, desde o seu método de cultura e todo o seu processamento até ao produto final.

No capítulo 3, estudam-se e comparam-se as várias tipologias de fotobiorreatores existentes atualmente.

No capítulo 4, analisam-se as condições necessárias para o projeto do fotobiorreator e escolhe-se a tipologia a executar. São também, demonstrados todos os elementos que compõem o fotobiorreator.

No capítulo 5, dá-se o arranque do funcionamento do fotobiorreator, explicando-se a preparação do meio de cultura das microalgas e todos os ensaios realizados para acompanhar a progressão da cultura.

No capítulo 6, realiza-se a análise, o tratamento e a comparação dos resultados referentes aos ensaios realizados às duas culturas de microalgas. De seguida, executa-se uma avaliação técnica e económica do projeto e faz-se a comparação dos resultados obtidos com instalações já existentes e em funcionamento.

Finalmente, no capítulo 7, retiram-se as conclusões finais e são propostos trabalhos futuros.

### 1.1.1 Aplicação do biodiesel em motores a Diesel

A nível de aplicação do biodiesel em motores comuns, este pode ser utilizado na sua forma pura (B100) ou pode ser misturado com diesel proveniente do petróleo em qualquer concentração, dependendo das bombas de injeção dos motores em questão. Alguns, limitam o uso do biodiesel aos B5 e B20 devido às altas pressões dos motores. O uso intensivo de biodiesel em motores comuns, promove a degradação de juntas e mangueiras de borracha natural devido a reações com as propriedades do biodiesel. O uso de mangueiras e juntas de elastómero FKM evita essa degradação. Os veículos de construção posterior a 1992 já são munidos deste tipo de material nas suas juntas e mangueiras. Outra desvantagem do uso intensivo de biodiesel é o fato de este biocombustível entupir com mais frequência os filtros de combustível.

Nas misturas utilizadas de biodiesel e diesel, é utilizado o fator "B" de forma a indicar a quantidade de biodiesel incluída nas misturas de combustível. O denominado combustível B100 é o biodiesel na sua forma pura, ou seja, com 100% de concentração. No caso dos rotulados B20, B5 e B2, possuem, respetivamente, 20%, 5% e 2% de biodiesel na mistura<sup>[4]</sup>

O aumento de concentração de biodiesel na mistura promove um combustível mais amigo do ambiente. É possível utilizar o biodiesel na sua forma pura, ou seja, o combustível B100 em motores comuns, porém, estes necessitam de modificações de caráter técnico. Para se poder utilizar o biodiesel em motores comuns sem ter que promover alterações no mesmo, é necessária a utilização de misturas com concentração de biodiesel inferior a 20%, neste caso, teriam que ser utilizados os B20, os B5 e os B2<sup>[5]</sup>.

Em 2005, a Chrysler lançou para o mercado americano o modelo "*Jeep Liberty CRD*" a diesel com misturas de 5% de biodiesel. Os responsáveis da Chrysler afirmaram já em 2007 que, se a qualidade dos biocombustíveis nos Estados Unidos fosse padronizada, ou seja, se fosse regulamentada a nível legal com índices qualitativos exigidos, então, aumentariam a cobertura de garantia de qualidade para misturas de biodiesel em 20% nos motores dos seus veículos<sup>[3]</sup>.

De forma a realizar uma exata comparação de vários critérios de avaliação entre o desempenho de motores alimentados a Diesel ou a misturas de Diesel/biodiesel, foi realizado um projeto no departamento de engenharia agrícola da Universidade Estadual do Oeste do Paraná que consistiu na utilização de um motor do modelo CUMMINS 4BTA 3.9<sup>[6]</sup>, com a turbina removida, sendo este colocado em funcionamento com uma gama de misturas de combustíveis, desde os B100 até aos B2, analisando no final os resultados relativos aos consumos específicos de combustível, ao binário produzido e a sua potência.



Motor adaptado à base do dinamômetro. 1 - suporte; 2 - motor; 3 - turbina hidráulica; 4 - célula de carga, e 5 - fluxômetro.

Ilustração 1- Motor do modelo CUMMINS 4BTA 3.9 [6].

As misturas utilizadas nos ensaios foram as descritas na tabela seguinte:

Tabela 1- Misturas de combustíveis utilizadas nos ensaios [6].

Denominação	Composição
B0	100% de óleo diesel convencional (testemunha)
B2	2% de Biodiesel de soja e 98% de diesel
B5	5% de Biodiesel de soja e 95% de diesel
B10	10% de Biodiesel de soja e 90% de diesel
B20	20% de Biodiesel de soja e 80% de diesel
B50	50% de Biodiesel de soja e 50% de diesel
B75	75% de Biodiesel de soja e 25% de diesel
B100	100% de Biodiesel de soja

Após colocação em funcionamento do motor com as misturas atrás descritas, foi possível retirar resultados referentes ao parâmetros descritos no início deste subcapítulo.

Tabela 2- Valores de potência para todas as misturas de combustível testados [6].

rpm	Potência (kW)							
	B0	B2	B5	B10	B20	B50	B75	B100
1.400	27,3	28,5	28,5	28,3	29,1	25,4	24,5	22,1
1.533	32,1	32,8	32,8	32,4	33,8	30,6	29,8	27,5
1.667	36,1	36,5	36,6	36,0	37,7	35,1	34,3	32,1
1.800	39,5	39,6	39,7	39,0	41,0	38,8	38,1	36,0
1.933	42,1	42,1	42,2	41,5	43,6	41,8	41,2	39,1
2.067	44,1	44,0	44,1	43,4	45,5	44,2	43,5	41,5
2.200	45,3	45,2	45,5	44,8	46,8	45,7	45,0	43,1
2.333	45,8	45,9	46,2	45,5	47,3	46,6	45,8	44,0
2.467	45,7	46,0	46,3	45,7	47,2	46,7	45,9	44,1
2.600	44,8	45,4	45,9	45,4	46,3	46,1	45,2	43,6



Tabela 3- Valores de binário para todas as misturas de combustíveis testados [6].

rpm	Binário (N m)							
	B0	B2	B5	B10	B20	B50	B75	B100
1.400	192,7	191,8	192,1	192,3	192,1	180,1	174,5	159,5
1.533	200,0	196,9	197,7	197,0	199,1	191,2	186,5	172,2
1.667	204,6	199,8	200,9	199,6	203,5	199,1	195,1	181,6
1.800	206,4	200,5	201,9	200,1	205,1	203,8	200,4	187,7
1.933	205,6	198,9	200,5	198,5	204,1	205,3	202,2	190,5
2.067	202,0	195,0	196,8	194,9	200,4	203,6	200,7	190,1
2.200	195,7	188,9	190,8	189,1	194,0	198,7	195,9	186,4
2.333	186,7	180,5	182,5	181,3	184,9	190,6	187,6	179,4
2.467	174,9	169,8	171,9	171,5	173,2	179,3	176,0	169,1
2.600	160,4	156,9	158,9	159,5	158,7	164,8	161,1	155,6

Tabela 4- Valores de consumo específico para todas as misturas de combustíveis testados [6].

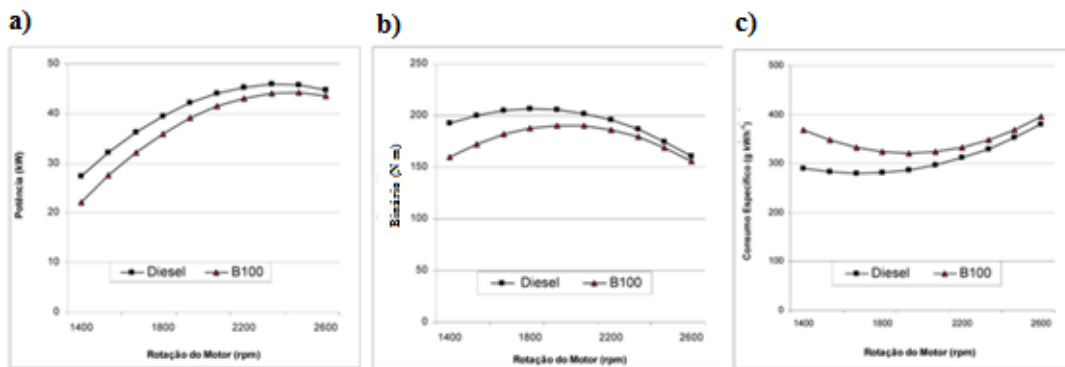
rpm	Consumo específico (g kWh <sup>-1</sup> )							
	B0	B2	B5	B10	B20	B50	B75	B100
1.400	289,7	272,8	276,8	277,9	284,6	311,5	325,2	368,7
1.533	282,7	270,0	273,3	275,7	278,2	299,2	310,2	348,0
1.667	280,0	270,6	273,3	276,6	275,7	291,6	300,4	333,1
1.800	281,5	274,6	276,6	280,7	277,2	288,7	295,8	324,2
1.933	287,3	282,0	283,3	288,1	282,7	290,4	296,3	321,3
2.067	297,3	292,8	293,4	298,6	292,2	296,9	302,0	324,2
2.200	311,6	306,9	306,9	312,3	305,6	307,9	312,9	333,1
2.333	330,1	324,4	323,7	329,2	323,1	323,7	329,0	347,9
2.467	352,8	345,3	343,9	349,3	344,5	344,1	350,2	368,6
2.600	379,7	369,6	367,5	372,6	369,9	369,2	376,7	395,3

O combustível B100, ou seja, o biodiesel na sua forma pura, comparativamente com o Diesel puro, apresenta resultados inferiores a nível de potência e do binário e superiores consumos específicos. De forma a fazer a comparação entre estes dois combustíveis, a tabela seguinte apresenta a comparação dos seus valores máximos e mínimos a nível de potência, binário e consumo específico.

Tabela 5- Valores máximos e mínimos obtidos durante os ensaios [6].

Misturas	Potência Máxima (kW)	Binário Máximo (N m)	Consumo Específico Mínimo (g kWh <sup>-1</sup> )
B0	45,8 a 2.333 rpm	206,4 a 1.800 rpm	280 a 1.667 rpm
B2	46 a 2.467 rpm	200,5 a 1.800 rpm	270 a 1.533 rpm
B5	46,3 a 2.467 rpm	201,9 a 1.800 rpm	273,3 a 1.667 rpm
B10	45,7 a 2.467 rpm	200,1 a 1.800 rpm	275,7 a 1.533 rpm
B20	47,3 a 2.333 rpm	205,1 a 1.800 rpm	275,7 a 1.667 rpm
B50	46,7 a 2.467 rpm	205,3 a 1.933 rpm	288,7 a 1.800 rpm
B75	45,9 a 2.467 rpm	202,2 a 1.933 rpm	295,8 a 1.800 rpm
B100	44,1 a 2.467 rpm	190,5 a 1.933 rpm	321,3 a 1.933 rpm

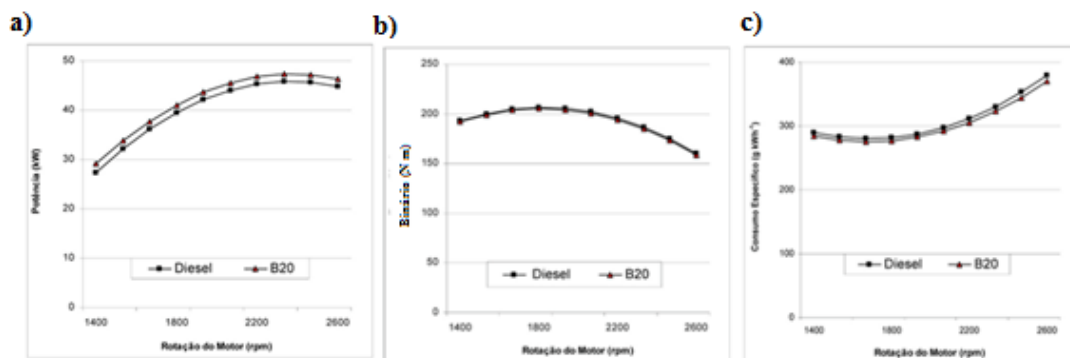
Porteriormente, os resultados obtidos no trabalho por *Cascavel*<sup>®</sup> foram tratados no software "micrologger CR23X", da marca CAMPBELL SCIENTIFIC INC, obtendo-se as seguintes curvas de progressão da potência, do binário e do consumo específico ao longo dos ensaios com o Diesel e o B100.



**Ilustração 2, 3 e 4-** a) Curvas de potência para o Diesel e o B100 [6]; b) Curva de binário para o Diesel e o B100 [6]; c) Curva de consumo específico para o Diesel e o B100 [6].

Enquanto o motor alimentado apenas a Diesel atingiu 45,8 kW de potência a 2333 rpm, com o biodiesel puro foi apenas possível atingir 44,1 kW a 2,467 rpm. A nível de binário, o B100 atingiu o seu valor máximo de 190,5 Nm a 1933 rpm e o Diesel atingiu 206,4 Nm a 1800 rpm. No caso do consumo específico, o B100 apresentou um valor superior que o Diesel mas, este é um fator negativo. O B100 consumiu 321,3 g kWh<sup>-1</sup> a 1933 rpm, já o Diesel consumiu 280 g kWh<sup>-1</sup> a 1667 rpm. A diferença de consumos deve-se ao fato de o biodiesel possuir um menor poder calorífico comparado com o Diesel. A mistura B100 revela-se interessante para ser utilizado em elevadas rotações de funcionamento do motor como revelam os dados adquiridos nos ensaios realizados.

A mistura B20, demonstrou ser a melhor de todas as misturas testadas, possuindo um menor consumo específico, associado a um binário aproximado e a uma maior potência, que o Diesel.



**Ilustração 5, 6 e 7-** a) Curvas de potência para o Diesel e o B20 [6]; b) Curva de binário para o Diesel e o B20 [6]; c) Curva de consumo específico para o Diesel e o B20 [6].

Comparando o Diesel com a mistura B20 é possível verificar que nas condições de 2333 rpm que a potência da mistura é de 47,3 kW, enquanto no Diesel não ultrapassa os 45,8kW. Adicionalmente, o binário máximo atingido a 1800 rpm foi de 205,1 Nm para o B20 e de 206,4Nm para o Diesel. Ao contrário do B100, o B20 atingiu valores de consumo específico menores que os do Diesel. O B20 possui um consumo específico mínimo de 275,7 g kWh<sup>-1</sup> a 1667 rpm, e o Diesel demonstra um consumo específico de 280 g kWh<sup>-1</sup> à mesma rotação.

## 1.2. Impacto ambiental dos combustíveis fósseis

A utilização da energia nas suas mais diversas formas, é algo muito importante na sociedade mundial na atualidade. O desenvolvimento das tecnologias e dos padrões de vida da população mundial acarretaram um crescente aumento do consumo de energia. Outros fatores como o aumento populacional e das suas necessidades associadas, levaram à necessidade de uma maior produção de energia como nunca antes se tinha verificado. Com o aumento do número de habitantes a nível mundial, aumentaram também as necessidades de energia. De entre os consumidores de energia a nível mundial, destacam-se a indústria, a agricultura, as atividades comerciais e os transportes. A produção mundial de energia advém, essencialmente, do carvão, do gás natural e do petróleo como se verifica na figura seguinte. Estes tipos de combustíveis, enquadram-se na categoria dos combustíveis fósseis, ou seja, combustíveis resultantes da decomposição de organismos, animais ou vegetais, mortos, ao longo de milhares e milhares de anos.

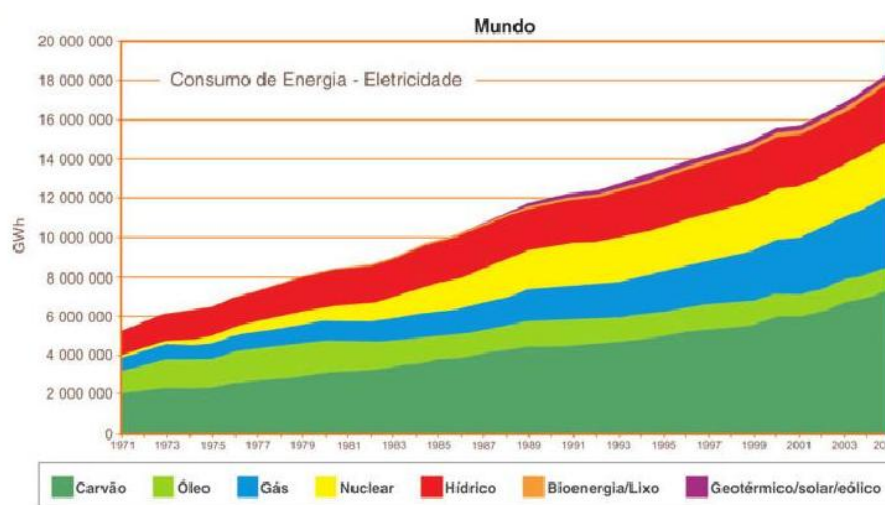


Ilustração 8- Evolução do consumo mundial final de combustíveis [7].

Estes combustíveis e a sua aplicação estão, geralmente, associados ao consumo de energia por parte da área dos transportes que, através da emissão de gases nocivos para a atmosfera, promovem grandes problemas de ordem ambiental como o efeito de estufa e as já notadas mudanças climáticas. Outro problema associado ao uso deste tipo de combustíveis é a existência de derrames ocorridos no decorrer do seu transporte e extração. Estes problemas criam impacto na saúde pública, promovem a degradação dos ecossistemas e o agravamento económico. O já muito referido efeito de estufa é criado

pela emissão de gases, entre ele o CO<sub>2</sub> mas também o NO<sub>x</sub>, o SO<sub>x</sub> e o CO. A evolução do crescente aumento das emissões de CO<sub>2</sub> está evidenciado no gráfico seguinte.

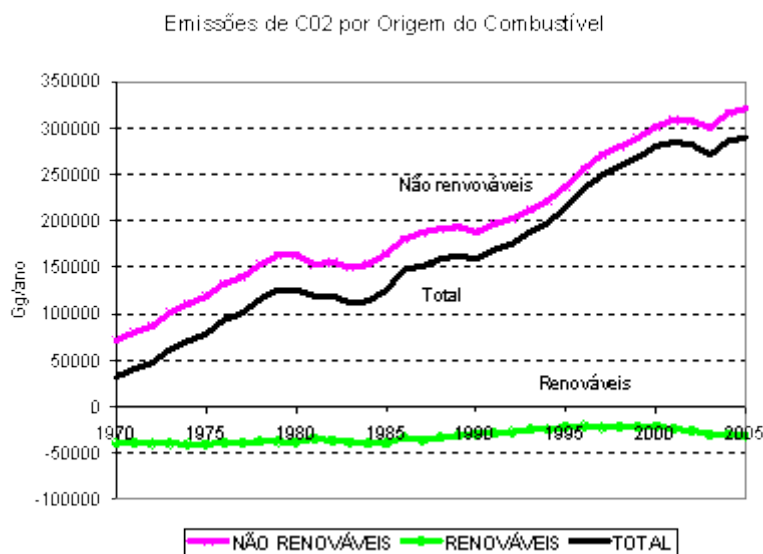


Ilustração 9- Evolução das emissões de dióxido de carbono por tipo de combustível a nível mundial [8].

Como se pode verificar na figura anterior, é de notar um aumento das emissões de dióxido de carbono ao longo das últimas quatro décadas. Este aumento promoveu uma maior destruição da camada de ozono e da poluição em geral, visto que, os gases nocivos referenciados são os maiores responsáveis por estas situações.

Outro problema associado à utilização dos combustíveis fósseis na produção de energia, é o facto de estes pertencerem ao grupo das energias primárias, ou seja, são recursos existentes na natureza que não são renováveis e, com o aumento do seu consumo de forma não controlada, acabarão por se extinguir. Apesar de, ao longo dos tempos, se ter encontrado mais reservas de combustíveis fósseis, não existe nenhum número preciso das quantidades reais das reservas existentes no planeta.

## 1.3. Biodiesel

### 1.3.1 Contexto em Portugal e no Mundo

O biodiesel é um éster metílico produzido a partir de óleos vegetais ou animais, com qualidade de combustível para motores diesel, para utilização como biocombustível <sup>[9]</sup>. A produção do biodiesel advém da transesterificação de óleos e gorduras de álcoois, reação esta descoberta por E. Duffy e J. Patrik em 1853 <sup>[10]</sup>.

O biodiesel é um biocombustível constituído por uma mistura de ésteres (metílicos, etílicos e propílicos) de alquilo, produzido por esterificação de ácidos gordos, presentes em óleos vegetais ou em gorduras animais, com álcoois ( metanol, etanol ou propanol), tendo qualidade para ser utilizado em motores Diesel <sup>[11]</sup>. O início do desenvolvimento deste combustível deu-se no Brasil mas, atualmente, o maior produtor do mesmo encontra-se no mercado Europeu com maior ênfase na Alemanha, sendo a sua produção equivalente a cerca de 42% da totalidade produzida mundialmente <sup>[12]</sup>. Como se pode verificar na ilustração seguinte, a produção de biodiesel não tem parado de aumentar nos últimos anos.

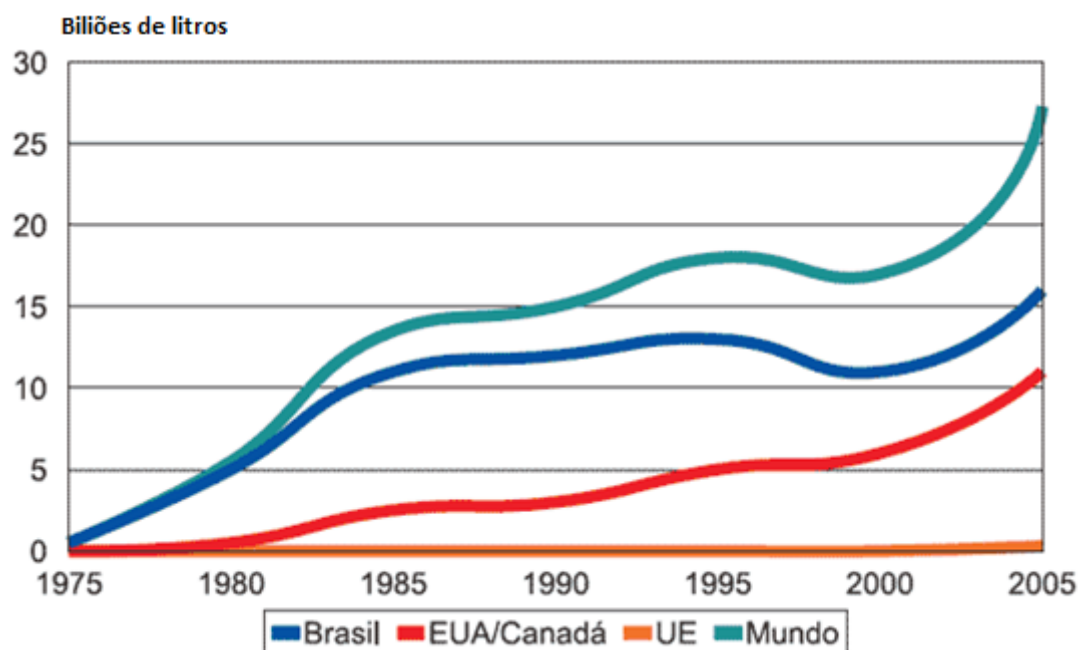


Ilustração 10- Produção Mundial de Biodiesel [13].

A União Europeia situa-se, neste momento, como o maior produtor mundial, sendo responsável pela produção de cerca de 90% da totalidade da produção mundial. Este facto, deve-se entre outros aspetos, ao alto incentivo governamental oferecido pelos governos Europeus para a produção de energias

limpas e, por outro lado, a alta tributação imposta no petróleo, tornando assim o biodiesel um combustível competitivo no mercado. Como tal, demonstra-se na tabela seguinte, as diferenças de biodiesel nos maiores produtores mundiais.

Tabela 6- Tipologia do setor dos biocombustíveis nos seus maiores produtores [14].

Pais	Isenção de impostos	Tipo de biodiesel Comercializado	Matéria-prima	Observações
<b>Alemanha</b>	Completa	Os postos de combustível têm B100 e diesel aditivado (B5)	Colza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 1800 postos de abastecimento</li> <li>- Maior produtor mundial</li> <li>- Mais de 2,5 milhões de veículos aprovados circular com biocombustível</li> <li>- Biodiesel 12% mais barato que o diesel</li> </ul>
<b>Itália</b>	Parcial (até 200 mil ton/ano)	B100: para industria e aquecimento residencial B5 e B25: para transporte	Colza e Girassol	- 17 produtores de biodiesel
<b>França</b>	Parcial (até 317 mil ton/ano)	Mais de metade do diesel comercializado leva 5% de biodiesel (B5), já o B30 é mais utilizado em frotas cativas.	Colza e Girassol	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3 grandes produtores de biodiesel</li> <li>- Das 13 refinarias existentes 7 misturam 5% de biodiesel ao diesel.</li> <li>- 4 mil veículos utilizam o biodiesel em mistura, dos quais, mais de metade usam B30</li> </ul>
<b>Estados Unidos</b>	Incentivos federais, além das taxas específicas para cada estado.	B20 (mais comum), B2 (usado por agricultores, alguns estados obrigam que todo o diesel comercializado contenha 2% de biodiesel) e B100 (pouco usado)	Soja e óleo residual de fritura	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Actualmente usado nos transportes públicos, correios e órgãos do governo</li> <li>- 53 fábricas de biodiesel (capacidade de 1,18 milhões de ton/ano)</li> <li>- Programa é baseado em pequenos produtores</li> </ul>

Apesar de se saber que a produção intensiva deste tipo de combustíveis, diminui a dependência dos combustíveis fósseis e diminui a intensidade da poluição provocada pelos mesmos, a sua utilização não se traduz apenas em fatores positivos. É de realçar que a intensa produção destes combustíveis, requer grande uso de pesticidas e adubos azotados causando a erosão dos solos. Por outro lado, são consumidas grandes quantidades de produtos agrícolas na produção de biodiesel que poderiam ser utilizados para alimentar um grande número de pessoas famintas espalhadas pelo mundo e promovem o aumento do preço dos alimentos em questão <sup>[15]</sup>.

A produção de biocombustíveis possui outra desvantagem, visto que, estes foram desenvolvidos para combater a dependência dos combustíveis fósseis, mas, as matérias primas utilizadas e os meios de produção requerem o uso de combustíveis fósseis para o funcionamento do equipamento envolvido no seu processo de produção e transporte. Na Alemanha, maior produtor mundial de biodiesel, é utilizada a colza como matéria-prima nesta produção mas, para esta ser executada é necessário fornecer 1 unidade

de combustível fóssil para se obterem 2,5 unidades de biodiesel. Deste modo, podemos concluir que um dos maiores problemas da produção do biodiesel centra-se no facto de serem necessárias matérias primas provenientes de culturas agrícolas alimentares. Então, como possível solução para esta desvantagem, existe a possibilidade ou a alternativa de produzir biodiesel através de microalgas, sendo que estas já não provêm de culturas agrícolas alimentares. Como desvantagem deste processo, temos o facto de os custos associados à sua produção industrial serem elevados, dificultando assim a sua implementação.

Devido aos problemas citados no parágrafo anterior, foi criada a Estratégia Europa 2020 com três objetivos principais <sup>[16]</sup>:

- Crescimento inteligente: desenvolver uma economia baseada no conhecimento e na inovação;
- Crescimento sustentável: promover uma economia mais eficiente em termos de utilização dos recursos, mais ecológica e mais competitiva;
- Crescimento inclusivo: fomentar uma economia com níveis elevados de emprego que assegura a coesão social e territorial.

De entre vários objetivos traçados nesta estratégia, de carácter ambiental destacam-se: " os objetivos em matéria de clima/energia «20/20/20» devem ser cumpridos (incluindo uma subida para 30% do objetivo para a redução de emissões, se as condições o permitirem)" <sup>[16]</sup>. As missões consideradas para obter os objetivos traçados de carácter ambiental focam-se em "uma Europa eficiente em termos de recursos destinada a contribuir para dissociar o crescimento económico da utilização dos recursos, assegurar a transição para uma economia hipocarbónica, aumentar a utilização das fontes de energia renováveis, modernizar o nosso setor dos transportes e promover a eficiência energética." <sup>[16]</sup>

De forma mais analítica, na diretiva de 2009/28/CE de 23 de Abril <sup>[16]</sup> é referido como grande objetivo da estratégia 2020, "Reduzir as emissões de gases com efeito de estufa em pelo menos 20 % relativamente aos níveis de 1990, ou em 30 %, se estiverem reunidas as condições necessárias 2; aumentar para 20 % a quota de energias renováveis no nosso consumo final energético e aumentar em 20 % a eficiência energética.

Após este enquadramento e à conclusão chegada, esta dissertação foca-se no estudo da realidade da produção de biodiesel através de microalgas, analisando-a e projetando um fotobiorreator para acelerado crescimento das mesmas.

### 1.3.2. Propriedades do Biodiesel

Para qualquer biodiesel poder ser utilizado num motor diesel requer certas características como os impactos ambientais das suas emissões, combustibilidade e compatibilidade ao uso e ao manuseio.

Uma característica que é estritamente necessário controlar é o teor de enxofre e de hidrocarbonetos aromáticos pois estes estão ligados com o impacto das emissões, podendo assim diminuir a libertação de partículas mutagénicas.

Em qualquer utilização de um motor, é muito importante a combustão realizada no seu interior e a sua facilidade em ser executada, sendo que a combustibilidade é um parâmetro importante a controlar, sendo avaliada pelo poder calorífico, o índice de trabalho e a viscosidade cinemática do biodiesel.

A compatibilidade ao uso e ao manuseio são ambas características do biodiesel , pois estão associadas ao tempo de vida do motor e ao transporte, armazenamento e a distribuição do combustível, sendo necessário ter bem controlada a toxicidade, ponto de inflamação e a sua fluidez.

Após serem conhecidas as características base que o biodiesel terá que respeitar para poder ser utilizado em segurança num motor Diesel, foram estabelecidas normas europeias que regulam parâmetros físicos e químicos, tornando assim o biodiesel ideal muito semelhante ao diesel usualmente conhecido. Na Europa são impostos valores máximos e mínimos dos requisitos do biodiesel impostos pela norma EN 14214 <sup>[17]</sup>.



Tabela 7- Propriedades do Biodiesel segundo a norma EN 14214 [17].

CARACTERÍSTICA	UNIDADE	Brasil ANP07/2008	UE EN 14214	EUA ASTM D6751
Aspecto	---	Límpido e isento de impurezas	---	---
Massa específica *	kg/m <sup>3</sup>	890-900 a 20 °C	860-900 a 15 °C	---
Viscosidade cinemática a 40 °C *	mm <sup>2</sup> /s	3,0-6,0	3,5-5,0	1,96,0
Água e sedimentos, máx. *	% volume	---	---	0,05
Ponto de fulgor, mín. *	°C	100	120	130
Destilação: 90% vol. recuperados, máx. *	°C	---	---	300
Resíduo de carbono des. máx. *	% massa	Err. 100% da amostra 1,050	10% resíduo da destilação 0,5	Err. 100% da amostra 0,05
Cinzas sulfatadas, máx. *	% massa	1,020	0,02	---
Enxofretotál, máx. *	mg/kg	50	10	15
Corrosividade ao cobre, 3h a 50 °C, máx. *	·	1	1	1
Número de cetanos *	·	Anotar	51 (mín.)	47 (mín.)
Ponto de entupimento de filtro a frio, máx. *	°C	19	Por região	---
Ponto de fluidez (pour point - PP) *	°C	---	Por região	---
Ponto de nuvem (cloud point - CP) *	°C	---	---	Registrar
Sódio + Potássio, máx.	mg/kg	5	5	---
Cálcio + Magnésio, máx.	mg/kg	5	5	---
Fósforo, máx.	mg/kg	10	10	10
Contaminação total, máx.	mg/kg	24	24	---
Teor de éster, mín.	% massa	96,5	96,5	---
Índice de ácido, máx.	mg KOH/g	0,50	0,5	0,5
Glicerim livre, máx.	% massa	0,02	0,02	0,02
Glicerim total, máx.	% massa	0,25	0,25	0,24
Monoglicérides	% massa	Anotar	0,8 (máx.)	---
Diglicérides	% massa	Anotar	0,2 (máx.)	---
Tiglicérides	% massa	Anotar	0,2 (máx.)	---
Metanol ou etanol, máx.	% massa	0,20	0,20	---
Índice de iodo	g I <sub>2</sub> /100 g	Anotar	1,20 (máx.)	---
Estabilidade à oxidação a 110 °C, min	h	6	6	---
Água, máx.	mg/kg	500	500	500
Ácido insaturado	% massa	---	12 máx.	---
Metil ésteres com mais que 4 insaturações	% massa	---	1 máx.	---

A nível mais técnico, podemos dizer que o biodiesel, geralmente, possui as seguintes características <sup>[17]</sup>:

- Quando está na forma pura, possui um ponto de combustão acima dos 149°C enquanto o Diesel normal é de 52°C, tornando-o assim um combustível mais seguro;
- A exaustão deste tipo de combustível é menos ofensiva, apesar de o cheiro se assemelhar ao cheiro de fritos alimentares;
- Visto que o biodiesel é mais oxigenado que o diesel, a sua combustão torna-se mais completa;
- Por ser um combustível oriundo de fontes renováveis, ou seja, é considerado uma energia renovável, ajuda no combate à poluição pela redução das emissões de dióxido de carbono.

De forma a ser possível aplicar o biodiesel produzido através de microalgas, é necessário que este produto final possua características impostas na norma EN 14214:2003 <sup>[17]</sup>. De entre as várias imposições existentes na norma referida, estão descritas de seguida as mais importantes para a aplicação do biodiesel e a sua definição.

- **Viscosidade Cinemática a 40 ° C (mm<sup>2</sup>/s)**

Esta característica é uma das mais importantes na caracterização do biodiesel e sua qualidade. A viscosidade cinemática é a medida de resistência interna ao escoamento de um combustível. O aumento do valor da viscosidade cinemática altera o rendimento da injeção do combustível e da combustão. Com o aumento da viscosidade cinemática dá-se o aumento da pressão e da quantidade de combustível injetado devido ao aumento da resistência da bomba injetora. Este facto é mais notório quando o motor trabalha a temperaturas mais baixas. Devido aos factos atrás referidos, os motores que funcionam a biodiesel possuem um maior tempo de ignição e de injeção de combustível, aumentando assim as emissões de NO. Outras desvantagens que ocorrem com o aumento da viscosidade cinemática são as seguintes:

- ✓ Desgaste das partes lubrificadas do sistema de injeção;
- ✓ Vazamento da bomba de combustível;
- ✓ Atomização incorreta na câmara de combustão;
- ✓ Carbonização dos pistões.

O aumento ou diminuição deste valor prende-se com o teor de ésteres metílicos, que é também associado de forma proporcional ao grau de pureza do biodiesel. De forma inversamente proporcional, também está associado o teor de ésteres metílicos com o número de ligações duplas de cadeias ácidas. Deste fato vem a explicação para a elevada viscosidade cinemática no biodiesel produzido através de matérias primas saturadas. Para se obter biodiesel com graus de viscosidades baixos, usam-se ésteres de ácidos gordos como combustível ao invés dos óleos e gorduras em bruto.

- **Densidade a 15 ° C (g/cm<sup>3</sup>)**

Tal como a viscosidade cinemática, a densidade é outro fator importante no desempenho e eficácia na injeção do combustível. Também como a viscosidade, a densidade tem que cumprir valores máximos estabelecidos na norma EN 14214:2003 <sup>[17]</sup>. Esta propriedade é uma medida indireta no controlo das características de algumas matérias primas com objetivo da produção de biodiesel. Como os

resultados conhecidos apresentam que os níveis de densidade do biodiesel se enquadram nos níveis impostos legalmente, o óleo proveniente de microalgas pode ser utilizado na produção de biodiesel.

- **Ponto de inflamação (° C)**

O risco de incêndio em todos os equipamentos providos de combustíveis inflamáveis é algo a controlar com extrema precisão. Desta forma, o ponto de inflamação dos combustíveis é uma propriedade importante na prevenção de problemas. Sendo este o valor no qual um combustível inflama, o ideal será que seja elevado. No caso de este valor ser reduzido, aumenta exponencialmente o perigo do seu manuseamento e funcionamento. Como a presença do metanol no combustível está associada de forma direta a um decréscimo do ponto de inflamação, este composto é benéfico no capítulo da segurança do combustível mas, a nível de corrosão dos componentes metálicos do motor já se torna desfavorável.

- **Índice de Acidez**

O índice de acidez é caracterizado pela quantidade de ácidos gordos livre e minerais que estão presentes numa amostra do combustível. Como o hidróxido de potássio neutraliza os ácidos referidos, a massa de hidróxido de potássio necessária à neutralização total dos ácidos define o índice de acidez da amostra. O aumento deste índice aumenta a corrosão dos componentes dos motores, e ocorre aquando da degradação do biodiesel na altura do seu armazenamento, principalmente se este ocorrer a temperaturas elevadas.

Se a reação de transesterificação que faz parte do processo de obtenção de biodiesel for executada com sucesso, verifica-se uma quase total conversão dos ácidos gordos livres, tornando assim o biodiesel quase inofensivo para os motores.

- **Teor de Água (mg/kg)**

Propriedade responsável pela degradação do biodiesel em etapa de armazenamento, principalmente a elevadas temperaturas, baixando o seu nível de pureza e afetando a estabilidade oxidativa do combustível. A água é, geralmente retirada no pré tratamento da matéria prima, podendo aparecer através da reação dos ácidos gordos livres com o hidróxido de sódio, ou na fase de lavagem e purificação do biodiesel.

- **Teor em ésteres metílicos (%)**

Como referido anteriormente, o teor de ésteres metílicos define a pureza do biodiesel. Como referido na norma EN 14214:2003 <sup>[17]</sup>, o valor mínimo de ésteres presentes na amostra de combustível é de 96,5% no caso do biodiesel. Com este controlo torna-se mais fácil a perceção de misturas ilegais.

Impurezas, teores residuais de álcool e glicerina, são compostos que promovem o decréscimo do teor de ésteres metílicos, apesar destes serem geralmente removidos na etapa de purificação do combustível. Desta forma, a eficácia desta etapa torna-se crucial na qualidade do produto final.

- **Número de iodo (g I<sub>2</sub>/ 100 g amostra)**

A propriedade do combustível associada ao número de iodo define-se pela medição do grau de insaturação do biodiesel. Existe a possibilidade do aparecimento de espumas devido à existência de ligações duplas que leva à polimerização dos glicéridos por aquecimento. Esta propriedade necessita de cumprir os valores estipulados na norma EN 14214:2003 <sup>[17]</sup>, como se demonstra na tabela seguinte.

Tabela 8- Comparação das características usuais de um Biodiesel com o Diesel normal [18].

Características	Biodiesel	Diesel
Norma	EN 14214	EN 590
Composição	C12-C22 FAME	C10-C21 HC
Poder calorífico Btu/gal	117,093	131,295
Viscosidade cinemática kg/L (40°F)	1,9-6,0	1,9-4,1
Gravidade específica kg/L (60°F)	0,88	0,85
Densidade, lb/gal 15°C	7,328	7,079
Água, % vol.	0,05	0,02
Oxigénio, % em peso	11	0
Hidrogénio, % em peso	12	13
Ponto de nuvem °C	-3 a 12	-15 a 5
Carbono, % em peso	77	87
Enxofre, % em peso	0,05	0,05
Ponto de solidificação °C	-15 a 16	-35 a -15
Índice de cetano	48 a 60	40 a 55
BOCLE Scuff, gramas	>7000	3600
HFR, microns	314	685

### 1.3.3. Enquadramento Legal do Biodiesel

Em Portugal, no âmbito do Decreto-Lei n.º 62/2006 <sup>[19]</sup> ( que transpõe a Diretiva n.º 2003/30/CE de 8 de Maio), é considerado o Biodiesel um biocombustível. Neste decreto-lei o biodiesel é um éster metílico e/ou etílico, produzido a partir de óleos vegetais ou animais, com qualidade de combustível para motores Diesel, para utilização como biocombustível. Esta mesma diretiva, visa também criar mecanismos para promover a colocação no mercado de quotas mínimas de biocombustíveis, tendo sido estabelecido um valor de incorporação de biocombustíveis de 5,75% até 2010 e de 20% até 2020. Outro aspecto importante desta diretiva, é o facto de ter sido dada a isenção de impostos aos produtores de biocombustíveis.

### 1.4. Matérias-primas

A produção de biodiesel deriva de várias matérias primas. Atualmente, os óleos vegetais, os óleos alimentares usados, as macroalgas e as microalgas são as principais matérias primas utilizadas na produção de biodiesel em todo o mundo.

É feita uma diferenciação em duas gerações dos biocombustíveis em relação à sua fonte, ou seja, em relação à sua matéria prima de proveniência. Os denominados biocombustíveis de 1ª Geração (G1) são os que provêm de bens de consumo que podem ser utilizados como bens alimentares. O caso do biodiesel, considera-se G1 todo o biodiesel produzido através de reações de transesterificação de óleos alimentares como a soja, a colza, e o girassol. Também se denomina de G1 o biodiesel proveniente de bioetanol G1, desde que seja produzido a partir da fermentação dos açúcares do trigo, do milho e da cana de açúcar. Os biocombustíveis de 2ª Geração ( 2G), são os provenientes de matérias primas não alimentares, como por exemplo, a jatropha e outras gorduras animais, biomassa lenhocelulósica de resíduos de culturas ou de madeira para a produção de bioetanol <sup>[20]</sup>. Desta forma, podemos considerar que o biodiesel proveniente de microalgas é denominado de biocombustível G2.

De seguida descreve-se a constituição de cada uma destas matérias primas na obtenção do biodiesel.

### 1.4.1. Óleos Vegetais

O óleo vegetal pode ser extraído a partir de uma grande variedade de sementes, possível de visualizar na figura seguinte. Cada uma destas, apresenta diferentes teores em óleos e distintas complexidades exigida para a extração do mesmo, o que pode contribuir negativamente para a viabilidade do processo. Para que seja possível extrair o óleo presente nas células das sementes oleaginosas, é necessário que haja uma rutura das respetivas células. Tal rutura pode ser promovida por esmagamento das sementes de que é exemplo a prensa pistão-cilindro.



Ilustração 11- Diferentes tipos de sementes oleaginosas e a sua respetiva percentagem aproximada de óleo [21].

- **Processo de extração do óleo vegetal**

#### Limpeza da matéria prima

Inicialmente procede-se a uma limpeza das matérias-primas, por forma a evitar danos no equipamento utilizado no processo de extração. As impurezas a limpar são de variados tipos como cascas, sementes podres, pedaços de metal ou pedras existentes no meio da matéria-prima. Esta etapa é importante no processo de extração do óleo porque quanto maior for o grau de pureza do óleo extraído, maior será o seu valor de mercado.

#### Cozimento

Efetua-se o cozimento da matéria prima de forma a aumentar o rendimento da extração do óleo das mesmas. Esta é uma etapa apenas opcional, dependendo da matéria prima e do objetivo final dado ao óleo extraído.

## Prensagem

Etapa onde se efetua a prensagem da matéria prima por mecanismos apropriados. A introdução da matéria prima na prensa pode ser feita de forma manual ou por alimentadores mecânicos projetados e construídos para o efeito. Este fornecimento convém ser contínuo e uniforme de forma a aumentar o rendimento do processo. No final desta etapa, dá-se a obtenção de materiais como o óleo bruto e a torta.

## Filtração do óleo bruto

Filtração efetuada para separar as partículas de torta do óleo bruto, dando origem a óleo refinado e resíduos provenientes da filtração

### 1.4.2. Óleos alimentares usados

Os óleos alimentares usados provêm de um grande leque de atividades comerciais e industriais na economia mundial. De entre vários, destacam-se os seguintes focos de recolha:

- as atividades domésticas: óleos de fritura usados na confeção de alimentos;
- as atividades industriais: óleos associados à preparação e conservação de alimentos;
- os estabelecimentos do sector HORECA: estabelecimentos da área da restauração abrangendo hotéis, restaurantes, cafés, serviços de catering, cantinas e refeitórios.

Apesar deste material ser conhecido apenas como "óleo", é de realçar que existem vários grupos de óleos distintos. Os principais grupos de óleos existentes são os seguintes:

- grupo do ácido láurico (C12): óleos relativamente saturados com índices de iodo entre 5 e 30 (ex. óleo de coco);
- grupo do ácido palmítico (C16): óleos igualmente saturados (ex. óleo de palma);
- grupo do ácido oleico (C18:1): óleos insaturados com índices de iodo entre 80 e 110 (ex: azeite, amendoim, colza); Relatório de Atividades 2005 Inspeção-geral do Ambiente e do Ordenamento do Território 351
- grupo do ácido linoleico (C18:2): óleos insaturados com índices de iodios superiores a 110 (ex: óleos de girassol, soja e algodão).

A recolha de óleos alimentares usados já está implementada e regulada em Portugal através do Decreto-Lei n.º 266/2009 <sup>[22]</sup>. A recolha e tratamento dos óleos alimentares usados evitam mais um motivo de poluição ambiental, promovendo ainda uma valorização energética deste resíduo. Como curiosidades temos que:

- Cada português gera na sua casa aproximadamente 5,5 litros de óleos alimentares usados <sup>[22]</sup>;
  - Por cada litro entregue às autoridades de recolha certificadas, é possível produzir de 0,7 a 0,8 litros de biodiesel <sup>[22]</sup>;
  - Ao ser utilizada uma tonelada de biodiesel em detrimento da utilização de gásóleo, evita-se a emissão de cerca de 1,8 toneladas de gases de efeito de estufa <sup>[22]</sup>;
  - Um litro de óleo alimentar usado despejado na rede pública, é suficiente para contaminar um milhão de litros de água <sup>[22]</sup>;
  - O despejo de óleos alimentares usados é proibido pela lei portuguesa, mais concretamente pelo Decreto-Lei n.º 266/2009. <sup>[22]</sup>
- **CIRCUITO DOS ÓLEOS ALIMENTARES USADOS**

Resumidamente, o circuito dos óleos alimentares usados inicia-se no produtor, ou seja, por exemplo, num restaurante que, depois de armazenar uma determinada quantidade, recebe a visita de uma entidade certificada para recolher esse óleo usado. Este processo é regulado pelo Decreto-Lei n.º 266/2009. <sup>[22]</sup>



Ilustração 12- Acumulação de óleo utilizado proveniente do ramo da restauração.

As empresas certificadas são um interveniente primordial em todo este circuito, uma vez que são fundamentais no correto encaminhamento deste tipo de resíduos para unidades de valorização licenciadas. Alguns operadores procedem já a um tratamento prévio destes resíduos nas suas instalações, designadamente, processos de filtração, decantação, centrifugação e armazenagem. No que concerne aos valorizadores, estes são na sua maioria industriais associados à indústria química e de



lubrificantes, empresas de saponificação e mais recentemente unidades de produção de biodiesel. De entre as várias aplicações possíveis para estes óleos alimentares usados, pode ser observado na figura seguinte o processo de produção de biodiesel através da matéria prima em questão:

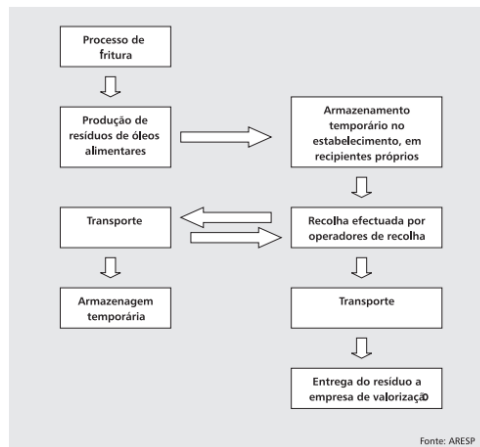


Ilustração 13- Circuito de produção, recolha e valorização de óleos alimentares usados [23].

De uma forma geral, o óleo vegetal (usado ou virgem) reage com um álcool, habitualmente metanol, na presença de um catalisador para produzir glicerina e ou biodiesel. Nesta reacção o metanol encontra-se sempre em excesso para assistir a conversão de forma rápida e o catalisador usual é o hidróxido de sódio ou de potássio que é previamente misturado com o metanol. O subproduto resultante (a glicerina) pode ser utilizada em diversas aplicações na indústria farmacêutica e cosmética.

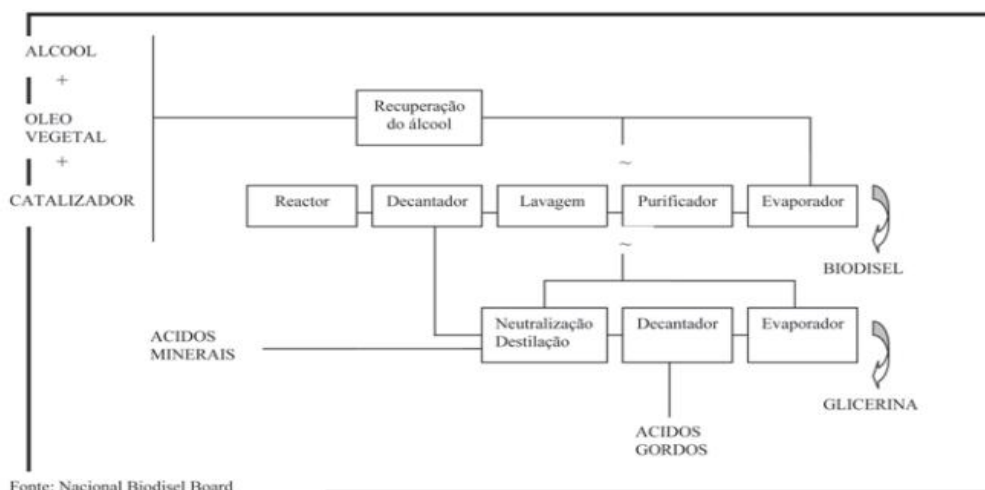


Ilustração 14- Processo de produção pelo processo de transesterificação de biodiesel através de óleos alimentares usados [23].

### 1.4.3. Macroalgas

A utilização deste tipo de algas pelo Homem já remonta a 2700 a.C., mas, só atualmente se apostou no cultivo das mesmas com o objetivo de produzir biomassa devido ao seu alto teor de óleo. A sua finalidade não se foca apenas na criação de biomassa mas também, na indústria farmacêutica, para a alimentação, rações e adubos para a agricultura. Este processo de cultura de algas tem como designação Algacultura, tendo sido iniciado nos países Asiáticos mas, recentemente, alargada a sua produção por todo o mundo <sup>[24]</sup>.

A produção de macroalgas centra-se, essencialmente, nas seguintes espécies:

- Monostroma
- Enteromorpha
- Laminaria
- Porphyra
- Eucheuma
- Kappaphycus
- Glacilaria

De todas as espécies atrás referidas, as mais usadas para a produção de biomassa são a Glacilaria e a Kappaphycus, devido à sua grande capacidade em produzir biomassa, sendo delas extraídas a carragenana e o ágar, utilizadas na indústria alimentar.



Ilustração 15- Espécies de macroalgas: linha superior (da esquerda para a direita): *Caulerpa racemosa*; *Sargassum* sp. e *Caulerpa sertularioides*. Linha do meio: *Acanthophora spicifera*, *Ulva lactuca* e *Colpomenia*. Linha inferior: *Enteromorpha intetisnalis*; *Dichotomar marginata* e *Centroceras clavulatum* [25].

- **Extração do óleo das macroalgas**

#### Limpeza e secagem das macroalgas:

Este processo realiza-se após a recolha das algas, sendo inicialmente lavadas, seguindo-se uma secagem ao sol, ou por equipamentos especializados.

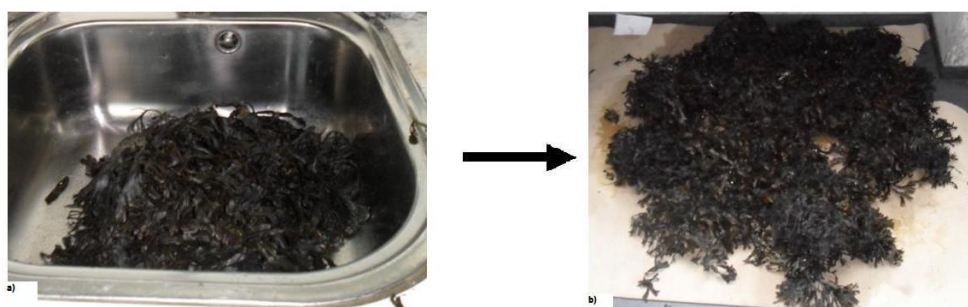


Ilustração 16- Sequência de lavagem e secagem do "sargaço" [26].



Ilustração 17- Sequência de lavagem e secagem de algas pretas [26].

A extração do óleo das macroalgas é efetuado com recurso a solventes, sendo, normalmente, associado a processo mecânicos para se poder fraturar as células algais. O resultado desse processo mecânico é uma espécie de polpa que é misturado com o referido solvente. Anteriormente a esta fase, é previamente efetuada a extração de biomassa. Para facilitar a remoção do óleo das macroalgas é necessário efetuar processos de esmagamento e corte por lâminas às mesmas. Para tal, utilizam-se dois diferentes processos mecânicos:

### Prensa:

Apesar deste mecanismo ser mais utilizado para a extração de óleo de sementes, a prensa pode ser utilizada para extração de óleo das macroalgas, efetuando a compressão por meio de um parafuso sem fim, agindo de forma contínua. Depois de colocadas as macroalgas na prensa, inicia-se o funcionamento deste equipamento verifica-se um esmagamento da matéria prima originando uma mistura homogênea denominada biomassa.



Ilustração 18- Biomassa resultante da prensagem [26].

### Moinho de lâminas

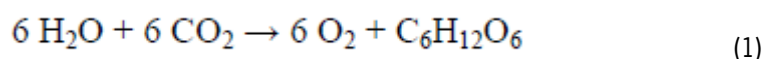
Um método alternativo à utilização da prensa para rompimento das células das macroalgas é o uso do moinho de lâminas. Este equipamento possui as lâminas em forma de hélice e através do seu movimento rotativo promove a moagem das macroalgas em, tamanhos inferiores que as iniciais, ao contrário da prensa que efetua o seu esmagamento.



Ilustração 19- Sargaço e algas pretas após passarem no moinho de lâminas [26].

#### 1.4.4. Microalgas

As microalgas são definidas como organismos microscópicos fotossintetizantes que crescem rapidamente e em diferentes condições ambientais devido à sua estrutura celular simples. Associando o meio líquido onde vivem à sua estrutura celular simples, as microalgas têm trocas mais eficientes de água, dióxido de carbono e outros nutrientes, tornando assim possível observar elevadas taxas de conversão de energia solar em biomassa. O dióxido de carbono é, por razões associadas à poluição e respetivo efeito de estufa, um dos gases mais estudados no mundo, sendo que a cultura de microalgas se perfila como uma aposta promissora, face à sua já referida grande capacidade em absorver o dióxido de carbono transformando-o em glicose, conforme a seguinte equação:



Em algumas das espécies estudadas, existe a produção de amido e hidrogénio, sendo que outras possuem alto teor em lípidos, utilizadas então para fabricar biodiesel. Como é conhecido no processo de fotossíntese, as microalgas absorvem o dióxido de carbono e usam a luz solar para crescer. É conhecido o maior teor em óleo das microalgas em comparação com outras matérias primas produtoras de biodiesel mas, mesmo em comparação com algumas plantas terrestres, as microalgas continuam a ter a capacidade de produzir 100 vezes mais biomassa, fato esse comprovado pela tabela seguinte.

Tabela 9- Comparação entre várias matérias primas usadas no fabrico de biodiesel [27].

Fonte de óleo	Teor de óleo (% de biomassa em base seca)	Produção de óleo (L óleo/ha. ano)	Uso de terra (m <sup>2</sup> /kg biod. ano)	Produtividade de biodiesel (kg biod./há. ano)
Milho ( <i>Zea mays</i> )	44	172	66	152
Cânhamo ( <i>Cannabis sativa</i> )	33	363	31	321
Soja ( <i>Glycine max</i> )	18	636	18	562
Pinhão-manso ( <i>Jatropha curcas</i> )	28	741	15	656
Camelina ( <i>Camelina sativa</i> )	42	915	12	809
Canola ( <i>Brassica napus</i> )	41	974	12	862
Girassol ( <i>Helianthus annuus</i> )	40	1070	11	946
Mamona ( <i>Ricinus communis</i> )	48	1307	9	1156
Óleo de palma ( <i>Elaeis guineensis</i> )	36	5366	2	4747
Microalga (baixo teor de óleo)	30	58.700	0,2	51.927
Microalga (médio teor de óleo)	50	97.800	0,1	86.515
Microalga (alto teor de óleo)	70	136.900	0,1	121.104

É de realçar que, além de as microalgas apresentarem um elevado teor de óleo em relação a outras matérias primas, também necessitam de uma área de cultivo muito menor.

De entre milhares de espécies de algas que estão comprovadas existir e de outras que se estimam a sua existência, estão algumas promissoras no teor de óleo sendo estas as mais favoráveis para o fabrico de biodiesel, como demonstrado na tabela seguinte.

Tabela 10- Teor em óleo de algumas espécies de microalgas [28].

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

O teor de óleo de cada microalga representa a sua reserva energética. Ficou provado por Illman em 2000 [29] que, se as condições de cultura da mesma espécie forem alteradas, o teor em óleo de cada uma varia. A tabela seguinte revela os resultados do referido estudo de Illman.

Tabela 11- Constituintes celulares e poder calorífico de diferentes espécies de *Chlorella* cultivadas em meio completo e meio deficiente em azoto [29].

	<i>Chlorella vulgaris</i>		<i>Chlorella emersonii</i>		<i>Chlorella protothecoides</i>		<i>Chlorella minutissima</i>	
	Controlo	Carência N	Controlo	Carência N	Controlo	Carência N	Controlo	Carência N
Proteínas (%)	29 ± 2,5	7 ± 1,6	32 ± 2,9	28 ± 3,8	38 ± 3	36 ± 3	24 ± 3,1	9 ± 2
Glicídios (%)	51 ± 2	55 ± 3,2	41 ± 2,5	11 ± 2,2	52 ± 2,3	41 ± 3	42 ± 3,5	14 ± 2,1
Lípidos (%)	18 ± 2,1	40 ± 2,1	29 ± 2,5	63 ± 1	11 ± 3,2	23 ± 1,2	31 ± 3,2	57 ± 2,5
Poder calorífico (KJ/g)	18 ± 0,7	23 ± 2,1	21 ± 0,7	29 ± 0,7	19 ± 1,6	24 ± 2,0	21 ± 1,2	21 ± 1,0

A análise dos resultados de vários estudos indica que a temperatura ideal para o mais eficiente crescimento das microalgas está situado no intervalo compreendido entre 20-35 °C. Quanto aos

nutrientes essenciais a esse crescimento acelerado temos o azoto, o fósforo, o ferro, o enxofre e em menor quantidade, o magnésio, o cálcio e a sílica <sup>[30]</sup>.

Um aspeto que poderá inibir o crescimento acelerado das microalgas, é o excesso de concentração de oxigénio. Como é sabido, o oxigénio é o resultado da reação do dióxido de carbono com a água, por isso, desta forma, é necessário que seja rotineiramente retirado algum oxigénio dos locais de cultivo de microalgas, tornando a taxa de oxigénio nunca superior a 400% o valor de saturação na presença de ar.

Após se analisarem todas estas características das microalgas, são referidas a seguir as vantagens do uso desta matéria prima para obtenção de biodiesel:

- Capacidade de multiplicação ao longo do ano inteiro, tornando a sua produção elevada;
- Apesar de crescer em meio aquoso, não necessitam de tanta quantidade de água quanto as culturas terrestres;
- O crescimento das microalgas é verdadeiramente acelerado, quando reunidas as condições ideais, podendo dobrar a sua massa em menos de 3,5 horas, apresentando de 20% a 60% de óleo por peso seco de biomassa, dependendo da espécie;
- Grande capacidade de fixação de dióxido de carbono ( para 1 kg de biomassa seca é consumido cerca de 1,83 kg de dióxido de carbono);
- Possibilidade de cultivar microalgas em simultâneo com o tratamento de efluentes líquidos, visto que estes efluentes possuem os nutrientes necessários ao crescimento de microalgas ( nitrogénio, fósforo, ...);
- Além de produção de óleo, também são produzidas proteínas e biomassa.

Assim, as algas que devem ser escolhidas para um cultivo eficaz devem apresentar um bom desempenho no crescimento, com alta taxa de crescimento, fornecendo grande quantidade de material seco e com boa qualidade.





## 2. Capítulo I I - Produção de biodiesel através de microalgas

Neste capítulo, procede-se à descrição das etapas inseridas no processo de produção de biodiesel a partir das microalgas. Este processo inicia-se na cultura de microalgas, na colheita da biomassa originada e seu processamento, no rompimento celular de forma a extrair o óleo da biomassa e, por fim, na produção de biodiesel através do óleo extraído.

### 2.1 Métodos de cultura

Existem vários fatores importantes na escolha do método de cultura no cultivo de microalgas. Estes fatores revelam-se bastante decisivos na viabilidade do projeto e na sua perfeita execução, por isso, visto que todos os métodos possuem vantagens e desvantagens, o ideal será encontrar para todos os métodos um ponto ótimo de equilíbrio entre o custo do projeto e seu funcionamento com a capacidade de produção.

Neste momento, são utilizados à escala mundial dois tipos diferentes de métodos de culturas de microalgas. Estes métodos denominam-se por: culturas "abertas", praticadas em tanques ou lagoas e, culturas "fechadas", praticadas em fotobiorreatores. Estes dois métodos estão explicitos nas figuras seguintes, sendo que este estudo se centrará, essencialmente, nas ditas culturas "fechadas", ou seja, em fotobiorreatores.

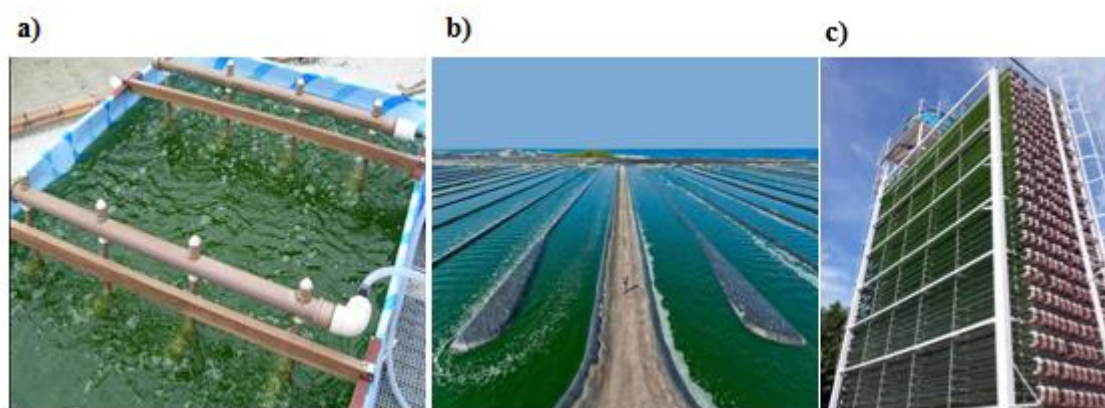


Ilustração 20, 21 e 22- a) Tanque utilizado para cultivo de microalgas em sistemas "abertos" no Instituto Nacional de Tecnologia em Brasília, Brasil <sup>[20]</sup>; b) Sistema aberto localizado na empresa Cyanotech <sup>[21]</sup>; c) Fotobiorreator utilizado no NPDEAS (Núcleo de pesquisa e desenvolvimento de energia autossustentável) <sup>[22]</sup>.

No caso dos fotobiorreatores, são executadas culturas de microalgas, utilizando fontes de iluminação naturais ou artificiais, impedindo a cultura de estar em contato direto com o meio ambiente, podendo assim controlar o seu meio com maior precisão, ao invés dos sistemas "abertos" (open ponds)

que expõe as culturas ao contato direto com o meio ambiente. Devido ao fato anteriormente referido, as áreas necessárias para as culturas "abertas" e "fechadas" são substancialmente diferentes. Nos fotobiorreatores as áreas são mais pequenas visto ser possível controlar o meio e acelerar o crescimento da biomassa. Já nos sistemas "abertos" é necessária uma grande área para o cultivo de microalgas, pois só desta forma são asseguradas as condições necessárias ao seu crescimento.

Em seguida, expõe-se a explicação mais pormenorizada dos dois métodos de cultivo atrás referidos e a sua comparação.

### **Sistemas "abertos" (open pounds)**

Consistem em tanques ou lagoas abertas ao meio ambiente, utilizando a luz solar como fonte de energia natural, sendo a cultura agitada por um sistema mecânico <sup>[34]</sup>. As características associadas a este tipo de culturas são as seguintes:

- Requerem grandes áreas de cultivo;
- Controlo impreciso do meio de cultura;
- Crescimento lento de biomassa;
- Fácil remoção dos níveis excessivos de oxigénio visto estar em contacto direto com o meio ambiente;
- Não necessita de constantes limpezas e esterilizações;
- Necessidade de escolha de espécies de cultura com altas taxas de crescimento em meios com alto teor de salinidade e níveis de pH (ex: Spirulina e Dunaliella sp.) <sup>[35]</sup>.

Um método de produção de estilo "aberto" muito utilizado, principalmente nos estados Unidos e em Israel, são os raceways. Estes equipamentos consistem em pistas de vastas áreas e com recirculação por chicanas (Chisti, 2007).

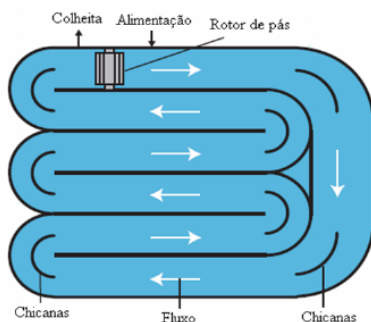


Ilustração 23 e 24- a) Esquema de uma pista Raceway; b) Fotografia de uma piscina Raceway para produção da espécie Spirulina, situada na empresa Earthrise Nutritionals, em Califórnia, Estados Unidos <sup>[36]</sup>.

Como se pode verificar nas duas ilustrações anteriores, as pistas Raceway consistem em canais fechados com cerca de 30 cm de profundidade, sendo que a circulação é promovida pelo movimento de um rotor de pás sendo as chicanas responsáveis pelo guiamento do trajeto da água com microalgas. Geralmente o revestimento interior dos canais é de plástico branco ou transparente. A alimentação da cultura é contínua e é executada logo a seguir ao rotor de pás na zona de início do fluxo sendo a colheita feita antes do referido rotor. A circulação tem que ser executada de forma contínua evitando deposição da biomassa no fundo do canal. Visto que se trata de um sistema "aberto", o sistema Raceway sofre grandes alterações de temperatura devido às estações no ano e às temperaturas da noite e do dia, sendo a evaporação da água um problema considerável. Nestes sistemas, verifica-se um dos maiores problemas que afeta a produção de biomassa, ou seja, a débil agitação promove a baixa concentração de biomassa tornando a exposição solar das microalgas deficiente.

#### **Sistemas fechados (fotobiorreatores):**

Este tipo de sistemas de cultivo consiste num fotobiorreator onde se controlam todas as variáveis (temperatura do meio de cultivo e sua composição química, iluminação, nível de pH, injeção de dióxido de carbono e remoção de oxigénio) necessárias ao pleno e eficaz crescimento de microalgas. Os fotobiorreatores de sacos consistem em sacos plásticos transparentes suportados por uma estrutura metálica e os tubulares consistem em tubos, ou em plástico, acrílico ou vidro, que podem ser posicionados na horizontal, na vertical ou inclinados, tornando assim o aproveitamento da luz solar máximo.

Estes equipamentos fornecem um modelo de cultura com algumas vantagens em relação ao sistema de cultivo "aberto". As vantagens referidas são as seguintes:

- Controlo preciso das condições de cultura;
- Risco de contaminação das microalgas por microrganismos nocivos reduzido;
- Capacidade de serem cultivadas diferentes espécies de microalgas devido a ser possível alterar as condições de cultura, ou seja, o seu meio;
- Como é um sistema fechado, denota-se uma baixa evaporação de água e do dióxido de carbono introduzido;
- Taxa de crescimento de microalgas bastante mais elevada que os sistemas "abertos", por unidade de área de cultivo;

- Possibilidade de cultivo ao longo de todo ano pois, existe a possibilidade de dotar o equipamento de mecanismos de aquecimento e arrefecimento como também de iluminação artificial.

Apesar de revelar grandes vantagens, este método porém, revela custos de instalação e de operação bastante mais elevados, quando comparados com os sistemas abertos.

Da mesma forma que nas pistas raceways, nos sistemas fechados existem rotores de pás que promovem o agitação da cultura. No caso dos fotobiorreatores também existem formas de promover essa mesma agitação sendo as mais utilizadas os mecanismos mecânicos, através do uso de bombas <sup>[37]</sup>, de pás rotativas <sup>[38]</sup> ou através de injeção de dióxido de carbono e ar <sup>[39]</sup>.

Existem fatores que contribuem para a escolha da geometria e configuração do fotobiorreator:

- A iluminação;
- A relação entre a área iluminada e o volume da cultura, visto ser a luz extremamente importante para a eficiência fotossintética;
- A área instalada;
- A troca de gases com o meio de cultura, sendo indispensável a injeção de dióxido de carbono e a remoção do oxigênio produzido pela fotossíntese.

Após serem expostos os prós e os contras dos dois sistemas de cultivo estudados, apresenta-se a comparação dos dois sistemas em relação às suas taxas de produtividade de biomassa bem como as suas vantagens e desvantagens.

Tabela 12- Comparação de produtividade entre fotobiorreatores e pistas raceway [28].

Variáveis	Fotobiorreator	Lagoa raceway
Produção de biomassa anual (kg)	100,000	100,000
Produção volumétrica diária (kg m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )	1.535	0.117
Produtividade por área cultivada (kg m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	0.072	0.035
Concentração de biomassa alcançada (kg m <sup>-3</sup> )	4	0.14
Taxa de diluição (d <sup>-1</sup> )	0.384	0.25
Área necessária (m <sup>2</sup> )	5681	7828
Rendimento em óleo (m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )	58.7	42.6
Consumo anual de CO <sub>2</sub> (kg)	183,333	183,333
Geometria do sistema	132 tubos paralelos/unidade, comprimento: 80 m; Diâmetro de tubo: 0.06 m.	978 m <sup>2</sup> /lagoa; Largura: 12 m, comprimento: 82 m, profundidade: 0.30 m.
Número de unidades	6	8

Tabela 13- Comparação entre fotobiorreatores e sistemas "abertos" [28].

Item de comparação	Fotobiorreatores (FBR)	Sistemas abertos (SAB)
Controle de contaminação	Fácil	Difícil
Risco de contaminação	Reduzido	Alto
Esterilidade	Alcançável	Nenhum
Controle do processo	Fácil	Difícil
Controle de espécies	Fácil	Difícil
Agitação	Uniforme	Baixa
Regime de operação	Batelada ou semi-contínuo	Batelada ou semi-contínuo
Razão Área/Volume	Alto (20-200 m <sup>-1</sup> )	Baixo (5-10 m <sup>-1</sup> )
Concentração celular	Alto	Baixo
Investimento	Alto	Baixo
Custo de operação	Alto	Baixo
Eficiência de utilização luminosa	Alta	Baixa
Controle de temperatura	Alcançável	Difícil
Produtividade	3-5 vezes mais produtivo	Baixo
Tensão hidrodinâmica sobre as células	Baixa-alta	Muito baixa
Evaporação do meio de cultura	Baixa	Alta
Controle de transferência gasosa	Alto	Baixo
Perda de CO <sub>2</sub>	Depende do pH, alcalinidade, etc.	Depende do pH, alcalinidade, etc.
Inibição por O <sub>2</sub>	Grande problema em FBR	FBR > SAB
Aumento de escala	Difícil	Difícil

## 2.2. Métodos de colheita das microalgas

A espécie de microalgas envolvida no processo de produção de biodiesel é muito importante na escolha do método de colheita. Sendo esta uma etapa que representa quase metade do custo da operação, é essencial uma correta escolha do método tornando-o cada vez mais eficiente. Características como a densidade, a dimensão da microalga e o valor do produto desejado, são importantes para definir a opção entre métodos de separação como a centrifugação, a flotação, a filtração e a floculação. Outros aspetos importantes são a rapidez do processo e a energia dispendida no mesmo.

Os métodos utilizados na colheita de microalgas envolvem duas etapas: a pré-separação e a separação fina. A pré-separação é realizada num meio vindo diretamente dos fotobiorreatores, podendo ser feita por floculação, sedimentação por gravidade ou flotação, onde se concentra o meio para 5% a 10% de biomassa. A separação fina é o processo seguinte à pré-separação, que consiste em utilizar técnicas como a centrifugação e a filtração e concentrar o meio provindo do primeiro método de pré-separação.

### 2.2.1. Centrifugação

Este método é extremamente eficiente para separar a biomassa da água. A centrifugação permite atingir uma elevada taxa de separação, cerca de 90%, sendo o resultado deste método, uma biomassa com baixo teor de humidade. Nem tudo são vantagens neste processo. O alto consumo de energia e a necessidade de uma manutenção contínua revelam-se as maiores desvantagens da centrifugação.



Ilustração 25- Processo de centrifugação em microalgas da espécie *Chlorella vulgaris* [40].

### 2.2.2 Flotação

Operação que consiste na injeção de ar na água, promovendo o arraste das células por microbolhas formando uma espuma com alta concentração de biomassa à superfície que é posteriormente removida. Apesar de não necessitar de adição de elementos químicos, ao contrário de outros métodos, possui a desvantagem de ser um processo caro devido ao custo elevado dos sistemas de injeção de ar .



Ilustração 26- Processo de flotação em microalgas [40].

### 2.2.3. Floculação

Este método é muitas vezes usado na primeira etapa de separação ( pré-separação), seguido de um tratamento para reduzir a humidade do produto. Consiste na adição de floculantes químicos, por exemplo o cloreto férrico, sulfato férrico e sulfato de alumínio, que interagem com as microalgas, visto terem cargas opostas, ou seja, os floculantes apresentam cargas positivas e as microalgas apresentam cargas negativas. Esta interação promove a agregação das microalgas formando flocos, que ao ganharem mais massa decantam facilmente. Os produtos químicos adicionados ao estarem presentes nas condições ideais, como o valor de pH, a salinidade e a temperatura, reagem com a água formando hidróxidos insolúveis que arrastam partículas que estão em suspensão, promovendo uma eficaz eficiência na separação.

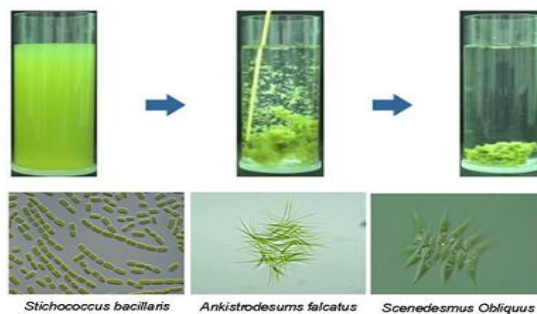


Ilustração 27- Evolução do processo de floculação em microalgas [41].

## 2.2.4. Filtração

No caso de microalgas de maior dimensão (>70  $\mu\text{m}$ ), utiliza-se o método de colheita denominado de filtração. Se as microalgas apresentarem uma dimensão inferior à anteriormente referida, é necessária a utilização de membrana com poros pequenos que, através de alta pressão, filtram a água com microalgas que por eles passa. Este facto condiciona a aplicação deste método à dimensão das algas.



Ilustração 28- Processo de filtração do meio de cultura com microalgas [42].

## 2.3 Processamento

No presente trabalho, a finalidade será produzir biodiesel, ou seja, neste caso seria necessária a colheita e posterior extração do óleo da biomassa, podendo assim, produzir o combustível referido. Apesar de este ser o alvo deste estudo, existem outros métodos de produção de diferentes combustíveis através da biomassa colhida pelos métodos de colheita anteriormente explicados.



Ilustração 29- Diferentes formas de obtenção de energia através de biomassa [43].



## 2.4. Extração do óleo da biomassa

A extração de óleo da biomassa algal é um dos processos mais caros que podem determinar a sustentabilidade da produção de biodiesel.

Basicamente, este processo consiste em extrair o óleo das microalgas que foram anteriormente colhidas do meio de cultivo, sendo que é através do rompimento das células que se faz a extração do óleo que se encontra no seu interior. Esta separação pode ser executada por dois grupos de métodos diferentes:

- Métodos mecânicos: autoclave, moinho, cavitação ultra-som e prensagem;
- Métodos químicos: método de solvente hexano, soxhlet e extração supercrítica;

Como desvantagens, por exemplo, o uso do método mecânico de prensagem exige que a biomassa esteja seca o que aumenta o custo em energia, aumento este também associado ao uso do método de extração químico supercrítico.

Fatores como o custo da operação e o consumo de energia envolvida são importantes, tendo estes que ser o mais eficientes possível, tornando assim a extração mais perfeita e influenciando positivamente o rendimento global do biodiesel.

## 2.5. Produção do Biodiesel a partir de microalgas

O biodiesel é um biocombustível equivalente ao Diesel sendo obtido a partir de materiais biológicos renováveis, tais como óleos vegetais ou gorduras animais, sendo utilizados na sua forma pura ou sendo misturado ao Diesel em diferentes concentrações.

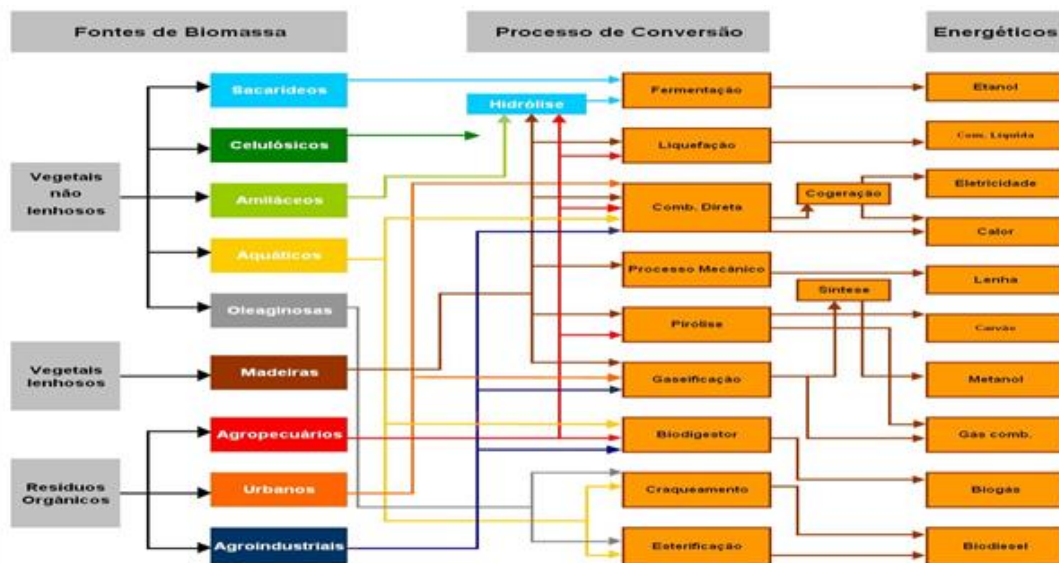


Ilustração 30- Processos de conversão de energia a partir de microalgas [12]

Após a extração do óleo derivado de uma das muitas possíveis matérias primas, poderíamos pensar usar este óleo diretamente nos motores como combustível mas tal não é possível devido à sua baixa volatilidade e elevada viscosidade. Para ser possível a sua utilização nos motores de combustão, podemos utilizar três formas de produção de biodiesel como a pirólise, a microemulsão e a transesterificação sendo esta última a mais usual.

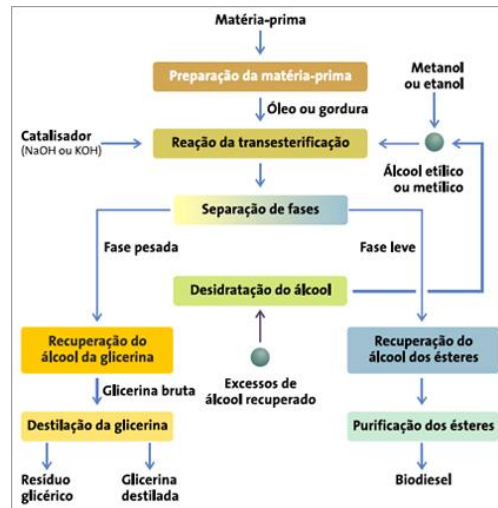


Ilustração 31- Produção de biodiesel por transesterificação [44].

Descrição dos vários processos de produção de biodiesel:

- **Pirólise** – também chamada de decomposição térmica, envolve o aquecimento de uma substância entre as temperaturas dos 450 e os 850°C sem presença de oxigênio. Através deste processo conseguimos quebrar as moléculas dando origem a moléculas mais pequenas. São então formados líquidos (óleos oxigenados), gases (metano, dióxido e monóxido de carbono) e misturas de cinzas. O único e grande problema deste processo é o elevado custo de todo o equipamento.
- **Microemulsão** – neste processo são usados, para diminuir a viscosidade do óleo, álcoois de cadeia curta e imiscíveis como metanol e etanol tendo este processo a longo prazo o problema da decomposição do carbono no motor, e por consequência a combustão incompleta e o aumento da viscosidade do óleo.
- **Transesterificação** – Constitui o processo mais utilizado na produção do biodiesel e pode ser dividido em três reações consecutivas. É um processo onde são convertidos triglicerídeos (compostos com três ácidos gordos e um glicerol) que vão reagir com um álcool e com um

auxílio de um catalisador (ácido, básico ou enzimático) vai produzir ésteres de ácidos gordos e glicerina.

Inicialmente os triglicéridos são convertidos em diglicérideos sendo depois transformados em monoglicéridos e por fim convertidos em três moléculas de ésteres e uma molécula de glicerina, como se verifica na figura seguinte.

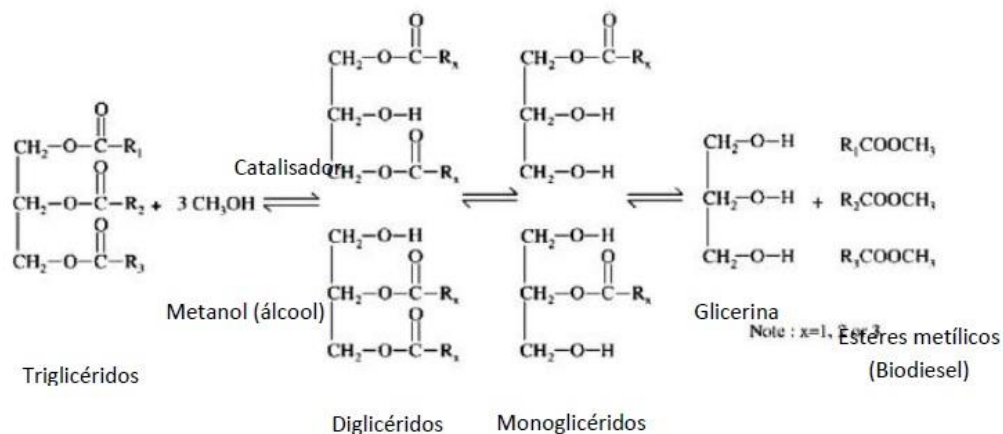


Ilustração 32- Reações de transesterificação nos triglicéridos [45].

Posteriormente, os triglicéridos vão reagir com o álcool, que pode ser o etanol, o propanol, o butanol ou o metanol. Os mais utilizados são o metanol e o etanol sendo que este último é menos tóxico para a saúde humana e pode ser obtido a partir de recursos naturais, o que torna o biodiesel 100% natural. Mas curiosamente o mais aplicado é o metanol, pois é o mais barato, existe em grandes quantidade e facilita a separação dos ésteres da glicerina.

Este processo é influenciado pela temperatura de reação, pela razão álcool/óleo, pela quantidade de catalisador, pela velocidade de agitação, pelo tipo de óleo da matéria-prima utilizada e pelo catalisador usado no processo.

Em relação ao catalisador, este pode ser ácido, básico. A tabela seguinte apresenta o resumo das características dos catalisadores ácidos e básicos.

Tabela 14- Resumo das características dos catalisadores básicos e ácidos

Variáveis	Catalisadores básicos	Catalisadores ácidos
Temperatura de reação	60-70	55-80
Tempo de reação (min)	60-360	4-140
Remoção de:	Metanol, catalisador	Metanol, catalisador
Ácidos gordos livres presentes na matéria prima	Produtos saponificáveis	Ésteres
Água na matéria prima	Interferência na reação	Interferência na reação
Rendimento em ésteres metílicos	Razoável	Razoável
Recuperação da glicerina	Difícil	Difícil
Purificação	Glicerol, sabões	Glicerol
Purificação dos ésteres metílicos	Lavagem repetida	Lavagem repetida
Custo de produção do catalisador	Baixo	Baixo

O biodiesel geralmente é produzido por catalisadores básicos como o hidróxido de potássio, hidróxido de sódio, carbonatos ou óxidos. Estes catalisadores são os mais eficientes, mais rápidos e menos corrosivos do que os catalisadores ácidos, mas têm o problema de necessitarem de grandes quantidades de água para a remoção do catalisador, razão pela qual se existir conduzirá à formação de sabões. Para que isso não aconteça, o teor em ácidos gordos na matéria-prima não deve ultrapassar os 3%. Caso aconteça, é necessário então utilizar um catalisador ácido. Estes ácidos determinam a acidez da matéria prima e por consequência o tipo de reação a utilizar

### 3. Capítulo III - Fotobiorreatores

Os fotobiorreatores pertencem ao agrupamento de sistemas "fechados" de cultura de microalgas já anteriormente explicado e comparado com os sistemas "abertos". Visto apresentarem algumas vantagens em relação aos outros métodos, o sistema escolhido foi o projeto de um fotobiorreator. Para a execução do seu projeto, é necessário analisar os vários tipos de fotobiorreatores existentes, distinguindo-os e comparando-os, sendo assim possível uma tomada de decisão mais eficiente.

#### 3.1 Tipos de fotobiorreatores existentes

Os fotobiorreatores fornecem a possibilidade de cultivar mais que uma espécie de algas, visto ser possível alterar as condições de funcionamento tornando o meio ambiente o mais ideal possível para o melhor crescimento das microalgas. Dentro deste agrupamento de equipamentos, existem já em funcionamento diferentes tipologias:

- Fotobiorreatores tubulares;
- Fotobiorreatores de placas planas;
- Fotobiorreatores de coluna airlift;
- Fotobiorreatores de tanque agitado;

As várias configurações acima enumeradas oferecem modos de funcionamento diferentes tendo vantagens e desvantagens, permitindo obter diferentes taxas de eficiência e apresentando distintos graus de complexidade.

### 3.1.1. Fotobiorreatores tubulares

Os fotobiorreatores tubulares (figura 33) são os mais utilizados de entre os mencionados. A orientação dos tubos pode ser variável sendo que já existem biorreatores de tubo verticais, horizontais, em alfa ou helicoidais. São constituídos por tubos transparentes sendo o seu limite de diâmetro situado nos 10 cm, sendo estes fabricados em materiais rígidos ou maleáveis, por exemplo, acrílico ou grandes sacos de polietileno de baixa densidade que, apesar da sua maior fragilidade, apresentam um baixo custo.

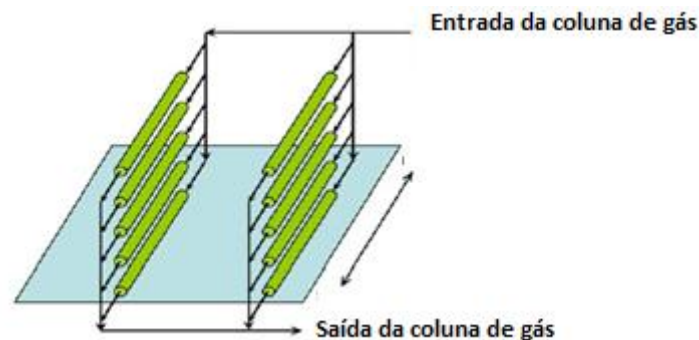


Ilustração 33- Esquema de um biorreator do tipo tubular [28].

Neste tipo de equipamentos, a maior desvantagem encontrada é o facto de a eficiência luminosa não ser a melhor, visto que, a própria curvatura dos tubos reflete a incidência solar, absorvendo menos quantidade de luz. A melhor forma de contornar esta desvantagem é utilizar os fotobiorreatores tubulares com orientação horizontal que, apesar de aumentar a capacidade de absorção da incidência solar, aumentam também a área necessária para a sua instalação. Como desvantagem, esta orientação dos tubos origina dificuldades na remoção do oxigénio e na introdução do dióxido de carbono, sendo este problema ultrapassado pelo aumento do número de tubos existentes em detrimento do aumento do comprimento dos mesmos.

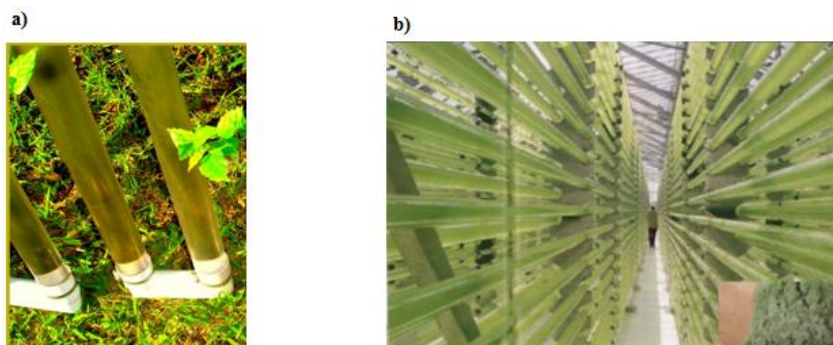


Ilustração 34 e 35- a) Fotobiorreator com orientação vertical [42]; b) Fotobiorreator tubular de orientação horizontal [46].

A circulação da cultura é realizada por meio de bombas forçando o meio a circular pelo tubo. Este facto, limita as espécies a cultivar, já que a pressão existente na bombagem do meio poderá originar tensões de corte algo elevadas.

Nos fotobiorreatores tubulares de orientação vertical, a circulação é geralmente criada por injeção de ar pela parte inferior do tubo, podendo ser neste caso injetado o dióxido de carbono necessário para a cultura. Este método de circulação do meio apresenta bons resultados tornando-o quase homogêneo. Apresenta uma menor eficiência da incidência de luz solar, sendo esta em certos casos resolvida pela aplicação de iluminação artificial exterior ou interior.



Ilustração 36- Fotobiorreator tubular vertical com iluminação artificial exterior [46].

Os fotobiorreatores tubulares em alfa, apresentam uma geometria igual ao seu nome, tendo tubos verticais paralelos onde as suas extremidades opostas se unem por tubos oblíquos com inclinação de 45°. Desta forma, conjuga vantagens das orientações vertical e horizontal. Apesar de ter uma geometria complexa, consegue bons resultados a nível de eficiência luminosa e das trocas gasosas. Esta geometria dificulta no entanto a industrialização do processo devido à complexidade que lhe está associada.

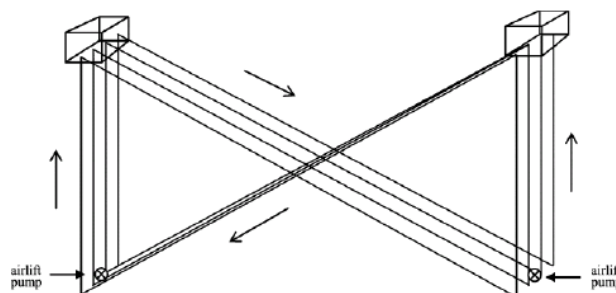


Ilustração 37- Esquema de um fotobiorreator tubular em alfa [35].

### 3.1.2. Fotobiorreatores "airlifts"

Este é o tipo de fotobiorreator que melhor confere homogeneidade ao meio e distribuição luminosa pelo mesmo. São constituídos por duas zonas diferentes, onde por uma dessas zonas existe um caudal gasoso. A diferença de densidades entre o gás e o líquido promove a circulação do meio pelo fotobiorreator, sendo que a zona de movimento ascendente se denomina "riser" e a de movimento descendente "downcomer". O gás injetado é geralmente dióxido de carbono, sendo inserido pela parte inferior do depósito através do referido canal de caudal gasoso. Este caudal inverte o seu sentido ao chegar ao topo do reator, começando o seu caminho descendente pelas partes laterais do depósito entre a parte central e as paredes laterais. A mistura ao chegar ao fundo do depósito, reinicia o ciclo novamente pela parte central descendo novamente pelas paredes.

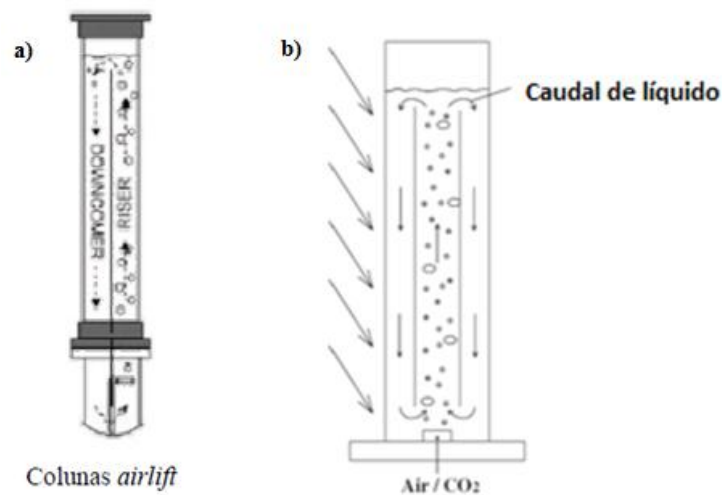


Ilustração 38 e 39 - a) Esquema de funcionamento de um fotobiorreator do tipo airlift com dois canais [47]; b) esquema de funcionamento de um fotobiorreator do tipo airlift com três canais .

Este tipo de dispositivo é simples, com custo reduzido, compacto e de simples funcionalidade. Através da agitação pneumática existente, atinge elevadas velocidades de circulação do meio pelo reator aumentando assim a eficiência no crescimento das microalgas. Neste tipo de reator consegue-se evitar a deposição das microalgas no seu fundo devido à agitação pneumática que é assegurada.



### 3.1.3. Fotobiorreatores de placas planas verticais ou horizontais

Os fotobiorreatores de placas planas são ainda pouco utilizados pois os estudos da sua eficiência ainda não são muito conclusivos. Consistem em placas finas, orientadas consoante a direção da iluminação solar. Como a cultura se encontra no interior de duas placas, esta fica sujeita a uma grande superfície de iluminação mas, por outro lado, verifica-se grande acumulação de microalgas junto às paredes diminuindo assim a incidência solar. Como desvantagem principal, temos o difícil controlo da temperatura do meio, ocorrendo evaporação do mesmo.



Ilustração 40- Conjunto de fotobiorreatores de placas planas [48].

### 3.1.4. Fotobiorreatores de tanque agitado

A geometria e método de funcionamento deste fotobiorreator, tornam-no num dos menos utilizados na produção de microalgas. A sua área superficial luminosa é reduzida e os gastos de energia de operacionalidade para tornar a mistura uniforme, com condições de cultura homogéneas em todo o reator, são elevados.

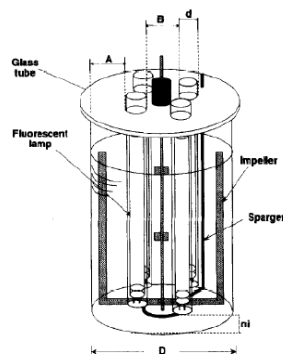


Ilustração 41- Esquema de um fotobiorreator do tipo tanque agitado [49].

### 3.2 Vantagens e desvantagens dos fotobiorreatores analisados

Depois de analisados os tipos de fotobiorreatores existentes atualmente, é necessária a reflexão sobre todas as vantagens e desvantagens da sua utilização na produção de microalgas.

A decisão mais acertada na escolha do tipo de fotobiorreator engloba a análise de vários critérios sendo que, a escolha ideal se demonstra impossível. Calculando a eficiência luminosa, determinando a capacidade de controlo do meio de cultura, a área de cultura, a possibilidade de expansão e a sua respetiva produtividade, consegue-se chegar à conclusão sobre o mais adequado e eficiente método de cultura de microalgas. Associando os fatores anteriormente referidos à necessidade de projetar um sistema simples e pouco dispendioso, efetua-se a melhor escolha.

Na tabela seguinte, encontram-se as classificações qualitativas entre "fraco", "médio" e "bom", para diversos fatores ou parâmetros experimentais associados a diferentes tipologias de fotobiorreatores.

Tabela 15- Classificação de vários tipos de fotobiorreatores sobre diversos fatores [35].

Tipo de reator	Eficiência da iluminação	Grau de controlo	Área requerida	Scale-up	Produtividade (g L <sup>-1</sup> d <sup>-1</sup> ); espécies
Tubular vertical	Média	Médio	Médio	Possível	0,5; <i>Porphyridium cruentum</i>
Tubular horizontal	Boa	Médio	Fraco	Possível	0,25; <i>Spirulina platensis</i>
Helicoidal	Média	Bom	Excelente	Fácil	0,7; <i>Nannochloropsis sp.</i>
Tubular em α	Excelente	Bom	Fraco	Muito difícil	0,4; <i>Spirulina platensis</i>
Painel plano	Excelente	Médio	Bom	Possível	0,85; <i>Nannochloropsis sp.</i> 2,15; <i>Spirulina platensis</i>
Tipo fermentador	Fraca	Excelente	Excelente	Difícil	0,03-0,05; várias

## 4. Capítulo IV - Projeto e construção do fotobiorreator

Após o estudo e pesquisa realizada sobre os métodos já atualmente utilizados e investigados na cultura de microalgas, as suas vantagens e desvantagens, é possível escolher dois caminhos distintos na seleção e projeto do fotobiorreator:

- O caminho de escolha do sistema mais perfeito e eficiente que engloba grande complexidade de construção e enormes custos associados;
- O caminho da escolha de um sistema que satisfaça algumas das necessidades requeridas para a cultura de microalgas que, através de uma construção simples e pouco dispendiosa, consiga atingir os objetivos definidos.

O orçamento disponível para a realização deste trabalho conduziu à opção pelo desenvolvimento de uma solução satisfatória relativamente ao crescimento acelerado de microalgas para concretização dos objetivos propostos. O sistema escolhido e desenvolvido funcionará como um protótipo que, após o aperfeiçoamento e validação com diferentes culturas, permitirá partir para um sistema ainda mais ideal.

Efetivamente o objetivo do presente trabalho, assentou na construção de um fotobiorreator funcional, de custos de construção e operação baixos, sendo capaz de efetuar culturas de variadas espécies de microalgas, tornando o seu crescimento acelerado, podendo assim no final ser extraída a biomassa necessária para produzir biodiesel.

### 4.1. Condições requeridas para o funcionamento do fotobiorreator

O ponto de partida deste projeto foi dado na perceção dos requisitos necessários à cultura de microalgas e associado a isso à necessidade do aumento do seu crescimento. Assim, desta forma, são conjugadas as necessidades biológicas das microalgas para o seu crescimento com a escolha de aspetos de construção e projeto com custos baixos para a sua satisfação. Assim, a identificação das condições necessárias para o crescimento das microalgas, determinaram-se os seguintes requisitos para o sistema projetado:

- As microalgas necessitam de iluminação para a realização da fotossíntese, ou seja, o sistema projetado necessita de iluminação natural e, nas horas noturnas, de iluminação artificial;

- Como o fotobiorreator será colocado nas instalações do CVR (centro para a valorização de resíduos), foi necessário projetar um sistema compacto e com uma elevada razão de volume de cultura / área instalada;
- Dependendo da espécie de microalgas cultivada, as temperaturas ideais ao seu crescimento são variáveis, logo, um dos requisitos mais importantes é o controlo de temperatura do meio;
- A eficiência fotossintética é um dos mais importantes fatores para a produção eficiente de biomassa, ou seja, a área iluminada do meio de cultura deve ser maximizado de forma a garantir todas as condições às microalgas para a realização da fotossíntese;
- Outro aspeto importante no projeto de fotobiorreator é a homogeneização do meio de cultura, fazendo com que a totalidade das microalgas presentes no reator entrem em contato com a iluminação presente e ao meio nutritivo de forma igual, então, torna-se imprescindível a aplicação de sistema de agitação mecânica do meio;
- Como existe iluminação natural e artificial, o fotobiorreator tem todas as capacidades para um funcionamento contínuo, podendo assim laborar 24 horas diárias;
- O fotobiorreator necessita de um sistema de injeção de dióxido de carbono, elemento este essencial à realização da fotossíntese;
- A presença de oxigénio no interior do fotobiorreator torna-se inevitável visto este ser o produto final da fotossíntese mas, a sua presença de forma exagerada provoca o decréscimo da eficiência de crescimento das microalgas. Desta forma, é importante a inserção de um sistema de remoção de oxigénio.

Como referido anteriormente, foi necessária a conjugação das necessidades das microalgas com as limitações impostas pelo orçamento, e a necessidade do projeto de um fotobiorreator capaz de se adequar a várias condições ideais. Contando com as limitações impostas, tornou-se importante controlar o baixo custo associado à construção e ao funcionamento do reator, a simplicidade do sistema e a facilidade de limpeza do mesmo.

Depois de analisadas as vantagens e as desvantagens dos variados tipos de fotobiorreatores existentes, a escolha deste projeto recaiu sobre o sistema tubular vertical que, devido ao alto custo da produção de um reservatório circular em acrílico, se alterou para um depósito paralelepípedo com algumas inovações.

## 4.2. Protótipo do fotobiorreator projetado

Para uma melhor ilustração da solução encontrada, foi elaborado um desenho em SolidWorks. A ilustração seguinte demonstra fielmente a composição e geometria do mecanismo projetado.

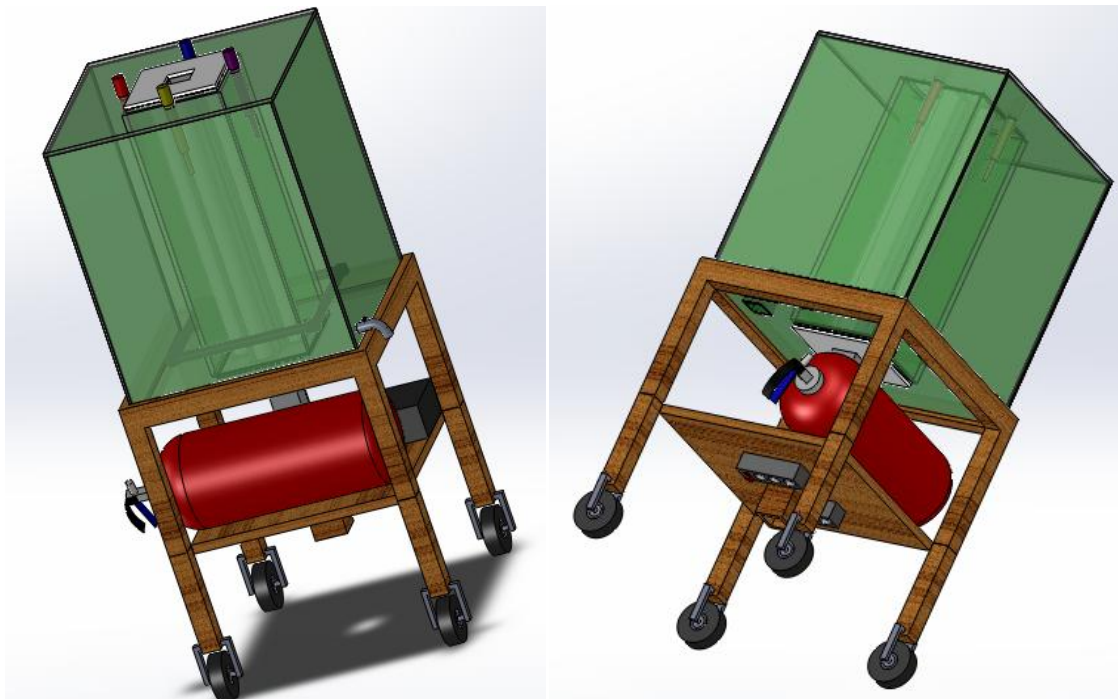


Ilustração 42 e 43- Desenho em Solidworks do fotobiorreator projetado.

Neste subcapítulo será demonstrada a solução encontrada para o projeto em questão, sendo descrito cada elemento do mecanismo ao pormenor, analisando as suas geometrias, funcionalidades e materiais. Certos equipamentos como, bombas de água, resistência para aquecimento da água e sistema de injeção de dióxido de carbono terão em anexo as especificações técnicas do fornecedor.

### 4.3. Descrição dos elementos do fotobiorreator:

Após executado o projeto de todos os componentes inseridos na construção do fotobiorreator, estes são descritos e demonstrados na sua plenitude de forma a se entender as suas funcionalidades, os materiais que os constituem e os seus objetivos.

#### 4.3.1 Depósito de água

A geometria escolhida para este elemento foi um paralelepípedo com uma abertura no seu interior central para ser colocada a fonte de iluminação artificial. Este depósito tem dimensões de 500x500x600 mm, com o abertura central com dimensões de 200x200x600 mm. O volume total deste depósito é de 150 litros.

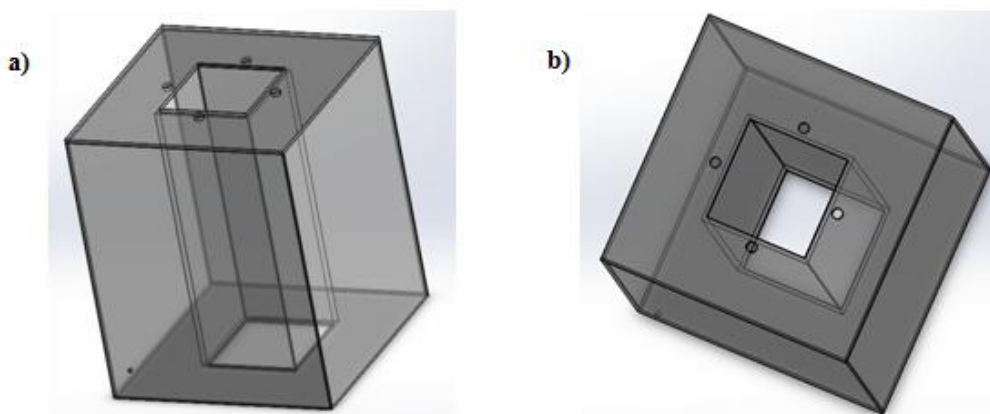


Ilustração 44 e 45- a) Vista frontal do desenho em Solidworks do depósito da água; b) Vista superior do desenho em Solidworks do depósito da água.

O material escolhido sofreu alterações na duração da sua construção. Numa fase inicial, foi projetado em acrílico visto este material apresentar os requisitos necessários e satisfatórios à sua construção mas, devido a problemas na sua construção, foi alterado para vidro temperado.

- **Análise dos materiais:**

A decisão entre um destes dois tipos de materiais requer uma análise das suas características mecânicas, óticas e químicas. Os principais e decisivos parâmetros nessa escolha são:

- Índice de transmissão de raios UV: Visto que no interior do depósito estarão colocadas as microalgas e que, parte essencial desde processo é a fotossíntese por elas realizada,

ou seja, a sua capacidade de transformação da luz visível em energia química, esta característica é das mais essenciais para a escolha do material.

- Densidade: A mobilidade do fotobiorreator é importante para ser possível e fácil a sua colocação em zonas com grande incidência de luz solar, logo, é necessária a utilização de materiais com baixo valor de densidade
- Módulo de elasticidade: Devido à agitação mecânica instalada no mecanismo, é natural a existência de pressões internas provocadas pela água o que torna necessária a utilização de um material com um elevado valor de módulo de elasticidade para poder absorver a energia e deformar antes da rotura.
- Condutividade térmica: O meio que as microalgas necessitam para ter o ritmo de crescimento acelerado requer uma temperatura estável que ronde o intervalo dos 25-30 °C. Desta forma, o material do depósito da água necessita possuir um baixo valor de condutividade térmica podendo assim manter mais facilmente a temperatura no interior do depósito, perdendo o menos calor possível. Esta reduzida perda de calor também se torna benéfica na redução de consumo de energia por parte da resistência.
- Temperatura máxima de utilização contínua: Como referido anteriormente, a temperatura ideal do meio estará entre os 25-30°C, ou seja, o valor de temperatura máxima de utilização contínua terá que ser superior para uma boa manutenção do material do depósito.

→ Acrílico:

O material vulgarmente designado de acrílico, ou tecnicamente designado por polimetilmetacrilato (PMMA), é um dos tipos de materiais com melhores especificações técnicas para o projeto em questão. Sendo este um material termoplástico rígido e transparente, muito leve e resistente, tornou-se na escolha inicial para a composição do depósito da água do fotobiorreator. O fato de ser relativamente dispendioso no formato tubular, conduziu à aquisição de placas retangulares de dimensões de 500x500x600 mm e quadradas de 500x500 mm, ou seja, foi a razão para a alteração da geometria inicialmente prevista.

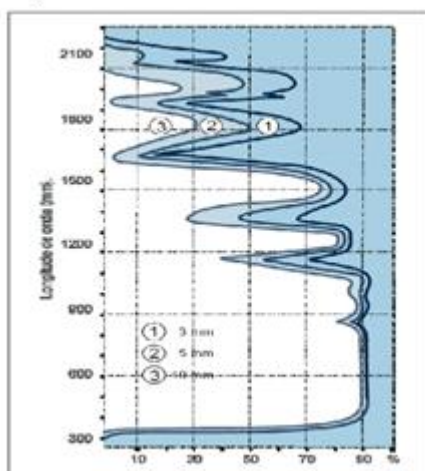
O acrílico utilizado foi do tipo EX, ou seja, do tipo extrudido sendo em seguida demonstradas as suas propriedades.

Tabela 16 e 17- Propriedades do acrílico tipo EX [50].

Tabela de características	Norma de ensaio			Unid.	Acrílico EX	
	ISO	NF	Outras		mm	Valor obtido
<b>Propriedades gerais</b>						
Absorção de água em 8 horas	R62 TS1002		DIN 53495	%	4	0,5
Densidade	R1183	TS1063	DIN 53479	g/cm <sup>3</sup>		1,19
<b>Propriedades mecânicas</b>						
Coefficiente de Poisson a 20°C						0,39
Ensaio de tração a 23°C	R527	TS1034	DIN 53455			
Esforço de rotura				MPa	4	74
Módulo de Elasticidade				MPa	4	3300
Alargamento da rotura				%	4	5
Ensaio de tração a 80°C	R527	TS1034	DIN 53455			
Esforço de rotura				MPa		
Alargamento da rotura				%		
Dureza Rockwell, Escala M	D 2039		ASTM D785			90
Resistência à compressão	R684	TS1101	DIN 53454	MPa	4	110
<b>Propriedades ópticas</b>						
Transmissão luminosa		TS1068 DIN 5036				
Espessura 3 mm				%	3	>92
Espessura 5 mm				%	5	>92
Espessura 8 mm				%	8	>92
Espessura 10 mm				%		
Índice de refração		TS1064	DIN 53491			1,492

Tabela de características	Norma de ensaio			Unid.	Acrílico EX	
	ISO	NF	Outras		mm	Valor obtido
<b>Propriedades térmicas</b>						
Coefficiente de dilatação linear	EN 2155-1		TS1251 DIN 52328	Mm/m°C		0,07
Condutividade térmica			DIN 52612	W/m°C		0,19
Calor específico			ASTM C351	J/g°C		1,32
Coefficiente K de isolamento			DIN 4701			
Espessura 3mm				W/m°C	3	5,3
Espessura 5mm				W/m°C	5	5,1
Espessura 10mm				W/m°C	10	4,5
Ponto de amolecimento Vic at B 10/10	R306	TS1021	DIN 53460	°C		>103
Temperatura de deformação	R 75/A	TS1005	DIN 53461	°C		102
Temp. máxima de utilização contínua				°C		80
Temp. estufa de moldagem				°C		140-170
Temp. máxima de aquecimento				°C		190
Temp. max. Superficial em infravermelho				°C		210
Temp. de principio de degradação				°C		240

a)



b)

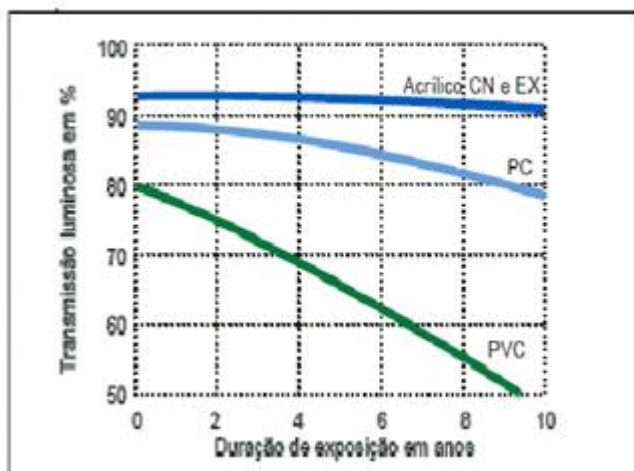


Ilustração 46 e 47- a) Propriedades ópticas do acrílico tipo EX (espectro de transmissão UV, visível e LR para as dimensões apresentadas) [30]; -b) Comparação da transmissão luminosa em porcentagem de vários tipos de acrílicos e plásticos, ao longo de uma década [50].



Os valores das características mais importantes na escolha do material para o projeto em questão são demonstradas na tabela seguinte:

Tabela 18- Propriedades do acrílico.

Propriedade	Resultado
Índice de transmissão de raios UV	92% em comprimentos de onda 400-700 nm
Densidade	1190 Kg/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	3300 MPa
Condutividade térmica	0.19 W/m°C
Temp. Máxima de utilização contínua	80 °C

→ Vidro:

Este material é obtido pelo arrefecimento de uma massa em fusão que, através do aumento da viscosidade, endurece e atinge elevada rigidez sem sofrer cristalização. Geralmente, os vidros utilizados são os do tipo silício-sodo-cálcicos que são constituídos por sílica (sob a forma de areia em cerca de 70 %), a soda (sob a forma de carbonato e sulfato em cerca de 14%), óxido de cálcio e óxidos metálicos em vidros coloridos.

Para este estudo, foram analisadas as propriedades físicas, químicas e térmicas do vidro sendo que, tal como no acrílico, foi dada maior importância a algumas propriedades associadas a este projeto. Na tabela seguinte estão demonstrados as propriedades mais importantes como também os seus valores associados.

Tabela 19- Propriedades do vidro.

Propriedade	Resultado
Índice de transmissão de raios UV	60-80% em comprimentos de onda 400-700 nm
Densidade	2500 Kg/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	70000 MPa
Condutividade térmica	1.02 W/m°C
Temp. Máxima de utilização	520 °C

- **Comparação Acrílico vs. Vidro:**

Após a análise dos dois materiais em questão, é possível fazer a comparação dos valores das propriedades mais importantes para o projeto e construção do fotobiorreator. A tabela seguinte, estabelece essa comparação.

Tabela 20- Comparação entre os resultados das propriedades de cada material

Propriedade	Acrílico	Vidro
Índice de transmissão de raios UV	92% em comprimentos de onda 400-700 nm	60-80% em comprimentos de onda 400-700 nm
Densidade	1190 Kg/cm <sup>3</sup>	2500 Kg/cm <sup>3</sup>
Módulo de elasticidade	3300 MPa	70000 MPa
Condutividade térmica	0.19 W/m°C	1.02 W/m°C
Temp. Máxima de utilização contínua	80 °C	520 °C

É perceptível que o acrílico, apresenta as melhores propriedades para o projeto do depósito da água do fotobiorreator, sendo essa então a razão pela qual foi escolhido para material do depósito. A verdade é que, como foi impossível concretizá-lo de forma tubular, a construção do depósito em placas quadradas não se vislumbrou possível, tendo então sido alterado pelo vidro.

#### 4.3.2. Suporte do depósito

De forma a tornar o fotobiorreator móvel e estável, foi projetado suporte móvel, de materiais económicos e eficaz para as funções a desempenhar. A geometria do mesmo foi criada para ter divisórias para acomodar as ligações elétricas e a botija de dióxido de carbono. Na sua zona central, foi criada um orifício onde estará colocada a "torre" que alberga a iluminação artificial e que servirá de passagem a toda a cablagem. A mobilidade do fotobiorreator está assegurada pela colocação de rodas na base dos pés do carrinho de suporte do depósito, tendo estes a capacidade de acionar um travão permanente.



Ilustração 48- Desenho em Solidworks do suporte do depósito

### 4.3.3. Torre central de apoio à iluminação artificial

Este elemento foi projetado em alumínio, de forma a não acrescentar muita massa ao fotobiorreator. É um elemento oco onde pelo seu interior passa toda a cablagem que ligará os elementos como a iluminação artificial, sensores, resistência e sistema de bombagem, tornando assim o fotobiorreator melhor cotado em questões estéticas. Nesta torre estão fixadas as quatro lâmpadas de luz de radiação UV colocadas ao seu redor. Com esta disposição, a iluminação artificial "atinge" a totalidade do depósito onde estão colocadas as microalgas.

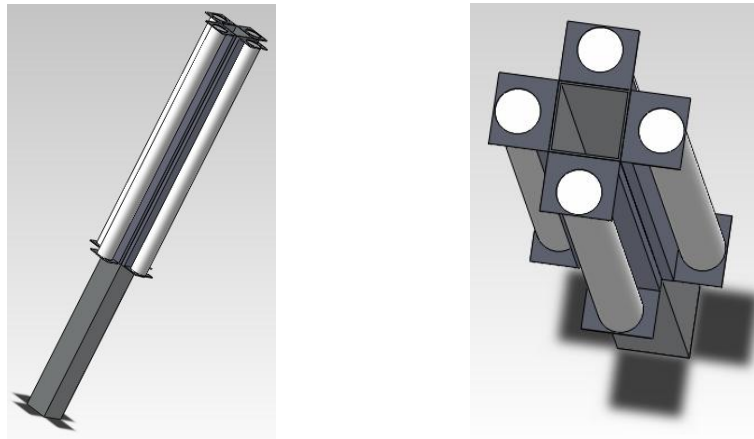


Ilustração 49- desenho em Solidworks da "torre" central.

A colocação de iluminação artificial no fotobiorreator é um fator importante no seu projeto visto que a captação de energia luminosa por parte das células vegetais na fotossíntese permite a produção de matéria orgânica rica em energia química. A cor refletida pelas plantas é, geralmente a verde, sendo que absorve muito bem a luz nas faixas de vermelho e violeta. Este perfil de absorção de luz é o seu espectro de absorção. Todas as células fotossintetizantes, exceto as bacterianas, contêm 2 tipos de clorofila, e um deles sempre, a clorofila a. O segundo tipo de clorofila geralmente é a clorofila b (nos vegetais superiores) ou a clorofila c (em muitas algas). Esses diversos tipos de clorofila diferem quanto à faixa do espectro da luz visível na qual cada uma delas capta luz com mais eficiência.

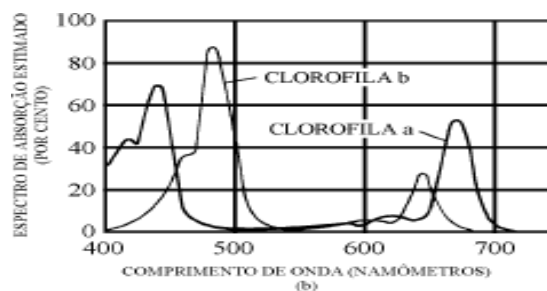


Ilustração 50- Picos de absorção de luz da clorofila a e b [51].

Podemos verificar analisando o gráfico, que ambas as clorofilas possuem dois picos de absorção: um mais elevado na faixa do violeta, e um outro menor, na faixa do vermelho.

As lâmpadas incandescentes são as lâmpadas ditas "normais" e cuja tecnologia continua a ser, apesar de alguns melhoramentos, a mesma usada há mais de 100 anos: um filamento de tungsténio é excitado pela passagem da corrente eléctrica causando o seu aquecimento e consequente incandescência. Este tipo de lâmpadas produz mais calor que luz.

As lâmpadas de halogéneo são uma espécie de lâmpadas incandescentes melhoradas. A vantagem em relação às incandescentes normais é o facto de possuírem "truques" de proteção ao filamento que lhes permitem ter mais luz, manter essa luz mais tempo e aumentar a sua vida média útil. Continuam no entanto a produzir mais calor que luz.

As lâmpadas fluorescentes são lâmpadas de vapor de mercúrio de baixa pressão. Uma carga eléctrica provoca a agitação do vapor de mercúrio através de um campo eléctrico entre dois eléctrodos originando a emissão de radiação UV. A matéria fluorescente usada no interior do tubo de vidro converte a radiação em luz visível. Diferentes matérias fluorescentes dão à luz tonalidades diferentes. Têm elevado rendimento luminoso, baixo consumo de energia e vida útil longa. É possível obtê-las em várias temperaturas de cor e em vários formatos.

As lâmpadas T5 são a última geração de lâmpadas fluorescentes tubulares. São mais pequenas, mais económicas e mais versáteis. Com um tubo apenas com 16mm de diâmetro conseguem debitar até 104 lúmen por watt.

Como as lâmpadas a utilizar têm de imitar a luz solar para que as algas façam a fotossíntese, a lâmpada escolhida é uma lâmpada Slim T5 da Climar. Esta lâmpada acentua a zona do vermelho e violeta do espectro, ficando próxima do espectro de absorção das algas. Tem 0.5 m de comprimento e uma potência de 14 W. Como foram colocadas quatro lâmpadas no equipamento projetado, podemos dizer que a potência de iluminação artificial é de 52 W.

#### 4.3.4. Torneira de recolha de amostras

O acompanhamento do progresso das culturas realizadas no fotobiorreator é essencial para perceber o funcionamento do mesmo. Esse acompanhamento é realizado pela recolha e análise de variadas amostras que, ao longo do tempo, revelam a progressão do crescimento das microalgas. Para tal, tornou-se necessária a colocação de uma torneira para a mencionada recolha das amostras.



Ilustração 51 e 52- a) Duas ilustrações de desenhos em Solidworks da torneira de recolha de amostras; b) Ilustração da torneira escolhida.

#### 4.3.5. Sistema de agitação

A agitação do meio de cultura é um dos pormenores mais importantes de todo o funcionamento do fotobiorreator. A movimentação da cultura por todo o depósito promove uma maior eficiência luminosa, a capacidade de todas as microalgas poderem aceder a todos os nutrientes do meio de cultura e uma diminuição da deposição das microalgas no fundo do depósito. Assim, foi projetado um sistema de agitação acoplado a uma bomba submersa. este sistema consiste numa tubagem perfurada na parte superior e inferior sendo toda ela impulsionada por uma bomba de água. A perfuração na parte inferior impedia a deposição no fundo do depósito e a perfuração na parte superior, promoveria a deslocação das microalgas para as zonas mais elevadas do depósito, que, por gravidade, desceriam naturalmente.



Ilustração 53 e 54- a) Desenho em Solidworks do sistema de agitação do meio; - b) Ilustração da bomba de circulação de água utilizada.

A bomba escolhida foi a FP-1006B. Na tabela seguinte são apresentadas as suas características técnicas mais importantes.

Tabela 21- Características da bomba selecionada.

Caraterística	FP-1006B
Potência	50 W
Voltagem	AC 230/115 V
Frequência	50/60 Hz
Caudal	1660 L/h
Diâmetro da saída de caudal	15 mm
Altura máxima do jato	1,81 m

- **Simulação de escoamento da tubagem**

De forma a demonstrar o comportamento do sistema de agitação colocado no interior do depósito, foi realizada uma simulação que demonstra as diferentes velocidades existentes ao longo da tubagem.

A simulação foi realizada no software *Fluent*, considerando-se como parâmetros de entrada a geometria da tubagem e o valor do caudal da bomba.

- Simulação de escoamento da tubagem com uma bomba instalada:

Nesta simulação, foi possível analisar as velocidades de circulação da água ao longo do interior da tubagem. Na primeira simulação apenas se admitiu a instalação de uma bomba de água tendo ela um caudal de 1660 L/h.



Ilustração 55- Simulação das velocidades de escoamento da água no interior da tubagem com uma bomba instalada.

Tabela 22- Valores de velocidade em m/s por zona da tubagem da 1ª simulação.

Zona da tubagem	Velocidade (m/s)
1/13	1,54
2/14	1,51
3/15	1,49
4/16	1,02
5/17	0,47
6/18	0,23
7/19	0.22
8/20	0.47
9/21	0.99
10/22	1.43
11/23	1.49
12/24	1.57

Analisados os dados atrás referidos sobre velocidades nas zonas da tubagem, concluiu-se após visualização do resultado dos testes no equipamento projetado que o objetivo que lhes competia não era conseguido, ou seja, não efetuava a correta circulação do meio como também não evitava a deposição das microalgas no fundo do depósito. Como se verifica na ilustração da simulação, as velocidades decresciam significativamente na zona mais distante da bomba de circulação.

#### 4.3.6. Espelhos

Na parte inferior e superior do orifício do depósito por onde passa a "torre" central, estão colocados dois espelhos que, a zona de reflexão da luz está orientada para o interior do orifício de forma a refletir toda a iluminação vinda das lâmpadas para o meio de cultura.. Esta orientação deve-se ao fato de estes espelhos poderem refletir a luz que provém da iluminação artificial que está localizada na "torre" central. Assim, aumenta-se o aproveitamento da luz incidente no depósito reduzindo a perda de iluminação. Estes espelhos têm dimensões de 210x210 mm no exterior e no orifício interior de 70x70 mm.

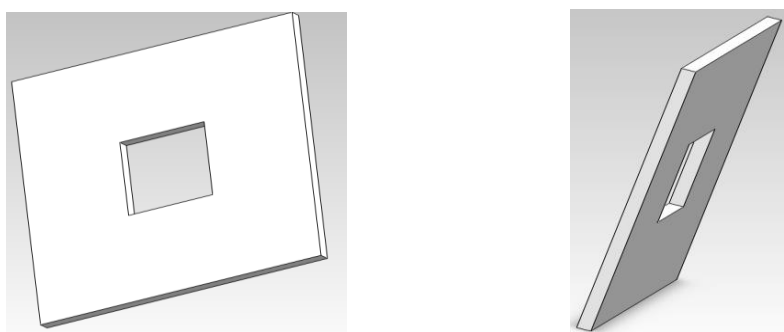


Ilustração 56- Desenho em Solidworks do espelho de reflexão da luz.

#### 4.3.7. Botija de dióxido de carbono

Como num vulgar processo de fotossíntese, as microalgas presentes no meio de cultura necessitam de dióxido de carbono para, através da luz solar, produzirem oxigénio. Desta forma, tornou-se necessária a aquisição de uma botija de dióxido de carbono que, acoplado a um manómetro e uma mangueira, formaram um sistema de injeção de dióxido de carbono diretamente no meio de cultura. Esta injeção poderia ser acionada sempre que o operador assim o entender visto ser possível através do manuseamento de uma alavanca.

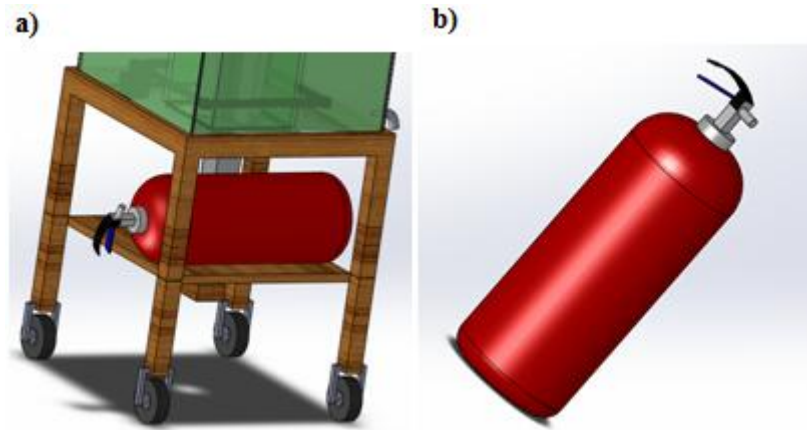


Ilustração 57 e 58- a) Desenho em Solidworks do fotobiorreator com a botija.; b) Botija de dióxido de carbono.

A agitação é outro parâmetro importante de crescimento das algas porque homogeneiza a distribuição das algas, o calor, metabólitos e facilita a transferência de gases. Havendo também um certo grau de turbulência é desejável pois promove a circulação das algas de zonas mais escuras para zonas mais iluminadas do reator.

Nos fotobiorreactores estudados no capítulo anterior, os agitadores eram normalmente agitadores centrífugos (descreviam um movimento circular). Como o reator tem a forma paralelepípedica e tem uma abertura central, não é viável a utilização deste tipo de agitadores.

Pelo facto de realizarem a fotossíntese as algas são autossuficientes e podem viver onde quer que haja luz, oxigénio e dióxido de carbono, água suficiente e alguns elementos essenciais. O CO<sub>2</sub> é um componente fundamental para a fotossíntese das plantas. Neste processo o CO<sub>2</sub> é captado e, com ajuda de luz e alguns outros nutrientes, transformam-no em açúcares, carboidratos e outros compostos vitais, libertando oxigénio como produto final.

Sem o CO<sub>2</sub>, as plantas são incapazes de realizarem este metabolismo normal e morrem rapidamente. É um composto que faz parte da nossa atmosfera e além disso dissolve-se muito facilmente na água. O componente escolhido para o fornecimento do CO<sub>2</sub> é o Kit Classic 2 kg da marca CrystalRed.





Ilustração 59- Kit de CO2 da CrystalRed

A injeção dá-se através de um tubo em material polimérico que, através de orifícios situados na tampa superior do depósito, entra em contato com o meio e liberta o CO<sub>2</sub>. De salientar que este fornecimento será regulado, pois a sua concentração depende de espécie para espécie de alga, sendo que umas necessitam de maior quantidade do que outras.

#### 4.3.8. Resistência de aquecimento

Após análise da bibliografia existente sobre culturas de microalgas em fotobiorreatores, pode-se concluir que a temperatura ideal para o rápido crescimento das microalgas será no intervalo entre os 25-30 °C. A iluminação solar e artificial, através do calor por elas libertada, não são suficientes para colocar a água a essa temperatura. Como tal, foi adicionado uma resistência de aquecimento de água, vulgarmente utilizadas, no aquecimento de aquários domésticos destinado à criação de peixes. Esta resistência permite aquecer quantidades de água elevadas, mais concretamente, até 150 litros de líquido. Outra particularidade importante deste equipamento é o fato de ter incorporado um sensor de temperatura que, através de um balastro, ao ser atingida a temperatura programada pelo operária, se desliga automaticamente, ligando de seguida aquando da descida da mesma. O modelo escolhido foi o A750 Elite Mini Submersible Pre-Set Heater da marca Hagen.



Ilustração 60- Ilustração da resistência de aquecimento da água do depósito



#### 4.4. Construção do fotobiorreator

Inicialmente como já foi referido no capítulo anterior, o material escolhido para constituir o depósito do meio de cultura foi o acrílico. Este material estaria dividido em placas sendo acoplada nas laterais através do uso de silicone e auxiliado por cantoneiras de alumínio.

Através de técnicas associadas à carpintaria, imobilizou-se o sistema, peça a peça, do forma a que a silicone seca-se na perfeição, como se verifica na figura seguinte. Após juntas todas as placas de acrílico,



Ilustração 64- Montagem do depósito em acrílico.

Posteriormente, após a construção total do depósito e secagem do silicone, foi adicionada água de forma a testar a vedação do depósito. Como se verifica nas figuras seguintes, após 30 minutos de permanência da água no depósito, este cedeu junto à zona de colagem através do silicone, empurrando, inclusive, as cantoneiras.



Ilustração 65 e 66- a) Teste à vedação do depósito; b) Cedência do depósito.

A iluminação artificial, ou seja, as quatro lâmpadas T5 da Climar descritas no capítulo anterior, foram acopladas a um veio paralelepípedo oco, sendo cada uma delas colocadas numa das quatro faces do veio. A cablagem das armações das lâmpadas passam por orifícios criados nas referidas faces

do veio, tomando o rumo descendente até à parte inferior do veio. Esta descrição é observável na figura seguinte.



Ilustração 67- Veio central acoplado com as 4 lâmpadas T5

Como o depósito da cultura cedeu, foi necessária a alteração do material para vidro temperado com espessura de 5 mm. As placas deste vidro são da mesma dimensões que as de acrílico, sendo também coladas através de silicone especializada em colagem de aquários. Numa das faces efetuou-se uma furação de forma a colocar a torneira de extração de amostras vedada através de dois vedantes. A construção e testes de vedação do depósito estão demonstrados nas figuras seguintes.

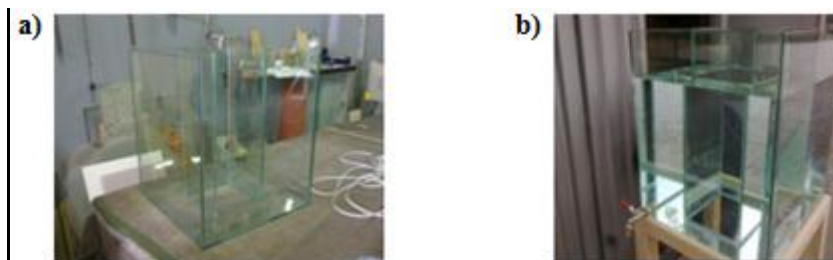


Ilustração 68 e 69- a) Construção do depósito; b) Teste a vedação do depósito

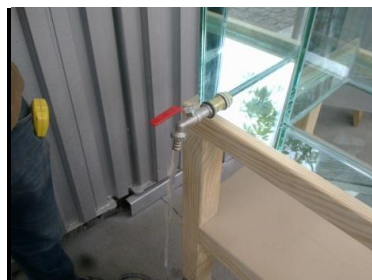


Ilustração 70- Teste a vedação da torneira de amostras

Após esta etapa, através de carpintaria, construiu-se o carrinho de suporte ao depósito, sendo este constituído de madeira maciça, sendo aparafusadas rodas nos quatro pés do carrinho, tornando-o móvel.

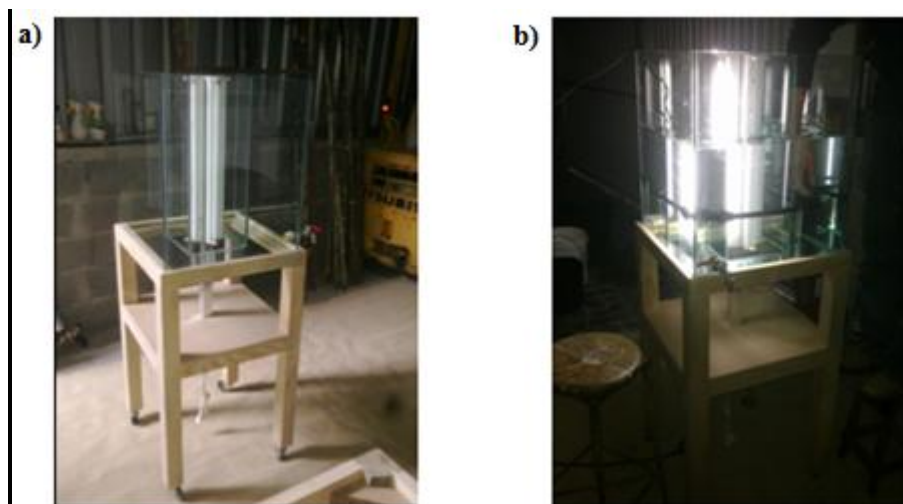


Ilustração 71 e 72- a) Carrinho de suporte com o depósito; b) Testes à vedação e iluminação.

Foi montado sistema de agitação da água através de bombas e de uma tubagem perfurada. Esta tubagem foi colocada a 180 mm do fundo do depósito, pois, após deslocação gradual e ascendente da mesma, verificou-se que a esta altura se evitava a deposição de microalgas no fundo do depósito.

Após a primeira cultura de microalgas verificou-se que ocorria, frequentemente, o entupimento dos orifícios de saída do caudal da tubagem. O alargamento dos orifícios também foi executado mas, com o aumento dessa abertura, menor era a velocidade de saída da água, ou seja, menos agitação do meio de cultura. Sendo assim, a colocação ideal das bombas foi a que está apresentada na figura seguinte. As bombas foram colocadas de forma invertida e foi retirada a tubagem.



Ilustração 73- Colocação das bombas no depósito.

## 4.5. Projeto de automatização do funcionamento do fotobiorreator

De forma a otimizar o desempenho do fotobiorreator, foi projetado um sistema para automatizar o seu funcionamento e de todos os seus componentes elétricos. desta forma, o equipamento poderia funcionar de forma autónoma sem a presença e vigilância constante do operador.

### 4.5.1. Introdução ao tema

Criado por um grupo de engenheiros da General Motors em 1968, o PLC (Power Line Communication) foi criado para facilitar a programação de autómatos, facilitar a manutenção e reparação dos mesmos, evitar a lógica cablada e reduzir os custos da instalação. Através destes controladores programáveis, foi reduzido o tempo de programação e aumentado a sua versatilidade devido à sua modularidade. Ao longo do tempo, as capacidades do programação dos PLC's foram crescendo, divergindo para além das básicas funções do tipo e, ou e negação. Com o tempo, foram aparecendo funções matemáticas avançadas que aumentaram as funcionalidades da programação em PLC's. Juntamente com o aumento de funções, deu-se também o aumento das entradas e saídas do hardware. Este ramo da tecnologia cresceu exponencialmente, fazendo com que o topo de gama lançado em pouco tempo se torne num controlador obsoleto. De entre muitas vantagens, destacam-se as seguintes:

- Custo reduzido comparado com o grande número de aplicações possíveis;
- Custo reduzido e simplicidade de instalação e operação;
- A lógica cablada antiga podia ser simplesmente ser alterada totalmente pelos automatismos com PLC;
- A linguagem de programação existente para programar estes equipamentos são simples e de fácil entendimento;
- Com o aumento de necessidades, é possível flexibilizar o automatismo através de reprogramações ou aumento do número de módulos;
- O hardware associado é resistente contra vários ataques do dia a dia como a humidade, poeiras e choques;
- Com o passar do tempo, as dimensões dos PLC's têm vindo a decrescer gradualmente, facilitando a sua locomoção e instalação.

Um PLC é constituído por: unidade central de processamento, memória, módulos de entrada e saída, fonte de alimentação e unidade de programação. O seu funcionamento consiste no assimilar do estado do mundo exterior por parte dos módulos de entrada que, o transmite para a memória. Através

dessa informação a memória que nela contém o programa de funcionamento toma decisões executando-as através dos módulos de saída. O programa que toma todas as decisões, é introduzido na memória através de uma unidade de programação estando esta numa linguagem de programação.

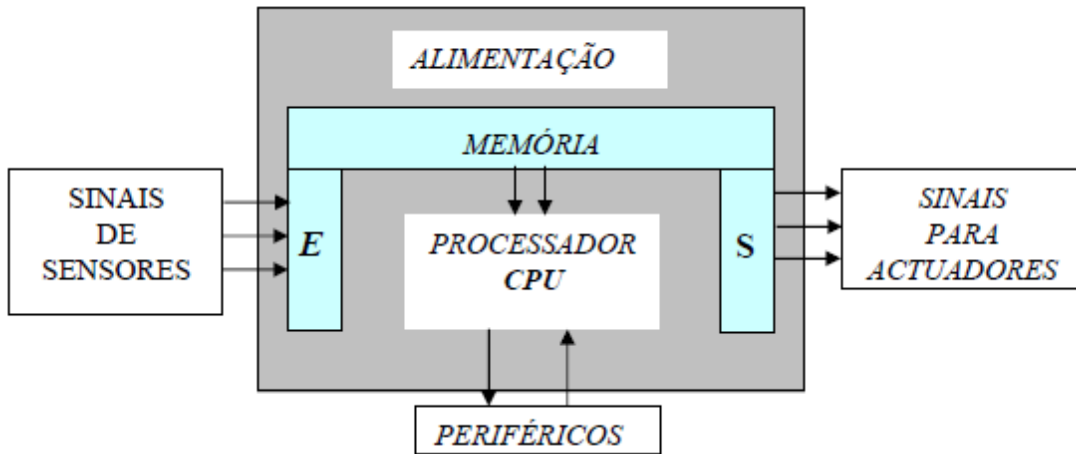


Ilustração 74- Esquema de funcionamento de um PLC [55]

O funcionamento do PLC consiste na execução do programa carregado na sua memória. Este basicamente na análise das informações dadas pelos módulos de entrada, execução das instruções do programa carregado e tomada de decisões em acordo com o programado. Resumidamente, no funcionamento de um PLC existem três fases distintas onde, numa primeira fase, o PLC necessita de um tempo de resposta de entrada, de seguida, um tempo de processamento da informação assimilada e , finalmente, um tempo de resposta de saída. Este funcionamento está descrito na figura seguinte.

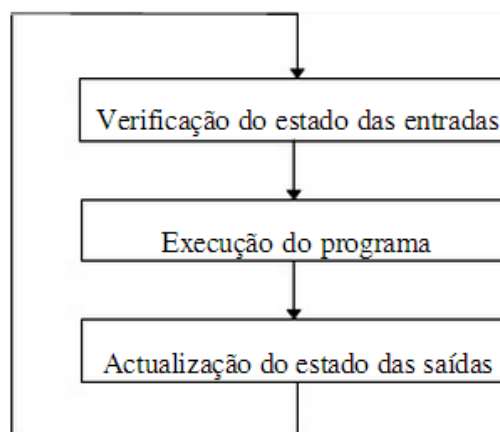


Ilustração 75- Ciclo simplificado do funcionamento de um PLC [55].

O uso dos PLC's na atualidade é cada vez maior. Estes sistemas automatizados permitem a sua aplicação em qualquer ramo da indústria. No fundo, estão presentes no nosso dia a dia em quase todos os equipamento que utilizamos. No ramo das tecnologias e indústria, os ramos onde a sua inserção é mais importante e utilizada é na robótica, no controlo de máquinas de CNC, controlo de células de fabrico ou montagem , sistemas de transporte e manuseamento de materiais e controlo e monitorização de processos industriais, entre outros.

#### 4.5.2. Equipamentos de automatização do fotobiorreator

Para efetuar a automatização do fotobiorreator foi necessário executar a seleção dos componentes desse sistema.

Este sistema consiste em dois blocos: um PLC e sensores. O PLC controla o funcionamento do fotobiorreator, dando ordens mediante a informação que lhe é fornecida pelos sensores de pH, de iluminação e de temperatura. De seguida apresenta-se a lista dos componentes escolhidos para o sistema de automatização do fotobiorreator.

Tabela 23- Designação de cada componente do sistema de automação e a sua respetiva função.

Componente	Designação	Função
PLC	PLC CPM1A, Omron	Controlar o funcionamento do fotobiorreator mediante as informações definidas pelos sensores
Termostato eletrónico	E5L-A, Omron	Medir a temperatura do meio de cultivo
Luxímetro	Luxímetro Digital Marca Center Modelo 337	Medida a incidência luminosa solar
Transmissor de pH	Controlador de pH digital 8205, Burkert	Medir o nível de pH do meio de cultivo





Ilustração 76, 77, 78 - a) PLC CPM1A <sup>[56]</sup>; b) Termostato eletrônico E5L-A <sup>[56]</sup>; c) Luxímetro DMC 337 <sup>[56]</sup>; d) Transmissor de pH digital 8205 <sup>[56]</sup>.

#### 4.5.3. Grafcet de programação

De forma a simplificar o entendimento e para facilitar a execução de projetos de automação complexos, de forma eficiente e de baixo custo, foi criado em 1977 o Grafcet ( Graphe de Commande Etape-Transition) pela " Association Française pour la Cybernétique Economique et Technique". Esta linguagem gráfica é utilizada para representar o algoritmo de controlo, que consiste em etapas e transições, associando as ações às etapas e as recetividades às transições. As definições dos termos atrás referidos são:

- Etapa - representa um dos estados do sistema ou de parte dele;
- Transição - Evolução entre dois dos estados do sistema;
- Ação - Ordem enviada ao processo físico aquando da ativação da etapa a ela associada;
- Recetividade - Condição acoplada a uma transição, com um valor que estabelece uma autorização ao disparo dessa transição.

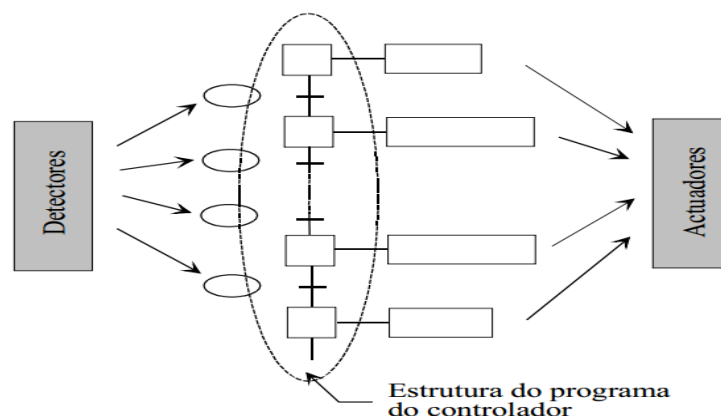


Ilustração 79- Esquema explicativo de um Grafcet e seus constituintes [55].

Uma etapa é sempre associada a uma transição e vice versa. As vantagens desta representação gráfica denominada grafcet são as seguintes:

- Existência de normas standard associadas ao grafcet mantendo assim a sua integridade e universalidade;
- Esquema orientado ao processo, ou seja, possui características que apenas são suportadas por ferramentas deste tipo;
- O trabalho realizado com o grafcet não se altera consoante o material utilizado, mantendo-se sempre igual;
- A universalidade e simplicidade da linguagem grafcet facilita a perceção de erros, diminuindo a perda de tempo e baixando o custo com construtores, fornecedores e equipas de conceção;
- Rapidez de programação em grafcet, tornando esta ferramenta cada vez mais produtiva.

Em seguida estão apresentados os grafcet's associados aos mecanismos a automatizar no projeto do fotobiorreator.

#### ➤ **Leitor de pH**

O funcionamento correto do fotobiorreator depende de vários fatores. Um dos requisitos a controlar é o valor de ph presente no meio de cultura. Desta forma, foi concebido um grafcet que controla o funcionamento de um mecanismo que alerta para mudanças de valores do nível do ph.

Na etapa inicial, ou seja, a quando do início do funcionamento do leitor de ph, o meio de cultura estará em ph neutro ( $ph = 7 \pm 5\%$ ). Neste caso, o leitor ativará uma luz amarela. Se, numa posterior leitura dos valores de ph, esse valor for  $ph < 7 - 5\%$ , então será ativada uma luz verde que alertará o operador para efetuar as mudanças necessárias à reposição do ph neutro. No caso do valor de ph ser  $> 7 + 5\%$ , é ativada uma luz encarnada que, tal e qual como a luz verde, alertará o operador. A tolerância dada aos valores de ph pretendidos é de 5%.

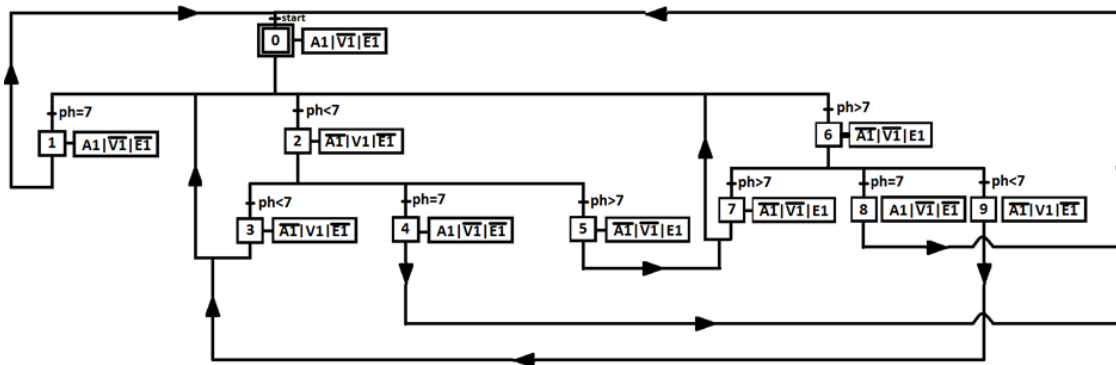


Ilustração 80- Grafcet de funcionamento do leitor de pH.

Tabela 24 e 25- a) Legenda das ações do Grafcet do med. pH; b) Legenda das transições do grafcet do med. pH.

a)

Ação	Legenda
A1	Ativar luz amarela
V1	Ativar luz verde
E1	Ativar luz encarnada

b)

Transição	Legenda
ph= 7	O ph do meio de cultura apresenta valor igual a $7 \pm 5\%$
ph > 7	O ph do meio de cultura apresenta valor maior que $7 + 5\%$
ph < 7	O ph do meio de cultura apresenta valor menor que $7 - 5\%$
start	Início do funcionamento do sistema

### ➤ Resistência de aquecimento do meio de cultura

Outro fator a controlar com precisão no funcionamento do fotobiorreator é a temperatura no interior do depósito onde se encontra o meio de cultura juntamente com as microalgas. Sendo assim, foi colocada uma resistência de aquecimento submersa na água que, através de um termopar incorporado, permite iniciar ou terminar o seu funcionamento mediante a temperatura lida pelo termopar. Neste caso, programou-se a resistência de forma a que esta inicie o seu funcionamento quando o termopar indique que a temperatura é inferior a  $25^{\circ}\text{C} - 5\%$ . A resistência funciona em contínuo, terminando o seu funcionamento quando o termopar indica que a temperatura é superior a  $30^{\circ}\text{C} + 5\%$ . A tolerância dada aos valores de temperatura é de 5%.

Tabela 26- Legenda de ações do garfctet da resistência.

Ação	Legenda
R1	Ativa a resistência

Tabela 27- Legenda de transições do grafctet da resistência

Transição	Legenda
start	Início do funcionamento do sistema
T<25	O valor da temperatura é inferior a 25°C
T>30	O valor da temperatura é superior a 30°C

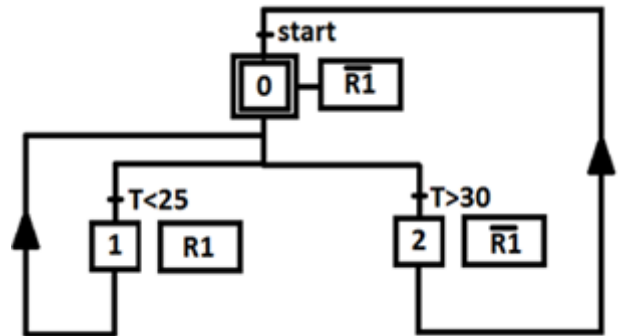


Ilustração 81- Grafctet de funcionamento da resistência

### ➤ Iluminação artificial

A iluminação solar é um fator importantíssimo no sucesso deste mecanismo, visto que as microalgas necessitam da luz solar para efetuar a fotossíntese de forma a poderem se multiplicar. Como a luz solar apenas está presente em cerca de 12 horas por dia e de forma a aumentar o rendimento do sistema, incorporou-se um sistema de iluminação artificial com o mesmo comprimento de onda da luz solar. Para não existir um desperdício de energia, criou-se um grafctet de controlo da iluminação artificial.

O sistema de iluminação ligará quando o nível de iluminação baixar até aos 11 lux - 5%, mantendo-se ligada até que a célula fotoelétrica informe que o nível de iluminação atingiu os 33 lux + 5%, independentemente da hora do dia, da estação do ano e do estado atmosférico. A tolerância dada aos valores do nível de iluminação é de 5%.

Tabela 28- Legenda das ações do garfctet da iluminação

Ação	Legenda
I1	Ativa a iluminação artificial

Tabela 29- Legenda das transições do grafctet da iluminação

Transição	Legenda
start	Início do funcionamento do sistema
Ft < 11 lux	O nível de iluminação é inferior a 11 lux
Ft > 33 lux	O nível de iluminação é superior a 33 lux

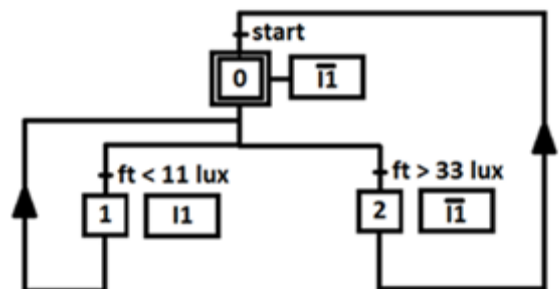


Ilustração 82- Grafctet de funcionamento da iluminação.

#### 4.5.4. Linguagem Ladder

Após a execução do graficet de funcionamento de qualquer máquina, é necessário efetuar a programação do PLC. Para o fazer exige-se a passagem da linguagem graficet para diagramas de Ladder.

A linguagem Ladder é uma ajuda para a programação de um PLC. Como se entende pelo nome desta linguagem, o termo "Ladder" vem do formato destes diagramas se assemelharem a escadas. A sua principal função é o controlo do acionamento de saídas, dependendo da combinação dos contatos de entrada. Esta técnica é utilizada de forma a descrever uma função lógica usando contatos e relés. Dotado de uma notação simples, a linguagem Ladder é um diagrama de contatos que é composto por duas barras verticais que representam os pólos positivos e negativos de uma bateria. A ideia associada a esta linguagem é o fato de ser uma representação gráfica de um fluxo de eletricidade virtual entre as tais duas barras energizadas. Esta eletricidade virtual tem o seu fluxo sempre com o sentido do pólo positivo para o negativo

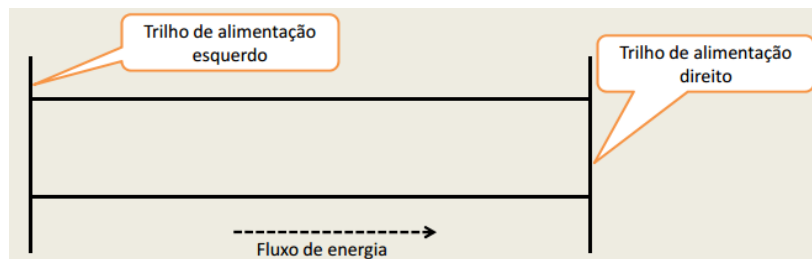
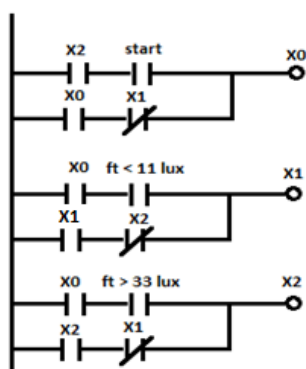


Ilustração 83- Esquema do fluxo energético num diagrama de Ladder [58].

#### ➤ Iluminação artificial

Sequência:



Output:

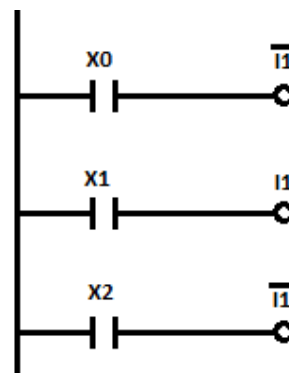


Ilustração 84- Transições e ações do Ladder da iluminação.

Tabela 30- Legenda das transições e ações do diagrama de Ladder da iluminação.

Transição	Legenda
start	Início do funcionamento do sistema
$F_t < 11 \text{ lux}$	O nível de iluminação é inferior a 11 lux
$F_t > 33 \text{ lux}$	O nível de iluminação é superior a 33 lux

Ação	Legenda
I1	Ativa a iluminação artificial

➤ Resistência de aquecimento do meio de cultura

Sequência:

Output:

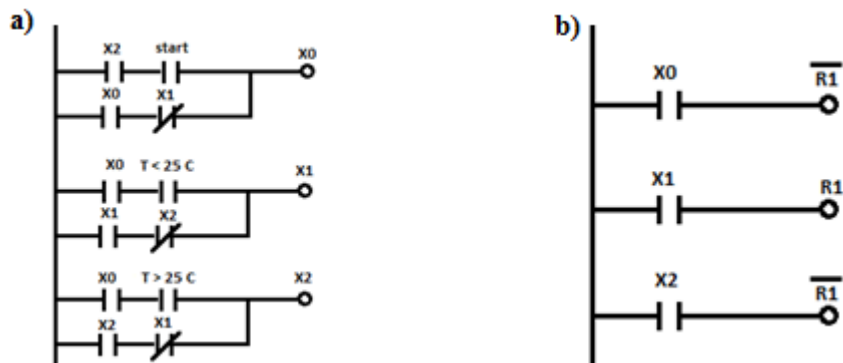


Ilustração 85 e 86- a) Transições do Ladder da resistência; b) Ações do Ladder da resistência.

Tabela 31 e 32- Legenda das transições e ações do diagrama de Ladder da resistência.

Transição	Legenda
start	Início do funcionamento do sistema
$T < 25$	O valor da temperatura é inferior a 25°C
$T > 30$	O valor da temperatura é superior a 30°C

Ação	Legenda
R1	Ativa a resistência

➤ Leitor de Ph

Sequência:

Output:

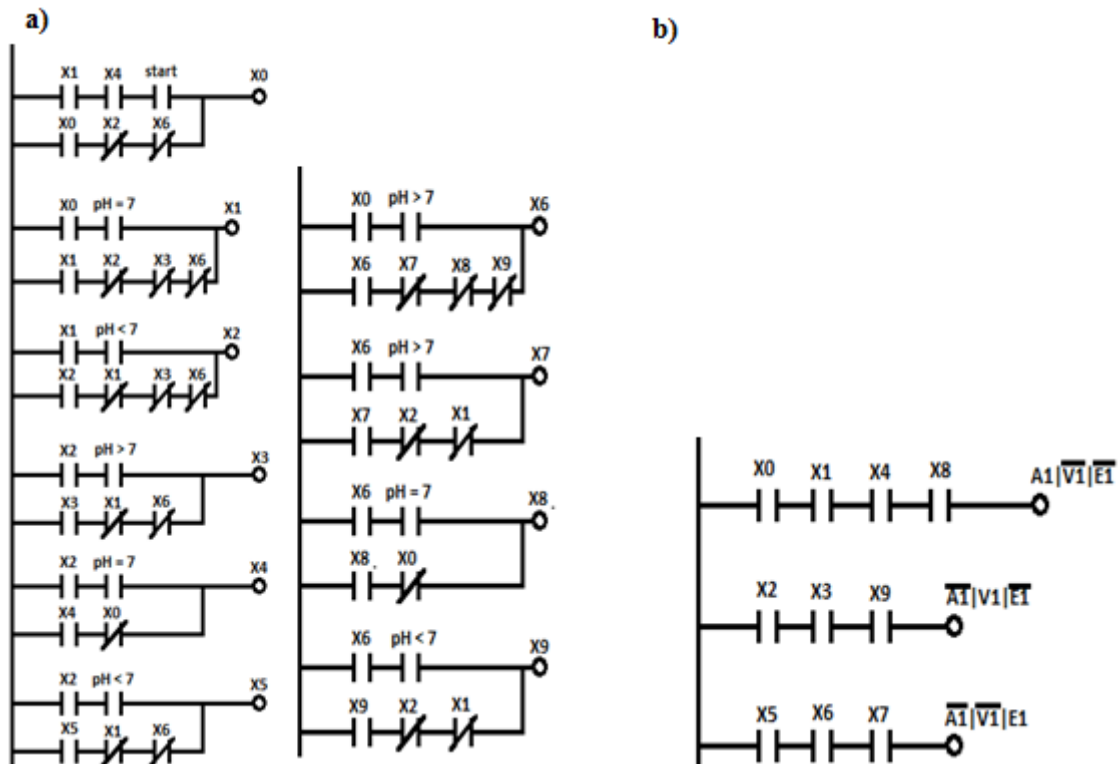


Ilustração 87 e 88- a) Transições do Ladder do leitor de pH; b) Ações do Ladder do leitor de pH.

Tabela 33 e 34- Legenda das transições e ações do diagrama de Ladder do leitor de pH.

Ação	Legenda
A1	Ativar luz amarela
V1	Ativar luz verde
E1	Ativar luz encarnada

Transição	Legenda
ph= 7	O ph do meio de cultura apresenta valor igual a $7 \pm 5\%$
ph > 7	O ph do meio de cultura apresenta valor maior que $7 + 5\%$
ph < 7	O ph do meio de cultura apresenta valor menor que $7 - 5\%$
start	Início do funcionamento do sistema





## 5. Capítulo V - Ensaio e validação do fotobiorreator construído

Após o projeto e a construção do fotobiorreator, este equipamento foi colocado em funcionamento. Inicialmente preparou-se o meio de cultivo seguindo os requisitos da bibliografia existente e a das microalgas em estudo. Posteriormente, deu-se início à atividade do fotobiorreator, sendo o crescimento das duas culturas realizadas monitorizado através de ensaios às amostras retiradas, por sólidos totais e por densidade ótica.

### 5.1. Meio de cultura e sua preparação

Um dos aspetos que distinguem as espécies de algas é o seu teor em óleo. Considerando este aspeto, foi escolhida a espécie de microalga *Chlorella emersonii* (C. E.) para validação do equipamento em teste. Estas algas são provenientes da ACOI (Coimbra Collection of algae).

Esta espécie apresenta um teor em óleo significativo e o seu meio de cultivo natural é simples e abundante, ou seja, frequentemente estas microalgas reproduzem-se e habitam em lagos. Na tabela seguinte seguem enumeradas as características desta espécie de microalgas

Tabela 35- Lista de características da espécie *Chlorella emersonii* [29].

Caraterística	valor
Teor em lípidos	25 - 65 %
Habitat natural	Lagoa naturais
Estrutura celular	Unicelular
Dimensões celulares	5 - 10 $\mu\text{m}$ até 25 - 35 $\mu\text{m}$
Temperatura ideal de crescimento	25 - 30 $^{\circ}\text{C}$

Apesar de as células das microalgas terem apenas 25 - 35  $\mu\text{m}$  de dimensão, quando se promove a coalescência, atingem, por vezes, 1 mm de comprimento. Outra característica importante desta espécie é o fato de possuir um alto teor de hidrocarbonetos.

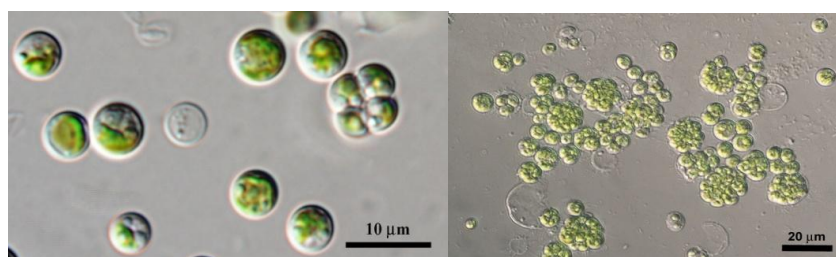


Ilustração 89 e 90- Imagens microscópicas de *Chlorella emersonii* [57].

Através de indicações dadas pela ACOI, foi elaborado o meio de cultivo para a espécie de microalgas em questão.

Tabela 36- Meio de cultivo indicado pela ACOI para a espécie *Chlorella emersonii* [29].

Designação	Percentagem de concentração	Quantidade (ml)
Nitrato de Potássio - $KNO_3$	1%	10
Sulfato de Magnésio - $MgSO_4 \cdot 7H_2O$	0,1%	10
Fosfato de amônio dibásico - $(NH_4)_2HPO_4$	0,2%	5
Sulfato de Cálcio - $CaSO_4$	<b>Solução saturada</b>	10
Extrato de solo	2%	20
Água destilada	94%	940
Micronutrientes	0,5%	5

Na descrição da tabela anterior, verifica-se a existência de extrato de solo. A preparação deste extrato consiste em utilizar uma certa massa de solo (terra), o mais natural possível, ou seja, sem presença de fertilizantes químicos, raízes e outros agentes, adicionar água destilada e aquecer durante um período relativamente longo de tempo. Posteriormente realiza-se a centrifugação, separando o extrato das partículas. Finalmente, coloca-se a solução no autoclave por um período de 1 hora à pressão de 1 atmosfera. Este último processo é repetido por três dias consecutivos, tendo como objetivo eliminar possíveis patogênicos que inibam ou inviabilizem o cultivo das microalgas.

Um dos constituintes do meio de cultivo é uma solução de micronutrientes essenciais para o crescimento das microalgas. A composição desta solução apresenta-se na tabela seguinte.

Tabela 37- Constituição da solução de micronutrientes inserida no meio de cultivo

Designação	Percentagem de concentração	Quantidade
Sulfato de Zinco - $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$	0,1%	1.0 ml
Sulfato de Manganês - $MnSO_4 \cdot 4H_2O$	0,1%	2.0 ml
Ácido Bórico - $H_3Bo_3$	0,2%	5.0 ml
$Co(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	0,02%	5.0 ml
Molibdênio de sódio - $Na_2MoO_4 \cdot 2H_2O$	0,02%	5.0 ml
Sulfato de Cobre hexahidratado - $CuSO_4 \cdot 5H_2O$	0,0005%	1.0 ml
Água destilada	0,4905%	981 ml
Hepta-sulfato ferroso $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	0.0323	0.7 g
ETDA (Ethylenediaminetetraacetic acid – Titriplex III, Merck)	0,0367	0.8 g

## 5.2. Kick off da actividade do fotobiorreator

No início da primeira cultura foram adicionados 3 litros de biomassa associados a 50 litros de meio de cultivo com a composição anteriormente descrita. Esta cultura foi mantida durante 30 dias, tendo sido realizadas amostragens da mesma e os respetivos ensaios de sólidos totais e de densidade ótica.

Nesta fase, estavam instalados os equipamentos descritos no capítulo de projeto com o pormenor de existir uma tubagem associada a uma bomba de forma a promover a circulação do meio.

No caso da segunda cultura, procedeu-se a uma alteração do sistema de agitação. Esta alteração deveu-se ao aumento de ocorrências de entupimento da tubagem à medida que as microalgas se multiplicavam. Foi acrescentada mais uma bomba mas, foi retirada toda a tubagem, sendo as duas bombas colocadas estrategicamente no fundo do depósito de forma a provocar um efeito de vórtice no meio de cultivo. Neste caso, foram colocados 2 litros de biomassa com 40 litros de meio de cultivo. A cultura foi mantida durante um mês mas, período findo o qual, foram adicionados 25 litros de meio de cultivo. Como verificado na primeira cultura, também neste caso foram retiradas amostras do meio para realizar as determinações periodicamente de análise ao crescimento das microalgas, ou seja, ensaios de sólidos totais e de densidade ótica.



Ilustração 91- Início do funcionamento do fotobiorreator.

### 5.3. Validação e otimização da instalação

No final dos ensaios realizadas foram analisados os resultados dos mesmos através do estudo e análise das amostras retiradas ao longo do processo de crescimento das microalgas. Desta forma foi possível fazer uma comparação dos dois ensaios, avaliando-os pela taxa de crescimento das microalgas. Por fim, após se dar o termino dos dois ensaios, foi quantificada a quantidade de biomassa extraída em cada caso.

### 5.4. Ensaio realizados às microalgas

Com a finalidade de controlar as condições de cultura de forma a acompanhar a evolução do crescimento das microalgas, ao longo dos dois ensaios realizados foram periodicamente retiradas amostragens do meio. Estas amostras, foram submetidas a alguns testes de diferentes naturezas. Para controlo do meio de cultura, mais concretamente, do nível de pH, foram realizados testes rápidos através do uso das fitas de medição de pH e, no caso do acompanhamento do crescimento das microalgas, foram realizados testes aos sólidos totais e à densidade ótica das amostras retiradas.

#### 5.4.1. Sólidos totais

Para determinação dos sólidos totais, é colocada uma amostra do conteúdo do depósito da cultura de microalgas submetida a secagem numa estufa a 105° C durante 24 horas. Os resíduos obtidos são designados por sólidos, posteriormente secos numa estufa. Resumindo, este ensaio denomina-se de ensaio sólidos totais secos, sendo estes medidos em mg/L <sup>[59]</sup>.

No caso em estudo, ou seja, no processo de cultura de microalgas no fotobiorreator anteriormente descrito, a realização dos ensaios de sólidos totais foram executados através do seguinte procedimento:

- Colocação de dois cadinhos na mufla durante uma hora, a uma temperatura de 550° C de forma a aferi-los;
- Após uma hora, retiraram-se os cadinhos da mufla, sendo estes colocados no exsiccador para arrefecerem;
- Entretanto, retirou-se uma amostra do meio de cultivo para um recipiente através da torneira de amostras existente no depósito do fotobiorreator, mantendo-a em constante agitação;
- Após ter terminado o arrefecimento dos cadinhos, estes foram pesados e identificados;
- Medição de 50 ml da amostra retirada anteriormente e colocação desta no cadinho;

- Colocação na estufa do cadinho com a amostra nele inserida, a uma temperatura de cerca de 103 ° C por um período de 12 a 24 h;
- pesagem do cadinho após o fim do processo de evaporação executado na estufa;
- O cadinho voltou ao exsiccador até arrefecer;
- Pesagem do cadinho já seco, sendo este resultado denominado de peso seco.

A forma matemática de tratar os resultados das duas pesagens realizadas no processo dos sólidos totais é descrita na seguinte fórmula:

$$\text{massa dos sólidos totais (mg)/L} = \frac{(X-Y) \times 1000}{\text{volume da amostra, mL}} \quad (2)$$

X – peso do cadinho com os resíduos, após a ida à estufa (mg);

Y – peso do cadinho após a ida à mufla (mg).

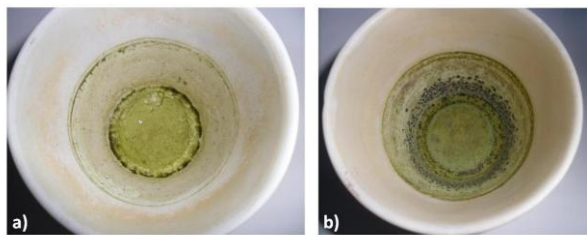


Ilustração 92 e 93- Sólidos totais [26].

O método de análise dos sólidos totais tem como objetivo quantificar a presença das microalgas no meio de cultivo. Esta percepção é importante já que o meio de cultivo consiste, basicamente, só por água e microalgas. Sendo assim, após a evaporação da água, consegue-se quantificar a quantidade de microalgas presentes no meio de cultivo, podendo assim acompanhar o crescimento de qualquer cultura repetindo este processo por uma série de amostragens. Fato importante neste processo, é a sua incerteza associada. Apenas é possível apresentar este ensaio como uma estimativa do potencial crescimento das microalgas, visto que, é realizada uma quantificação da totalidade dos sólidos presentes nas amostras que, podem ser células vivas, células mortas ou até outros compostos externos, como por exemplo, poeiras.

#### 5.4.2. Medição do nível de pH

Como já foi referido, é necessário o controlo periódico do nível de pH da cultura. No caso em estudo, este controlo foi realizado através de fitas para pH, sendo este realizado aleatoriamente nas amostras retiradas. O valor de pH verificado não variou de forma considerável visto que a cultura possuía uma constante passagem de CO<sub>2</sub>.

#### 5.4.3. Densidade ótica

A forma mais correta de avaliar a presença de microalgas na cultura é o método da densidade ótica onde é medida a sua turbidez, tornando possível estimar a concentração de células viáveis. Esta estimativa é feita através da análise da absorvância que as células presentes na amostra executam da luz e da sua transmitância ( passagem de luz pela amostra). Quanto maior for a presença de células na cultura, maior será a absorvância e menor será a transmitância.

Para analisar a densidade ótica da amostra, utiliza-se o espectrofotômetro (modelo: JASCO V 530) em períodos de tempo controlados. Esta análise depende de quatro variáveis: concentração de células na suspensão e os seu tamanhos, do comprimento de onda utilizado pelo espectrofotômetro ,da intensidade da luz incidente e do diâmetro do tubo onde se encontra a suspensão celular.

Geralmente, utilizam-se comprimentos de onda a rondar o intervalo entre os 400 nm e os 700 nm para que, desta forma, se evite que os pigmentos fotossintéticos interfiram nas medições <sup>[23]</sup>. Com estes comprimentos de onda é possível apenas avaliar a obstrução que as células presentes na amostra colocam à passagem de luz através dela. Para o caso da espécie em estudo, de acordo com a bibliografia analisada, o comprimento de onda ótimo para a determinação da densidade ótica é de 550 nm.

Os testes anteriormente explicados, foram realizados com a finalidade de acompanhar o crescimento das microalgas presentes no fotobiorreator. De uma forma mais analítica, a informação retirada destes testes ajudaram a criar curvas de crescimento associadas a cada cultura ao longo do tempo. A grande vantagem destas curvas, é a possível comparação com as curvas de crescimento de microrganismos já estudadas. Essas curvas estão muito estudadas e testadas, sendo ela dividida em quatro fases, como se pode verificar na figura seguinte.

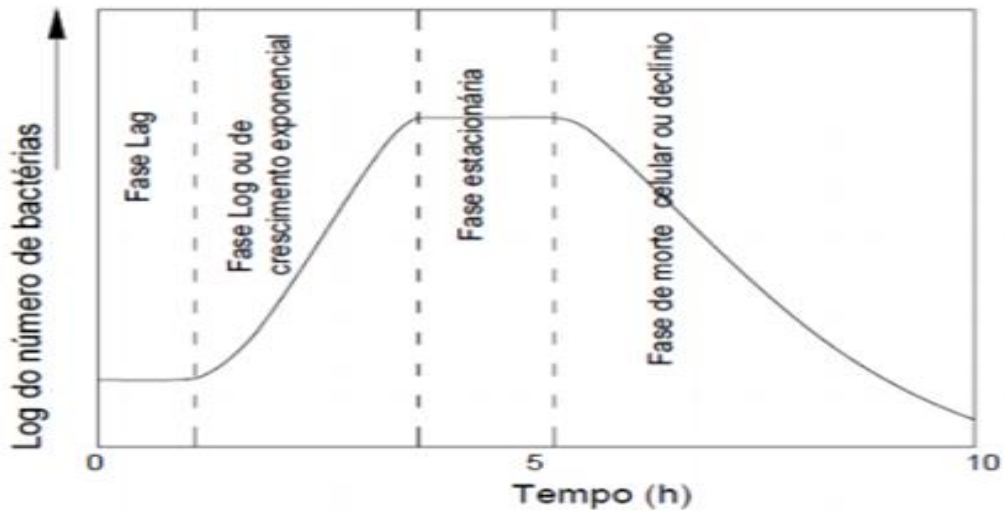


Ilustração 94- Curva de crescimento de microrganismos e suas etapas

Sendo este fotobiorreator de funcionamento contínuo, o esperado era encontrar curvas de crescimento associadas às duas culturas efetuadas que se assemelha-se a da figura anterior, apenas excetuando a fase de morte celular. Com o consumo de substrato (meio de cultura) ao longo do tempo de operação, promove-se uma fase estacionária. A fase de crescimento exponencial só poder-se-ia manter, caso fosse adicionado meio de cultura com mais assiduidade. No entanto, esta situação aumentaria exponencialmente os custos de operação que, do ponto de vista técnico e económico não é desejável.





## Capítulo VI. Demonstração e análise de resultados

Neste capítulo são analisados e tratados todos os resultados referentes aos ensaios de sólidos totais e de densidade ótica realizados às amostras retiradas ao longo das duas culturas.

### 6.1. Resultados e considerações do 1º ensaio

No início da primeira cultura foram adicionados 3 litros de biomassa associados a 50 litros de meio de cultivo com a composição anteriormente descrita. Esta cultura teve a duração de 36 dias, tendo sido realizadas amostragens da cultura para as respectivas determinações analíticas.



Ilustração 95- Amostras do primeiro ensaio.

Nesta fase, estavam instalados os equipamentos descritos no capítulo de projeto com o pormenor de existir uma tubagem associada a duas bombas de forma a promover a circulação do meio.

#### 6.1.1. Resultados do ensaio de sólidos totais

Tabela 38- Resultados do ensaio de sólidos totais do 1º ensaio.

Amostra	Volume	Data da recolha	Peso cadinho	Amostra + cadinho	Amostra + cadinho seco	Resultado (mg/l)	g/l
T0	50	26-Abr	55,110	105,140	55,140	600,000	0,583
T1	30	02-Mai	56,220	86,180	56,238	596,667	0,597
T2	30	04-Mai	32,610	62,540	32,631	693,333	0,693
T5	30	14-Mai	35,570	62,263	35,592	740,000	0,740
T8	50	24-Mai	68,392	117,789	68,435	866,000	0,866
T9	30	28-Mai	32,033	61,490	32,059	896,667	0,897
T10	30	31-Mai	35,566	68,887	35,594	926,667	0,927

Usando os resultados do ensaio dos sólidos totais realizados às amostras retiradas da primeira cultura de microalgas, foi possível descrever o crescimento da cultura na seguinte curva:

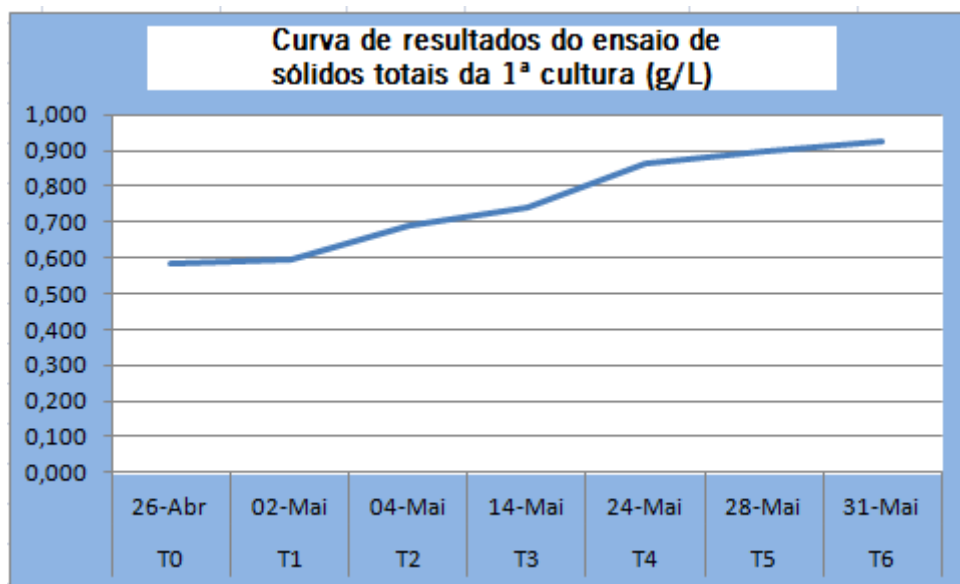


Ilustração 96- Curva de resultados do ensaio de sólidos totais da 1ª cultura.

A análise da curva de crescimento da primeira cultura revela uma taxa de crescimento algo baixa, sendo perceptível que as microalgas no período de tempo de cultivo não conseguiram sequer efetuar a sua multiplicação a 100%.

Tabela 39- Análise dos resultados dos ensaios de sólidos totais da 1ª cultura.

<b>Tempo de Cultura</b>	36 dias
<b>Percentagem de crescimento</b>	59,80%
<b>Crescimento diário</b>	1,66%

No caso da primeira cultura, podemos verificar uma certa aproximação da sua curva de crescimento com a curva teórica do crescimento de microrganismos. É possível verificar a existência da fase "Lag", ou seja, fase de habituação ao meio de cultura entre o período das amostras T0 e T1. Desde a amostra T1 até à amostra T4, verifica-se que a cultura entrou na fase "Log", onde revela a maior taxa de crescimento. Por fim, no período entre as amostras T4 e T6, a cultura entra na fase estacionária onde a sua taxa de crescimento tende a estabilizar num valor fixo.

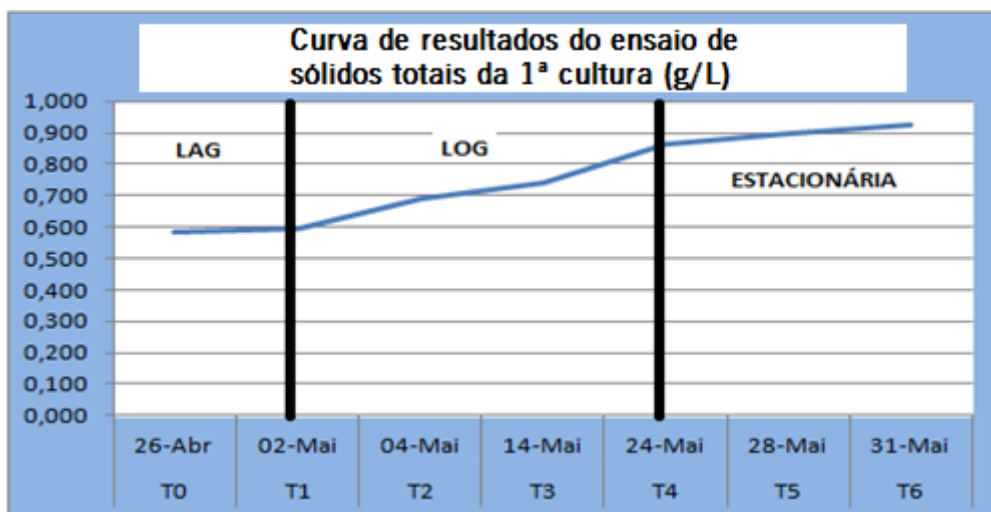


Ilustração 97- Separação por fases da curva de resultados do ensaio de sólidos totais da primeira cultura.

### 6.1.2. Resultados do ensaio de D.O. do 1º ensaio

Seria espectável que os resultados do ensaio de D.O. fosse relativamente inferiores aos do ensaio de sólidos totais secos, visto que apenas quantifica a quantidade de células vivas de microalgas. Apesar dos problemas de agitação do meio já referidos, os valores encontrados são satisfatórios, já que, existe uma similaridade entre curvas de concentração dos dois métodos de análise executados. Este fato pode ser explicado pelas fases de crescimento obtidas no primeiro ensaio. Neste ensaio, a taxa de crescimento, embora baixa, teve um crescimento contínuo, ou seja, não se verificou a fase de senescência (morte celular).

Tabela 40- Resultados do ensaio de D.O. da 1ª cultura

Amostra	Data do ensaio	Concentração (g/L)
T0	26-04-2012	0,1180
T1	02-05-2012	0,1669
T2	14-05-2012	0,5402
T3	15-05-2012	0,6371
T4	17-05-2012	0,8421

Usando os resultados do ensaio de D.O. realizados às amostras retiradas da primeira cultura de microalgas, foi possível descrever o crescimento da cultura na seguinte curva:



Ilustração 98- Curva de resultados do ensaio de D.O. da 1ª cultura

Como se verificou na curva de crescimento das microalgas realizada através dos resultados do ensaio de sólidos totais secos, também no caso do ensaio de D.O. é perceptível a existência das três fases de crescimento anteriormente explicadas. No entanto, os valores correspondentes a estas duas curvas não são coincidentes.

## 6.2. Problemas encontrados e respetivas soluções

No final da primeira cultura, observaram-se problemas no sistema de agitação. O progressivo crescimento das microalgas presentes no depósito provocaram o constante entupimento das tubagens, tornando a agitação cada vez menos eficiente. Este problema originou dificuldades em retirar amostras com resultados fiáveis, com resultados irrealistas. Como a agitação não era uniforme, os resultados das amostras originavam valores de presença de microalgas menores que outros retirados em datas anteriores. Desta forma, deu-se a necessidade de retirar a tubagem completa, acrescentando mais uma bomba, sendo as três bombas colocadas estrategicamente no fundo do depósito de forma a provocar um efeito de vórtice no meio de cultivo.

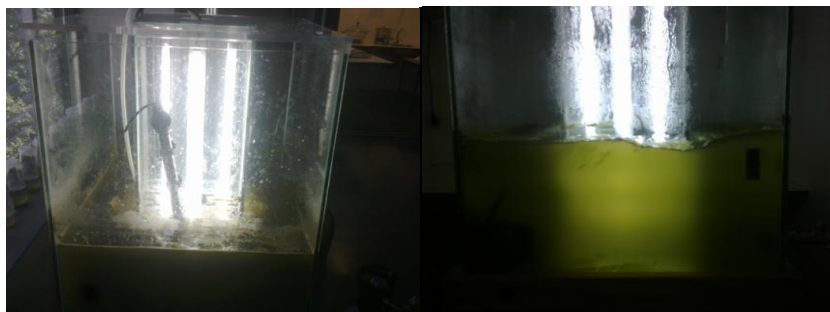


Ilustração 99 e 100- Fotobiorreator em funcionamento com a agitação deficiente; Fotobiorreator em funcionamento com alterações na agitação.

Devido à deficiente agitação, observou-se alguma deposição de biomassa no fundo do depósito sendo este problema também resolvido com o novo sistema de agitação.



Ilustração 101 e 102- Fundo do depósito com acumulação de biomassa; Fundo do depósito com marcas de arrastamento da biomassa do fundo do depósito.

Outro problema encontrado no decorrer do primeiro ensaio, foi o fato de se verificar alguma condensação do meio nas paredes do depósito. Para este caso foram criados orifícios na tampa superior do depósito que serviriam para escoar o oxigênio produzido na fotossíntese das microalgas. Por este processo foi possível manter essa tampa colocada no topo do depósito. Os orifícios foram também utilizados para passar a mangueira de injeção de CO<sub>2</sub> e a cablagem da resistência de aquecimento.

### 6.3. Resultados e considerações do 2º ensaio

No caso do segundo ensaio, procedeu-se a uma alteração do sistema de agitação. Esta alteração deveu-se ao aumento de ocorrências de entupimento da tubagem à medida que as microalgas se multiplicavam. Foi acrescentada mais uma bomba mas, foi retirada toda a tubagem, sendo as três bombas colocadas estrategicamente no fundo do depósito de forma a provocar um efeito de vórtice no meio de cultivo. Nesta caso, foram colocados 2 litros de biomassa com 40 litros de meio de cultivo, de forma a rejuvenescer a cultura e limitar o aparecimento de organismos patogénicos e concorrentes. A cultura decorreu normalmente durante 26 dias. Como na primeira cultura, também neste caso foram retiradas amostras do meio e realizados os respetivos ensaios.



Ilustração 103- Amostras da segunda cultura.

### 6.3.1. Resultados do ensaio de sólidos totais secos do 2º ensaio

Após analisadas as amostras da segunda cultura, chegou-se aos seguintes resultados:

Tabela 41- Resultados do ensaio de sólidos totais do 2º ensaio.

Amostra	Volume	Data da recolha	Peso cadinho	Amostra + cadinho	Amostra + cadinho seco	Resultado (mg/l)	g/l
T0	50	05-Jul	87,262	137,450	87,280	360,000	0,360
T1	40	13-Jul	85,140	124,900	85,160	500,000	0,500
T2	30	16-Jul	35,560	65,440	35,580	666,667	0,667
T3	30	17-Jul	32,060	61,750	32,080	666,667	0,667
T4	30	22-Jul	35,739	65,543	35,760	703,333	0,703
T5	50	24-Jul	68,392	117,789	68,435	866,000	0,866
T6	30	31-Jul	35,566	68,887	35,594	926,667	0,927

Através do método de ensaio dos sólidos totais anteriormente explicado, atingiram-se os resultados descritos na tabela anterior que revelam o progresso do crescimento das microalgas no fotobiorreator em estudo. Através dos valores explanados na tabela anterior, foi executada uma curva de resultados.

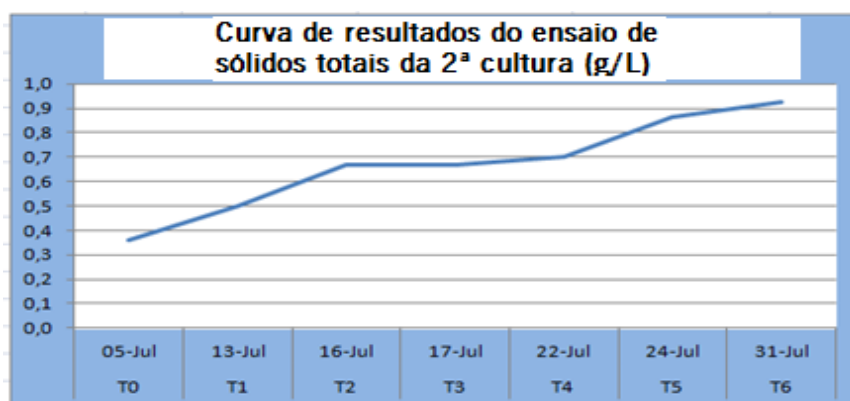


Ilustração 104- Curva de resultados do ensaio de sólidos totais do 2º ensaio.

Após a observação dos resultados da segunda cultura é possível verificar que houve uma grande aumento da taxa de crescimento das microalgas em comparação com os resultados da primeira cultura. Desta forma podemos concluir que as modificações implementadas na segunda cultura tiveram um

resultado positivo. Este sucesso está demonstrado na tabela seguinte, com as elevadas taxas de crescimento verificado.

Tabela 42- Análise dos resultados dos ensaios de sólidos totais da 2ª cultura.

<b>Tempo de Cultura</b>	<b>26 dias</b>
<b>Percentagem de crescimento</b>	<b>157,50%</b>
<b>Crescimento diário</b>	<b>6,06%</b>

Quanto à aproximação da curva de crescimento da segunda cultura à curva teórica de crescimento de microrganismos, neste caso é possível fazê-lo. A inexistência da fase " Lag " na curva de crescimento da segunda cultura poder-se-á justificar com o fato de esta ter arrancado com biomassa restante da primeira cultura logo, a fase de adaptação ao meio de cultivo torna-se desnecessária. Outra etapa que não é possível verificar na curva de crescimento da segunda cultura é a fase estacionária que antecede a morte da cultura. Esta ausência dever-se-á dever ao fato de a cultura ainda não ter abandonado, ao fim dos 26 dias de cultivo, a fase " Log ". Esta fase " Log ", consiste numa fase de crescimento exponencial das microalgas, algo que se verifica na totalidade da segunda cultura.

### 6.3.2. Resultados do ensaio de D.O. do 2º ensaio

Nesta segunda cultura, também se verifica uma proximidade dos resultados do ensaio D.O. com os resultados do ensaio de sólidos totais secos. Também ficou comprovada a maior taxa de crescimento da segunda cultura em comparação com a primeira.

Tabela 43- Resultados do ensaio de D.O. da 2ª cultura

<b>Amostra</b>	<b>Data do ensaio</b>	<b>Concentração (g/L)</b>
T0	05-06-2012	0,0991
T1	13-07-2012	0,1090
T2	25-07-2012	0,3802
T3	01-08-2012	0,5803
T4	05-08-2012	0,8499

Usando os resultados do ensaio de D.O. realizados às amostras retiradas da segunda cultura de microalgas, foi possível descrever o crescimento da cultura na seguinte curva:



Ilustração 105- Curva de resultados do ensaio de D.O. da 2ª cultura

Como também é possível verificar no ensaio de sólidos totais secos da segunda cultura, o ensaio de D.O. realizado à segunda cultura revela a existência apenas da fase de crescimento exponencial "Log" devido aos fatos explicados no subcapítulo 6.3.1.

#### 6.4. Comparação entre culturas

Visto que foram realizadas dos ensaios, em que na segunda foram executadas alterações de forma a resolver os problemas detetadas na primeira, é cientificamente proveitoso executar uma comparação entre elas. A forma encontrada de comparar as duas culturas foi a elaboração de um gráfico comparativo entre as duas curvas de crescimento, a comparação entre a percentagem total de crescimento da biomassa e do seu crescimento diário, sendo esta última representada graficamente.



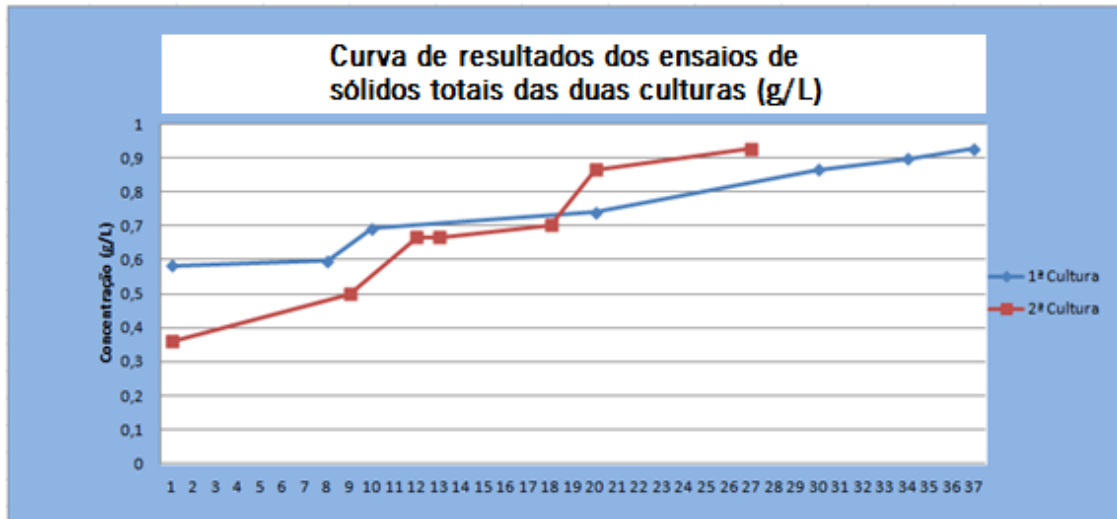


Ilustração 106- Curvas de resultados do ensaio de sólidos totais das duas culturas executadas.

Através da análise das curvas de crescimento das duas culturas realizadas, é possível perceber que as duas atingiram a mesma concentração de biomassa por litro de meio de cultivo mas, a segunda cultura atingiu esse valor em menos 10 dias de cultivo e tendo esta se iniciado com uma quantidade de biomassa menor. Desta forma constata-se que o segundo ensaio foi mais proveitoso em questões de produção e de tempo. Uma boa forma de entender esta diferença de produções é verificar as totalidades de produção final de cada cultura e o seu respetivo crescimento percentual diário.

Tabela 44- Comparação do crescimento total e diário das duas culturas realizadas.

	1ª Cultura	2ª Cultura
<b>Crescimento total (%)</b>	59,80	157,50
<b>Crescimento diário (%)</b>	1,66	6,06

A nível do crescimento total no final de cada cultura, a diferença de percentagens de crescimento é significativa. Em quanto que a primeira cultura teve um crescimento de 59,8% em relação à biomassa inicial, a segunda cultura atingiu o valor de 157,50%, sendo este valor cerca do triplo do valor da primeira cultura. Esta diferença de crescimento fica mais evidente quando analisado o crescimento diário das duas culturas. Aqui, a diferença entre as culturas atinge a razão de cerca de 5 para 1. A segunda cultura aumentou a sua cultura em 6,06% a cada dia, ao passo que a primeira cultura apenas se multiplicou em 1,66%. Estes valores de crescimento diário não passam de valores calculados baseados nos dados dos ensaios de sólidos totais que, entre amostragens retirados se apresentam

graficamente como retas. Obviamente que entre amostras existem variações de crescimento que não são lineares, por isso, tornou-se necessário analisar o crescimento percentual entre amostras.

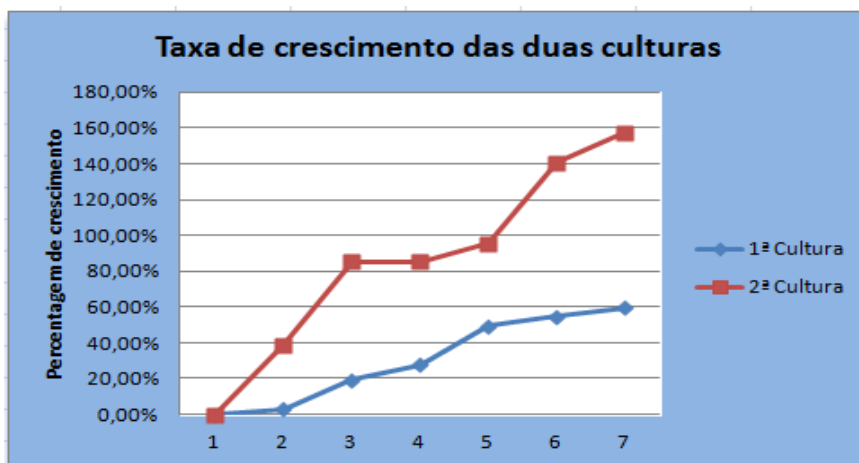


Ilustração 107- Gráfico comparativo da percentagem de crescimento das duas culturas elaboradas.

Os valores finais das duas culturas demonstram que as soluções encontradas para os problemas encontrados no final da primeira cultura obtiveram resultados satisfatórios. Desta forma, pode-se afirmar que o sistema de agitação das algas é um fator muito importante na eficiência do processo, assim como a remoção do oxigênio nem que seja de forma natural.



Ilustração 108- Comparação de resultados do ensaio de D.O. das duas culturas

Após analisada a ilustração anterior onde, são comparadas as curvas de resultados do ensaio de D.O. das duas culturas, retiram-se as mesmas conclusões da análise da comparação das curvas de resultados do ensaio de sólidos totais. Neste caso, devido ao fato de as amostras terem formado aglomerados de algas dificultou a correta análise de densidade ótica.

## 6.5. Recolha das microalgas (Colheita)

Esta etapa efetuou-se após o termino dos processo de crescimento dos dois ensaios realizados de cultura de microalgas. Quando se verificou que existia uma quantidade considerável de microalgas por litro de meio de cultura, efetuou-se a recolha e processamento da biomassa algal. Além de retirar a biomassa algal do depósito de cultivo também se remove a água presente nessa biomassa.

Existem variados processos de recolha de biomassa já referidos e explicados no capítulo anterior, mas, no caso em estudo, escolheu-se a floculação das culturas como método de recolha. Foram realizados testes com três compostos: Cloreto de Alumínio ( $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )<sup>1</sup>, Cloreto de Ferro ( $\text{FeCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )<sup>2</sup> e Sulfato de Alumínio ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ )<sup>3</sup>. Após efetuados os testes, realizou-se então a recolha, maioritariamente com o composto de cloreto de alumínio.

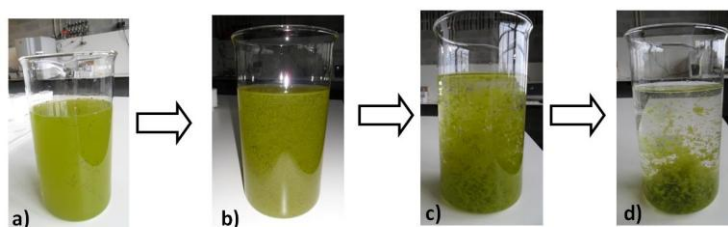


Ilustração 109- Processo de floculação: a) Biomassa sem floculante [26]; b) introdução do floculante [26]; c) atuação do floculante (4min depois) [26]; d) atuação do floculante - final [26].

Posteriormente, centrifugou-se a biomassa algal recolhida a 5000 rpm por um período de 10 minutos.



Ilustração 110 e 111- Amostras da biomassa recolhida.

Tabela 45- Comparação das duas cultura a nível da quantidade de biomassa extraída e respetivo lucro.

	Concentração inicial	Concentração Final	Volume da cultura	Duração de cultivo	Biomassa extraída	Profit
1ª Cultura	0,583 g/L	0,927 g/L	53 L	36 dias	49,131 g	18,232 g
2ª Cultura	0,360 g/L	0,927 g/L	42 L	26 dias	38,934 g	23,814 g

Apesar de a concentração no final das duas culturas ter um valor idêntico, a quantidade de biomassa retirada de cada uma das culturas é diferente. Esta diferença deve-se à quantidade de biomassa colocada no início de cada cultura, à taxa de crescimento de cada uma e o volume do meio de cultivo. A primeira cultura iniciou-se com cerca de 0,583 g/L de biomassa, enquanto que a segunda cultura apenas se iniciou com 0,360 g/L. A biomassa extraída na primeira e segunda cultura respetivamente foi de 49,131 g e 38,934 g. O verdadeiro resultado de biomassa produzida nas culturas em questão, apenas é visível aquando da subtração ao valor de biomassa extraída da biomassa colocada inicialmente. Basicamente, apenas se verifica o lucro aquando do uso da equação seguinte:

$$\text{Biomassa gerada} = \text{Biomassa total extraída} - \text{Biomassa inicialmente colocada} \quad (2)$$

Como em todos os fatores de comparação já utilizados, este também se revela abonatório da segunda cultura. A segunda cultura atinge as 23,814 g de biomassa gerado, enquanto que a primeira cultura apenas atinge 18,232 g.

Tabela 46- Litragem de biodiesel hipoteticamente retirada

	Concentração Final	Biomassa extraída	Lucro	Biodiesel gerado ( $\eta = 0,92$ )	Biodiesel gerado (Lucro)
1ª Cultura	0,927 g/L	49,131 g	18,232 g	0,051 litros	0,019 litros
2ª Cultura	0,927 g/L	38,934 g	23,814 g	0,041 litros	0,025 litros

## 6.6. Avaliação técnica e económica do projeto

Para a análise económica deste projeto, foram identificados os preços, as potências e as características de cada componente que constitui o fotobioreactor, sendo que os aqui mencionados se pressupõe que não estão representados pressupõem-se que poderão ser feitos sem custos acrescidos.

Tabela 47- Cálculo dos custos dos equipamentos do fotobiorreator

Componente	Quantidade	Preço Unitário	Custo
Carrinho de suporte	1	80,00 €	80,00 €
Depósito em vidro	1	120,00 €	120,00 €
Silicone	1	7,50 €	7,50 €
Resistência	1	19,90 €	19,90 €
Bombas	2	49,90 €	99,80 €
Torneira	1	2,50 €	2,50 €
Vedantes	2	0,05 €	0,10 €
Extensão elétrica	1	9,90 €	9,90 €
Lâmpadas	4	1,50 €	6,00 €
Armações das lâmpadas	4	3,50 €	14,00 €
Veio central	1	12,00 €	12,00 €
Botija de CO2	1	Oferecida	0,00 €
<b>TOTAL</b>			<b>371,70 €</b>

Pela análise dos componentes do fotobiorreator construído, a sua quantidade e multiplicação pelo seu preço unitário foi possível perceber a totalidade do custo de construção do equipamento. Após esta fase, segue-se a percepção dos custos de funcionamento e operacionalidade do fotobiorreator. O resultado final dos custos obteve-se através de uma simples adição dos custos do equipamento com os custos operacionais.

Tabela 48- Análise dos custos operacionais dos equipamentos do fotobiorreator.

Componente	Quantidade	Potência (kW)	Custo kW/h (€)	Horas de funcionamento	Custo operacional (€)
Resistência	1	0,15	0,1393	1	0,020895
Lâmpadas	4	0,014	0,1393	12	0,0936096
Bombas	2	0,05	0,1393	24	0,33432
<b>Custo total diário (€)</b>					<b>0,45 €</b>
<b>Custo total Mensal (€)</b>					<b>13,46 €</b>

Para calcular a amortização do investimento, escolhemos como modelo a segunda cultura devido aos seus melhores resultados obtidos. desta forma, um ciclo de crescimento duraria 26 dias.

Tabela 49- Cálculo da produção mensal ( em L e € ) do fotobiorreator.

<b>Nº ciclos mês</b>	0.87
<b>Nº Litros por ciclo</b>	0.025
<b>Produtividade Mensal (L)</b>	0.022
<b>Preço Biodiesel (€)</b>	1,269
<b>Produtividade Mensal (€)</b>	0.03
<b>Produtividade-Custo Elet. (€)</b>	- 13,43

0.87
X
0.025
=
0.022
X
1.269
=
0.03
-
13.46
=
-13.43

Usando os valores finais da produção de biodiesel através da segunda cultura, calculou-se o número de ciclos de produção ao longo de um mês, tendo este um resultado de 0,87. Esta produção reflete-se em 0,025 litros de biodiesel produzido por ciclo que, ao ser analisado de forma mensal, atinge os 0,022 litros de biodiesel. Usando o valor de 1,269 € como valor de mercado de venda do biodiesel, obteve-se uma produtividade mensal de 0,03€ que, ao se subtrair o custo operacional do equipamento, resulta um prejuízo mensal de 13,43 €. Este cálculo confirma que a produção de biodiesel através de microalgas cultivadas no fotobiorreator projetado não é viável. desta forma, torna-se impossível o cálculo do tempo de amortização do equipamento.

Verificou-se que a alteração no sistema de agitação promoveu um significativo aumento da taxa de crescimento das microalgas, ficando como trabalho futuro a realização de ensaios com a alteração de outros parâmetros como a temperatura, a quantidade de dióxido de carbono injetado e com a remoção eficaz do oxigênio.

## 6.7. Comparação de resultados de taxas de crescimento entre o fotobiorreator piloto em estudo e instalações reais em funcionamento

Na empresa *Energy Derived*, sediada no estado do Arizona, Estados Unidos, efetua-se a produção de biodiesel através de microalgas. São utilizadas fotobiorreatores verticais de grandes dimensões, tendo estes a capacidade de produzir cerca de 18 toneladas de biomassa por ano. Com esta biomassa gerada, consegue-se produzir cerca de 22500 litros de biodiesel por dia. Apesar de a produção diária parecer elevada, não são conhecidos dados sobre as despesas de instalação e operacionalidade destes equipamentos, permanecendo assim a dúvida sobre a sua rentabilidade.

Após calculados os dados divulgados pela *Energy Derived*, foi possível constatar que os mesmos são falsos. Se são produzidos 18 toneladas de biomassa por ano e as células apresentam no máximo 70% de óleo no seu interior, isto levaria a uma produção de aproximadamente 12600 litros de biodiesel a uma eficiência de produção de 92%.

A escassez de dados sobre produção de biodiesel através de microalgas em fotobiorreatores e a incoerência de certos dados divulgados, tornaram importante este trabalho na ajuda à procura de resultados obtidos em testes reais.





## 7. Capítulo VII. Conclusões e trabalhos futuros

Este trabalho consistiu na projeção e construção de um fotobiorreator de forma a cultivar microalgas promovendo o seu crescimento de forma acelerada.

A produção de microalgas em fotobiorreatores ainda é uma técnica em desenvolvimento, havendo já casos de sucesso instaurados nos mercados mundiais.

Existem várias geometrias e formas de funcionamento diferentes para produzir microalgas em que todas elas possuem vantagens e desvantagens mas, onde os fotobiorreatores tubulares se destacam.

Os fotobiorreatores permitem trabalhar com meios de cultivo controlados em vários parâmetros, como sendo a temperatura, nível de pH, iluminação artificial e agitação mecânica.

A utilização de tubagens para homogeneizar a agitação mecânica revelou-se um insucesso, visto que, ao longo do crescimento das microalgas, elas próprias com o seu tamanho entupiam a tubagem e a velocidade de circulação de água decrescia.

Após duas culturas efetuadas, concluiu-se que a agitação das culturas no interior dos depósitos de cultivo é um fator muito importante, já que, após melhoramentos realizados no fotobiorreator de tentativa de correção desse parâmetro, os resultados de crescimento algal foram mais satisfatórios. Fica por perceber o efeito da variação da temperatura do meio de cultivo, o nível de pH e a intensidade da luz na sua taxa de crescimento

As taxas de crescimento obtidas pelo método em estudo, principalmente a do segundo ensaio, são significativamente superiores às atingidas em condições naturais.

O crescimento observado nas duas culturas ao ser associado à sua parte económica do projeto, revelou-se como um projeto não viável, sendo que apresenta prejuízos diários.

Os custos associados a este processo revelam-se elevados em relação à produção de biodiesel e sua receita gerada. Desta forma, torna-se importante a redução de custos de operacionalidade e aumento da eficiência do processo.

Visto que o custo da eletricidade representa uma grande fatia do custo operacional, seria benéfico o uso de coletores solares de forma a alimentar os dispositivos alimentados a eletricidade que compõem o fotobiorreator.

De forma a aumentar a eficiência do processo de crescimento das microalgas, é importante uma melhoria no sistema de agitação do meio, como também na injeção de dióxido de carbono nas quantidades corretas e a remoção do oxigênio gerado pela fotossíntese.

Como se verificou um aumento de temperatura do meio de cultivo até níveis superiores ao estipulado na bibliografia existente, ou seja, foram atingidos níveis de temperatura superiores a 30°C. Este acontecimento deveu-se ao fato de o funcionamento das bombas de agitação do meio aquecerem em demasia o meio e, como funcionam em regime contínuo, torna-se impossível o seu arrefecimento. Assim, seria indispensável o uso de tubagens de água fria ou gás de refrigeração, tendo estas o objetivo de arrefecer o meio de cultivo.

## 8. Bibliografia e referências

- [1] Danielo, O. (2005) An algae-based fuel. Biofutur, N°255. Maio
- [2] Bourne Jr, J. K., (2007) Sonhos Verdes. National Geographic Portugal, Vol. 7, N°80, pp.8-31
- [3] Kemp, William. Biodiesel: Basics and Beyond. Canada: Azttext Press, 2006.
- [4] [Biodiesel Basics](#). National Biodiesel Board. Página visitada em 2009-01-30.
- [5] [http://www.collectivebiodiesel.org/presentations/IntroToBiodiesel\\_JohnBush.pdf](http://www.collectivebiodiesel.org/presentations/IntroToBiodiesel_JohnBush.pdf)
- [6] [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162008000100015&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-69162008000100015&script=sci_arttext)
- [7] <http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/642>
- [8] [http://www.ecen.com/eee62/eee62p/balanco\\_de\\_carbono\\_copy\(2\).htm](http://www.ecen.com/eee62/eee62p/balanco_de_carbono_copy(2).htm)
- [9] [http://www.igf.min-financas.pt/inflegal/bd\\_igf/bd\\_legis\\_geral/leg\\_geral\\_docs/dl\\_062\\_2006.htm](http://www.igf.min-financas.pt/inflegal/bd_igf/bd_legis_geral/leg_geral_docs/dl_062_2006.htm)
- [10] Gomes, R. (2006) Manual do Biodiesel. Litexa Editora.
- [11] Knothe, G., Van Gerpen, J. & Krahl, J. (2005) The Biodiesel Handbook, AOCs Press.
- [12] Biodieselbr (2008) Biodiesel no Mundo, [www.biodieselbr.com](http://www.biodieselbr.com)
- [13] [http://www.oceanica.ufri.br/deno/prod\\_academic/relatorios/2011/Felipe%20Trovatto%20e%20Paulo%20Victor/relat1/principal.htm](http://www.oceanica.ufri.br/deno/prod_academic/relatorios/2011/Felipe%20Trovatto%20e%20Paulo%20Victor/relat1/principal.htm)
- [14] Biodieselbr (2008) *Biodiesel no Mundo*.  
<http://www.biodieselbr.com/biodiesel/mundo/biodiesel-no-mundo.htm>, consultado em 2012/09/20
- [15] Knothe, G., Van Gerpen, J. & Krahl, J. (2005) The Biodiesel Handbook, AOCs Press.
- [16] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2010:2020:FIN:pt:PDF>
- [17] <http://www.ipq.pt/backfiles/Combustiveis.pdf>
- [18] Biodieselbr (2008) Biodiesel no Mundo, [www.biodieselbr.com](http://www.biodieselbr.com)
- [19] <http://dre.pt/pdf1sdip/2006/03/057A00/20502053.pdf>
- [20] IEA; International Energy Outlook; 2010

- [21] <http://portuguese.alibaba.com/product-gs/oil-seeds-extruder-for-soybean-and-peanut-499404310.html>
- [22] [http://oau.ena.com.pt/download/DL267-2009\\_GestaoOAU.pdf](http://oau.ena.com.pt/download/DL267-2009_GestaoOAU.pdf)
- [23] [http://www.igaot.pt/wp-content/uploads/2009/05/12\\_IGAOT\\_oleos-usados.pdf](http://www.igaot.pt/wp-content/uploads/2009/05/12_IGAOT_oleos-usados.pdf)
- [24] Marenzi, G. (2010). Material didático da disciplina de Maricultura. UNIVALI, (Material digital). <http://www.renovables-energia.com/2009/05/cultivo-de-microalgas-para-produzir-biocombustibles/>
- [25] **Pereira, Leonel.** Algas, Litoral de Viana do Castelo. *Centro de Monitorização e Interpretação Ambiental de Viana do Castelo*. [Online] 2008. <http://www.cmia-viana-castelo.pt>.
- [26] Castro, Joana (2012) Produção de biodiesel através de várias matérias primas, Universidade do Minho.
- [27] Mata, T.M., Martins, A.A. & Caetano, N. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232.
- [28] Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae, *Biotechnology Advances* 25, pp.294-306.
- [29] Illman, A.M., Scragg, A.H. & Shales, S.W. (2000) Increase in Chlorella strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme and Microbial Technology*. Vol 27 pp. 631-635
- [30] "Cultivation of Chlorella emersonii with flue gas derived from a cement plant." Borkenstein, Clemens G., et al. Austria : s.n., 2011, *J Appl Phycol* , Vol. 23, pp. 131 - 135.
- [31] <http://www.brasil.gov.br/noticias/arquivos/2010/10/29/petrobras-pesquisa-uso-de-algas-no-etanol>
- [32] [http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7352\\_supp/full/474S015a.html](http://www.nature.com/nature/journal/v474/n7352_supp/full/474S015a.html)
- [33] [http://npdeas.blogspot.pt/2011/07/producao-de-biomassa-de-microalgas-em\\_06.html](http://npdeas.blogspot.pt/2011/07/producao-de-biomassa-de-microalgas-em_06.html)
- [34] Borowitzka, M- A..(1999) Commercial production of microalga:ponds, tanks, tubes and fermenters. *Journal of Biotechnology* Vol. 70 pp 313-312.
- [35] Carvalho, A.P., Meireles, L.A, & Malcata F.X (2006), Microalal Reactors: A Review of Enclosed System Desings and Performances, *Biotechnol. Prog.* 2006, 22, p. 1490-1506
- [36] <http://www.was.org/meetings/AbstractData.asp?AbstractId=10854>
- [37] Energy & Enviro Finland (2007) Photo-bioreator to produce biodiesel from alga. <http://www.energy-enviro.fi>

- [38] Li, J., Xu, N. S. & Su, W.W. (2003) Online estimation of stirred-tank microalgal photobioreactor cultures based on dissolved oxygen measurement. *Biochemical Engineering Journal*. Vol. 14 , pp 165-178.
- [39] Fernandez, F. G, Camacho, G. G., Perez, J. A., Sevilla, J.M., & Grima, E.M. (1998) Modeling of biomass productivity in tubular photobioreactors of microalgal cultures: Effects of dilution rate, tube diameter, and solar irradiance. *Biotechnol Bioeng*. Vol 58 pp. 605-616
- [40] [http://www.google.com/imgres?q=centrifuga%C3%A7ao+de+microalgas&hl=pt-PT&biw=1241&bih=556&tbn=isch&tbnid=sennBiZ7j2n\\_M:&imgrefurl=http://projectodaphniaespan12a.blogspot.pt/&docid=uybVYgUghCTuQM&imgurl=http://img214.imageshack.us/img214/4393/preparacaoalimento.blog.jpg&w=407&h=309&ei=xNOOUI3pPJCwhAfW14HACw&zoom=1&iact=rc&dur=732&sig=117675365309701898349&page=2&tbnh=135&tbnw=179&start=18&ndsp=21&ved=1t:429,r:7,s:20,i:150&tx=60&ty=86](http://www.google.com/imgres?q=centrifuga%C3%A7ao+de+microalgas&hl=pt-PT&biw=1241&bih=556&tbn=isch&tbnid=sennBiZ7j2n_M:&imgrefurl=http://projectodaphniaespan12a.blogspot.pt/&docid=uybVYgUghCTuQM&imgurl=http://img214.imageshack.us/img214/4393/preparacaoalimento.blog.jpg&w=407&h=309&ei=xNOOUI3pPJCwhAfW14HACw&zoom=1&iact=rc&dur=732&sig=117675365309701898349&page=2&tbnh=135&tbnw=179&start=18&ndsp=21&ved=1t:429,r:7,s:20,i:150&tx=60&ty=86)
- [41] <http://www.et.byu.edu/~wanderto/homealgaeproject/Harvesting%20Algae.html>
- [42] <http://microalgasprofessoravera.blogspot.pt/2011/10/micrasterias.html>
- [43] Wang, B., Li, Y., Wu, N. & Lan, C. (2008) CO<sub>2</sub> bio-mitigation using microalgae. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 79(5), 707-718.
- [44] <http://www.tnsustentavel.com.br/biodiesel>
- [45] *Progress and recent trends in biodiesel fuels*. **Demirbas, Ayhan**. Sila Science, Trabzon, Turkey : s.n., October 16, 2009, *Energy Conversion and Management*, Vol. 50, pp. 14-34.
- [46] **Berg-Nilsen, J.** (2006) Production of Micro algae based products, Nordic Innovation Centre & Algetech Produkter A.S.
- [47] Algae Investment (2008) Biological utilization of CO<sub>2</sub> via bioreactors, [http://algainvestment.com/biological\\_utilization\\_of\\_co2\\_via\\_bioreactors-htm](http://algainvestment.com/biological_utilization_of_co2_via_bioreactors-htm), consultado em 2012/09/20.
- [48] <http://www.ecoduna.com/tecnologia/?L=1>
- [49] Ogbonna C. James, Yada Hirokazu, Masui Hirokazu, Tanaka Hideo. A Novel Internally Illuminated Stirred Tank Photobioreactor for Large-Scale Cultivation of Photosynthetic Cells. *Journal of Fermentation and Bioengineering*. Vol. 82, N°. 1, 61-67. 1996.
- [50] Plásticos do Sado (2003) Manual técnico - Acrílico CN E EX;

- [51] <http://www.biomania.com.br/bio/conteudo.asp?cod=1251>
- [52] [http://www.ecomarine.com.br/product\\_info.php?products\\_id=33621](http://www.ecomarine.com.br/product_info.php?products_id=33621)
- [53] <http://www.phbio.com.br/fitasdeph>
- [54] <http://elementosqf.blogspot.pt/2007/11/definio-de-ph-representa-grandeza-fsico.html>
- [55] Acetatos de automação programada, Universidade do minho.
- [56] <http://lista.mercadolivre.com.br/clp-delta—controlador-lógico-programável-dvp-sv>
- [57] <http://ccala.butbn.cas.cz/index.php?page=sr&strain=EMERSON/3>
- [58] <http://lista.mercadolivre.com.br/clp-delta—controlador-lógico-programável-dvp-sv>
- [59] AWWA - APHS - “Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater”, 20a. ed., New

## 9. Anexos

Anexo A. - Catálogo de equipamentos;

Anexo A.1. - Bomba hidráulica do sistema de agitação;

Anexo A.2. - Torneira para retirar amostras da cultura;

Anexo A.3. - Resistência de aquecimento do fotobiorreator;

Anexo B. - Desenhos técnicos em 2D dos componentes do fotobiorreator

Anexo B.1. - Caixa de vidro interna;

Anexo B.2. - Carrinho de suporte;

Anexo B.3. - "Cotovelo" do sistema de agitação;

Anexo B.4. - Tubagem perfurada do sistema de agitação;

Anexo B.5. - Roda do carrinho de suporte;

Anexo B.6. - Lateral de vidro do depósito;

Anexo B.7. - Veio central de suporte à iluminação artificial.

### Sobre o Produto:

A bomba multifuncional 1006-B com chafariz da BOYU é uma verdadeira "faz tudo" quando se trata de lagos, fontes e tanques. Proporciona um excelente e bonito chafariz e, ao mesmo tempo, oxigena a água, faz o trabalho de circulação e serve como mini-filtro interno ou mini-filtro complementar para lagos e tanques..

### Características:

- Vazão de **1700 litros/hr**
- Impeller de aço inoxidável super resistente
- Motor selado com Resina para maior durabilidade e redução de ruídos
- Acessórios de chafariz já inclusos
- Pode ser usada como mini-filtro para lagos e tanques
- Altura: 40cm( com chafariz) ou 30cm (sem chafariz)
- Consumo: 50W , disponível em 110v e 220v
- Coluna d'água de 187 cm.
- Garantia de 6 meses direto do fabricante.





## Anexo A.2. - Torneira para retirar amostras da cultura;



### Detalhes do produto

#### Detalhes Rápidos

Língua: [Português](#) [English](#)

Lugar de origem:	China (continente)	Número do Modelo:	JD-2004
Material do punho:	Ferro	Material do corpo:	Bronze
Uso:	Máquina de lavar, Outras	Tipo da instalação:	Fixado na parede
Material do núcleo de válvula:	Bronze	Marca:	D
Número modelo:	JD-2004	Função:	Indução
Uso:	Cozinha		

### Anexo A.3. - Resistência de aquecimento do fotobiorreator;

#### Aquecedores Submergíveis ELITE

O **aquecedor submergível Elite** possui um design atractivo e contemporâneo que se combina adequadamente em qualquer aquário. Possui um marcador de temperatura fácil de ler. O seu design incorpora um tope protector contra golpes ou rupturas.



#### AQUECEDORES ELITE

- Ajuste de temperatura de fácil leitura
- Luz piloto indicadora de ligado/desligado
- Fabricado em vidro resistente aos impactos
- Para usar em aquários de água doce ou salgada

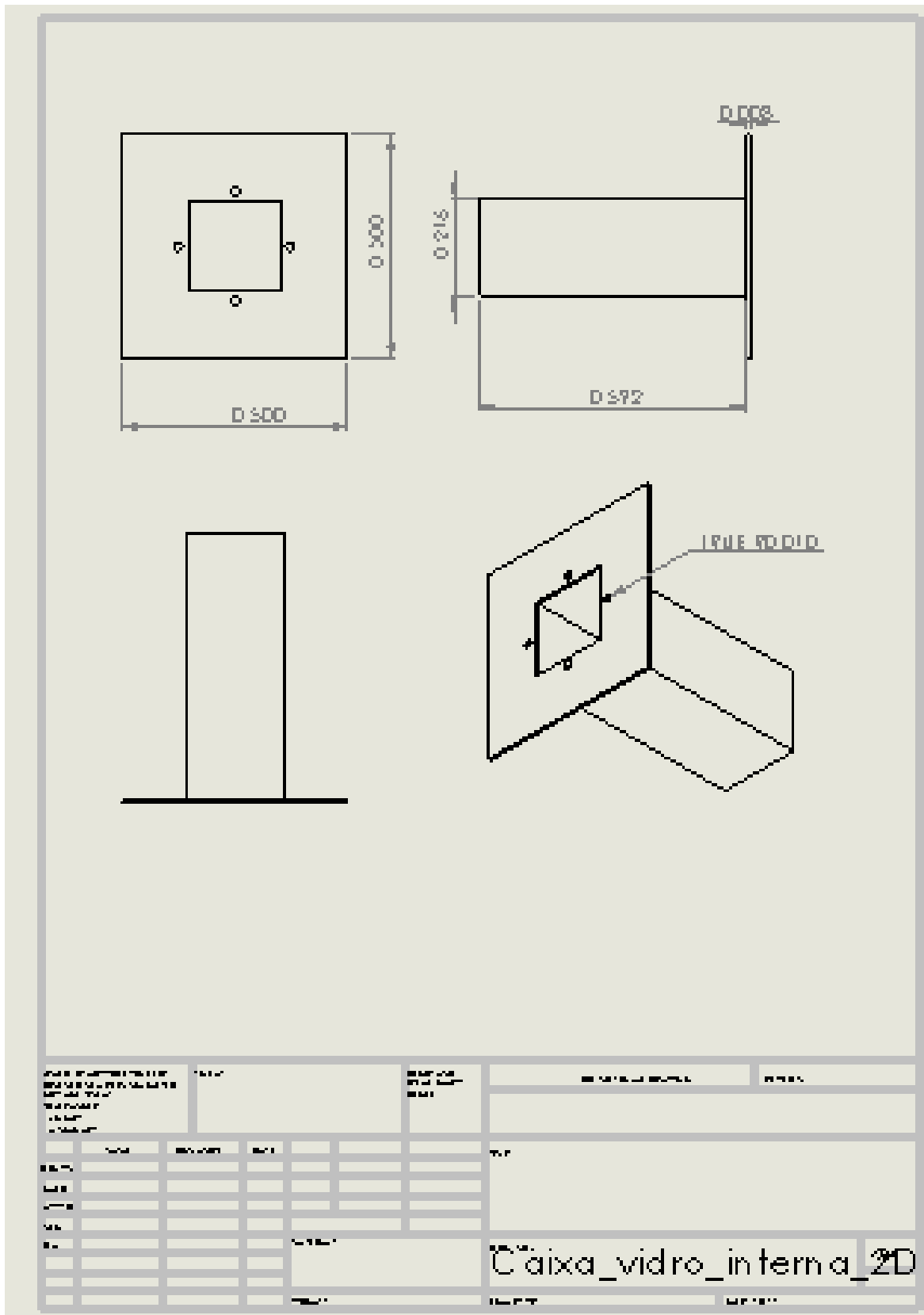


#### Especificações Técnicas

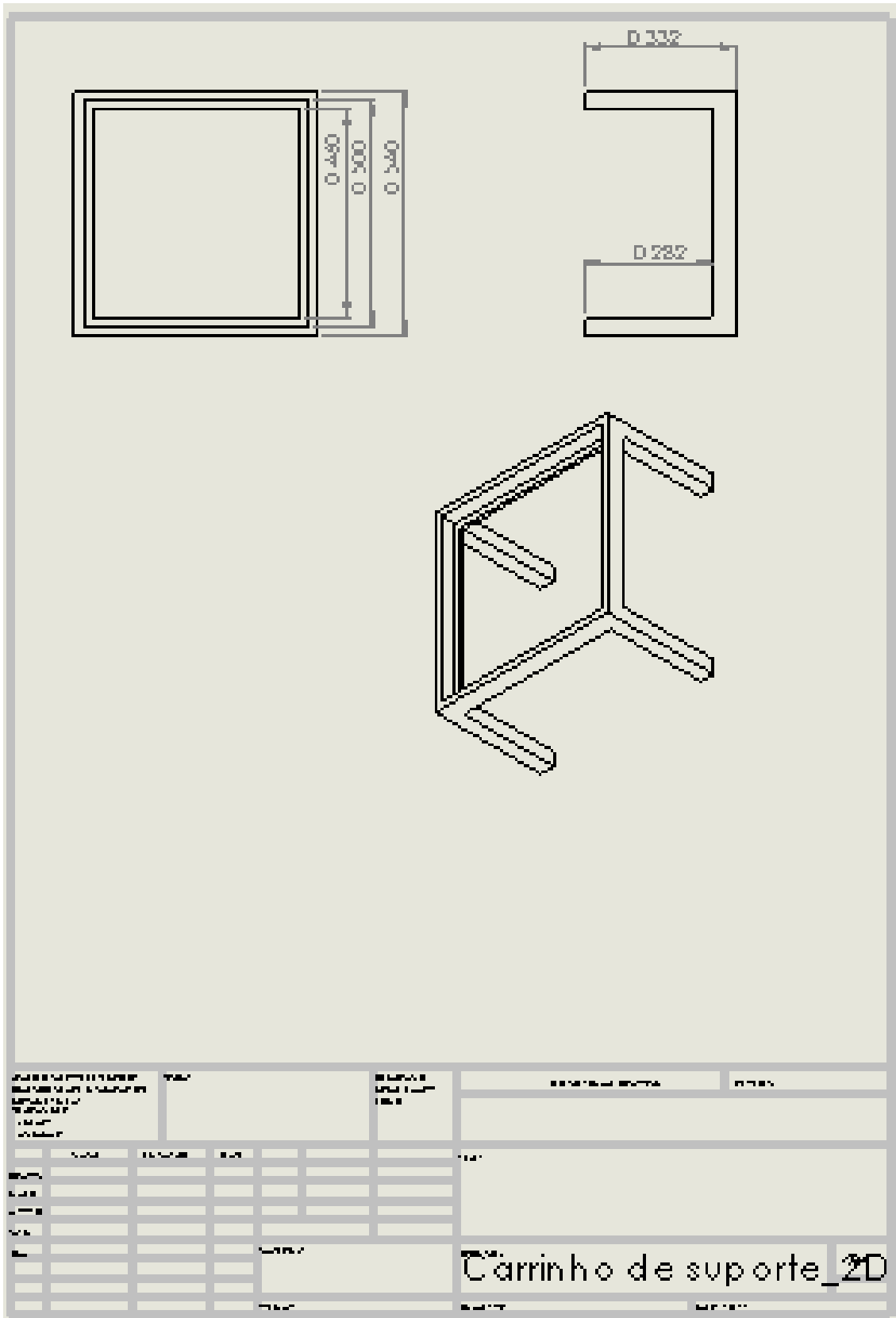
Potência	Volume de Aquário (Até)	Comprimento do Aquecedor
25 W Mini	20 L	15 cm
50 W Mini	38 L	15 cm
50 W	50 L	26 cm
100 W	100 L	26 cm
150 W	150 L	33 cm
200 W	200 L	33 cm
300 W	300 L	36 cm

Produtos **Hagen**, qualidade alemã

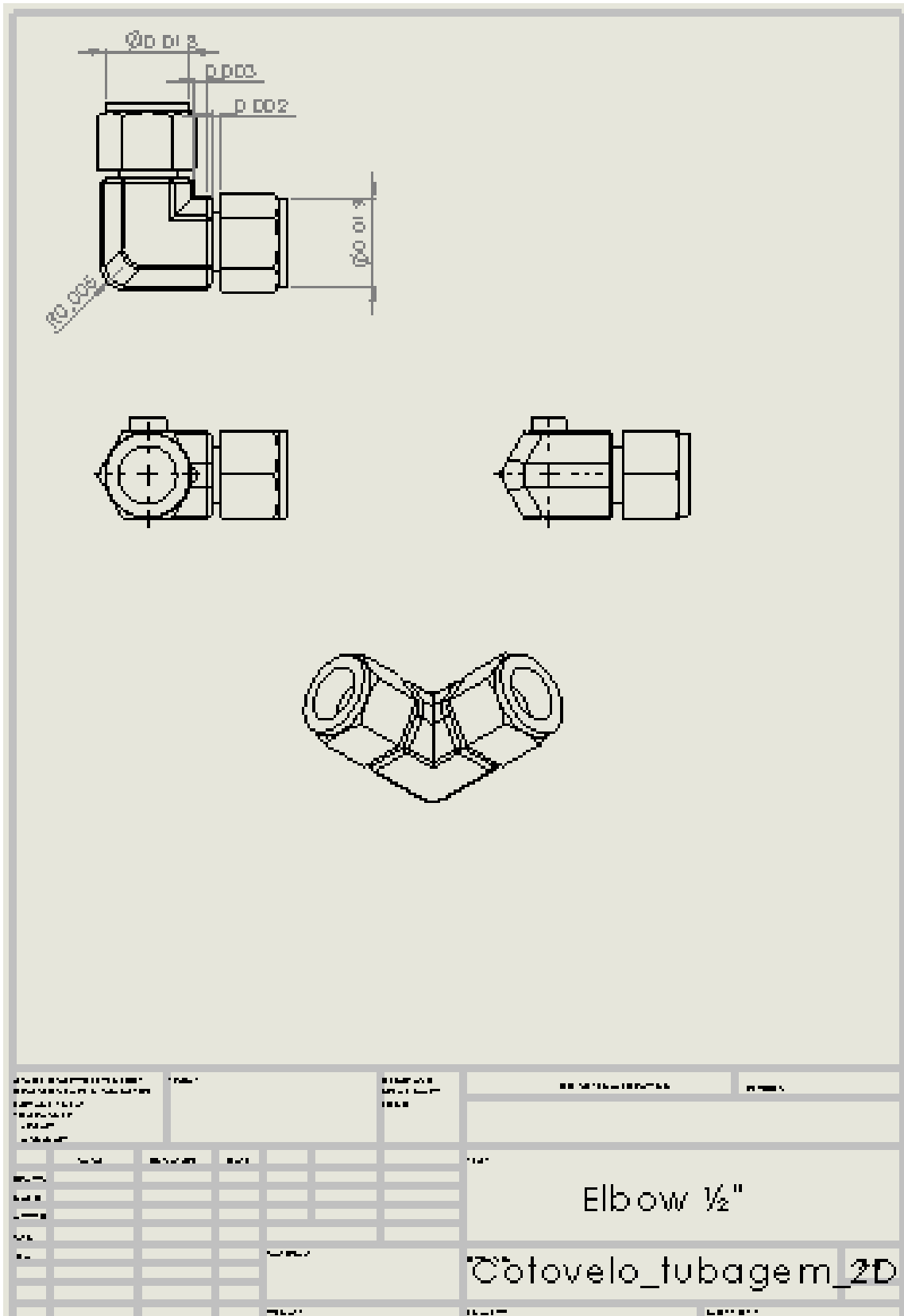
Anexo B.1. - Caixa de vidro interna;



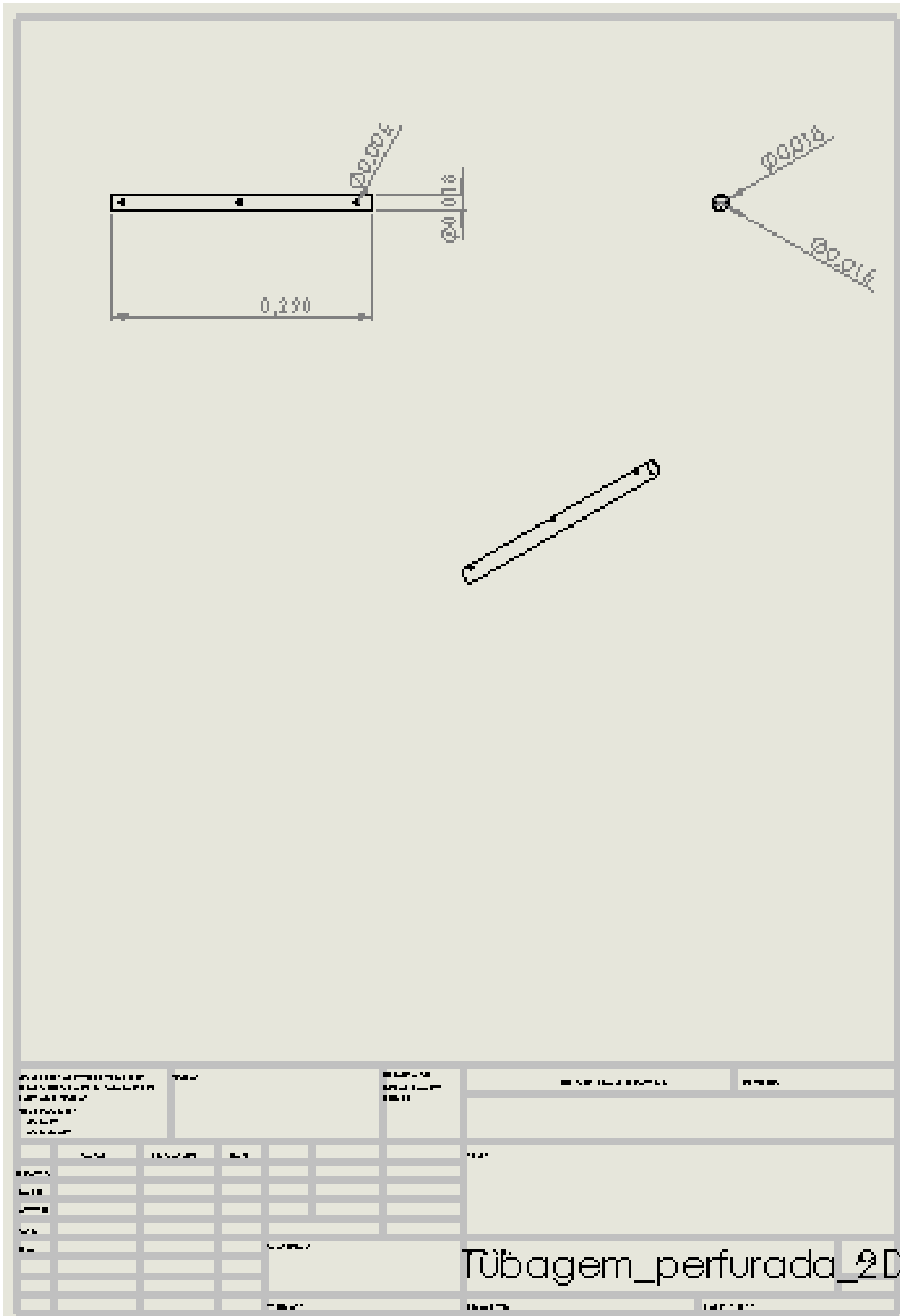
Anexo B.2. - Carrinho de suporte;



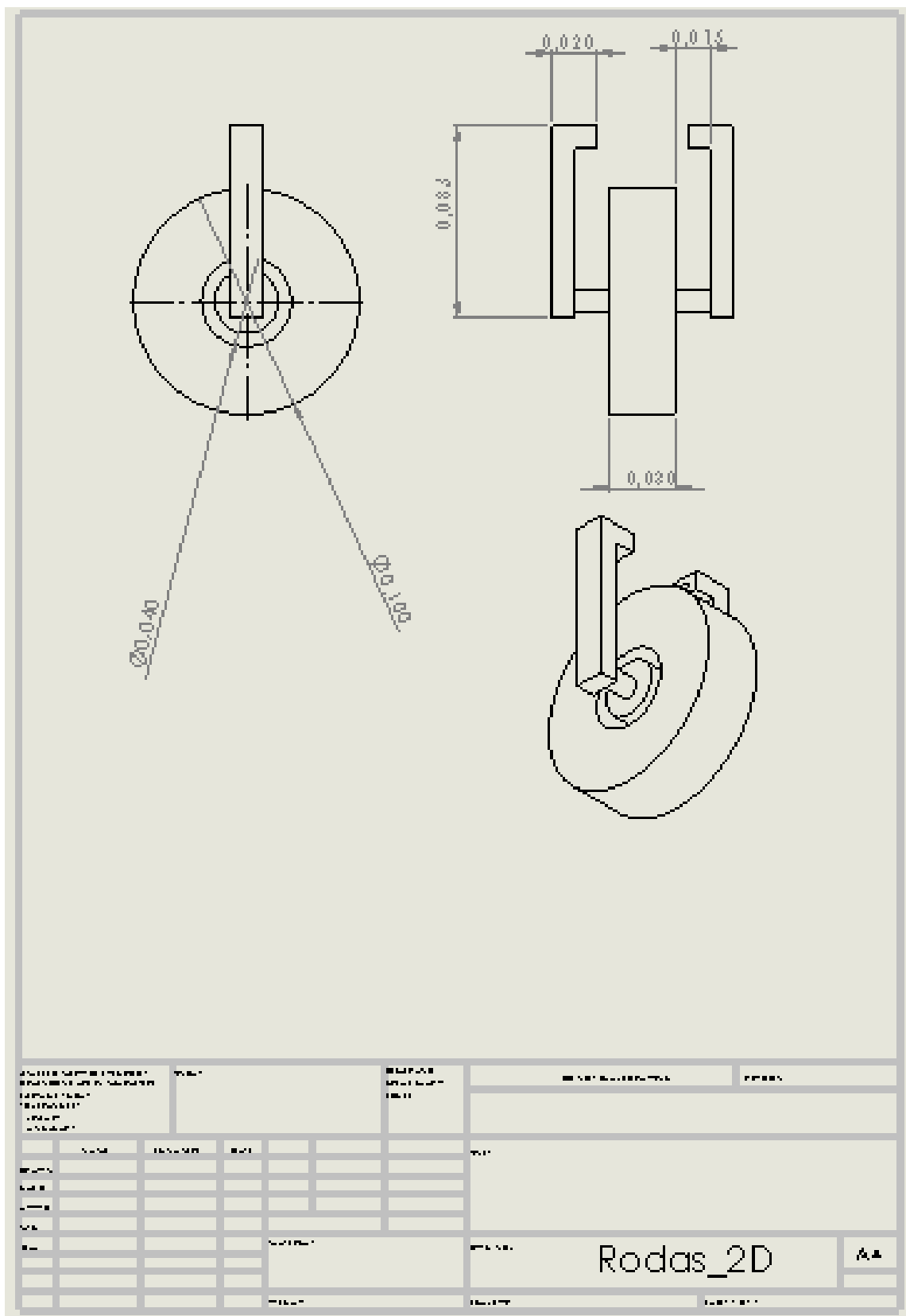
Anexo B.3. - "Cotovelo" do sistema de agitação;



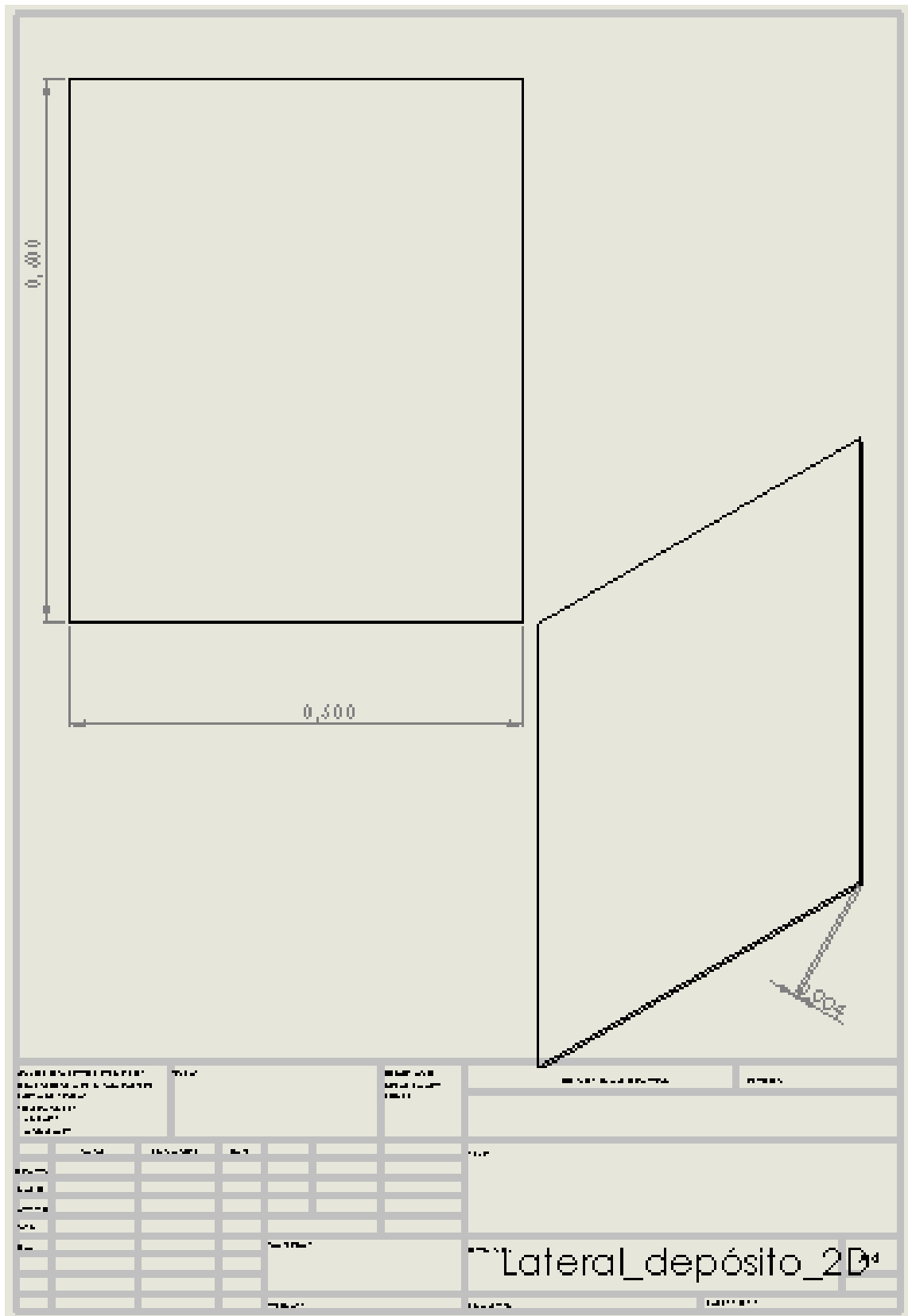
Anexo B.4. - Tubagem perfurada do sistema de agitação;



Anexo B.5. - Roda do carrinho de suporte;



Anexo B.6. - Lateral de vidro do depósito;





Anexo B.7. - Veio central de suporte à iluminação artificial.

