



Jorge Miguel Carvalho Rosa

Modelação e Optimização de uma Unidade de Produção de Microalgas

Junho de 2011



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Jorge Miguel Carvalho Rosa

Modelação e Optimização de uma Unidade de Produção de Microalgas

Dissertação de Mestrado na área científica de Engenharia Química, orientada pelos Senhores Professores Pedro M. Saraiva e Marco S. Reis e apresentada ao Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

Coimbra
2011



UNIVERSIDADE DE COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Gostaria de deixar os meus sinceros agradecimentos a todos os que contribuíram, de uma forma ou de outra, para a realização deste trabalho.

Em primeiro lugar, aos meus orientadores, Professor Doutor Pedro M. Saraiva e Professor Doutor Marco S. Reis, pela orientação e acompanhamento que me prestaram, não só na realização desta tese, mas também ao longo dos meus anos de estudante de Engenharia Química.

Em segundo lugar, à A4F – AlgaFuel, S. A. e à CMP - Fábrica Cibra-Pataias, S.A., pela cooperação que resultou na Unidade Protótipo de Produção de Microalgas em Pataias, sem a qual este trabalho não seria possível.

A toda a equipa da AlgaFuel, pela grande simpatia e disponibilidade demonstrada na prestação de todos os esclarecimentos. Por fim, um agradecimento especial ao Doutor Luís Costa, pela orientação dada neste trabalho e por todas as ideias sugeridas no decorrer do mesmo.

RESUMO

A tecnologia de produção de microalgas tem sido alvo de um grande interesse a nível científico e tecnológico devido às grandes potencialidades que apresenta. Esta tecnologia permite não só reduzir as emissões de dióxido de carbono de uma unidade industrial emissora, como também pode ser utilizada para diversos fins, nomeadamente para a produção de complementos para alimentação tanto humana como animal, para a produção de produtos de valor acrescentado nas indústrias farmacêutica e dos cosméticos, para o tratamento de efluentes e para a produção de biocombustíveis. Existem diversos processos de produção de microalgas, que operam sob condições diferentes usando diferentes espécies destes organismos. Este trabalho centrou-se na produção de microalgas autóctones em fotobiorreactores (PBRs) tubulares horizontais, sujeitos a condições atmosféricas. Os objectivos principais focalizaram-se nos diversos aspectos relacionados com as necessidades energéticas de um fotobiorreactor, nomeadamente o controlo da temperatura do meio de cultura (por simulação dos respectivos perfis), o cálculo das necessidades de transferência de calor após um processo de *scale-up* e a selecção do modo de transferência de calor mais adequado. Como complemento, foi ainda seleccionado o processo de secagem mais adequado para a obtenção de uma mistura concentrada de biomassa de microalgas.

Um dos factores principais, senão crítico, na produção de microalgas é o controlo da temperatura do meio de cultura, como forma de otimizar o seu crescimento e alcançar uma melhor produtividade. Neste trabalho é utilizada uma abordagem de modelação de um fotobiorreactor de produção de microalgas como forma de simular a temperatura do meio de cultura e assim perceber quais são os factores mais importantes no controlo da mesma. Foram desenvolvidos dois modelos para estado transiente e um para estado estacionário com base em balanços energéticos, recorrendo a correlações empíricas existentes na literatura para a determinação dos coeficientes de transferência e a dados meteorológicos (temperatura, humidade, velocidade do vento e radiação solar). O primeiro modelo simula o perfil de temperatura do meio de cultura de um PBR na ausência de um sistema de controlo de temperatura, tendo-se concluído que a radiação solar e os fenómenos de convecção são os principais factores que contribuem para a variação de temperatura do meio de cultura. O segundo modelo inclui o efeito do controlo de temperatura, isto é, o recurso a um sistema de transferência de calor por aspersão (pulverização de água sobre os tubos) de forma a manter a temperatura dentro de uma gama pré-determinada (20 a 30°C). O balanço em estado estacionário teve como objectivo determinar as necessidades de fornecimento ou remoção de calor de um PBR de modo a manter a temperatura dentro desses limites.

Foram feitas diversas aproximações sucessivas de forma a simplificar o modelo de base que na sua forma inicial era pouco exequível e com necessidade de dados não disponíveis. A validade dos modelos desenvolvidos foi avaliada e confirmada por comparação com dados reais disponíveis do processo industrial de produção de microalgas aqui estudado: no caso de não haver aspersão, obtiveram-se erros relativos médios de 2,3%

nas temperaturas máximas (Verão) e 2,9% nas temperaturas mínimas (Inverno); com o uso de aspersão, o erro relativo obtido no Verão foi de 2,7% nas temperaturas máximas. Estes valores reflectem uma boa concordância entre os perfis de temperatura reais e os obtidos pelos modelos desenvolvidos neste trabalho. Os modelos foram ainda utilizados de forma a prever a temperatura do meio de cultura num determinado dia, conhecidas a temperatura ambiente máxima e mínima e a nebulosidade desse dia. Desta forma, é possível prever se é necessário recorrer ao controlo de temperatura por aspersão num determinado dia com aquelas características, permitindo assim obter reduções na quantidade de água utilizada.

O modelo em estado estacionário desenvolvido neste trabalho foi aplicado ao projecto de novos fotobiorreactores de maiores dimensões (*scale-up*). Calculou-se a energia térmica que é necessário fornecer ou remover sob determinadas condições ambientais e de operação de modo a conseguir manter a temperatura do meio de cultura dentro de um intervalo considerado óptimo para atingir o máximo de produtividade. Esse valor foi utilizado para estimar o caudal de água de arrefecimento, o caudal de ar quente e a área de transferência de calor necessários, caso fosse utilizado um permutador de calor como forma de controlar a temperatura no conjunto dos PBRs estudados. Considerando o sistema de controlo de temperatura por aspersão em funcionamento durante (i) o período produtivo (diurno) ou (ii) 24 horas por dia, concluiu-se que, anualmente, seria necessário remover 481,8 MWh e fornecer 9479,0 MWh no caso (i), obtendo-se reduções de 73% na energia fornecida por comparação com o caso (ii).

Para garantir o controlo de temperatura do meio de cultura analisou-se o desempenho e efectuou-se o dimensionamento de diversas unidades de transferência de calor, como um permutador de carcaça e tubos 1:2, uma serpentina interna, uma dupla serpentina e a aspersão. Concluiu-se que a aspersão é a solução de controlo de temperatura mais adequada devido à sua *driving-force* mais elevada e maior área disponível para transferência de calor.

Para ser utilizada em diversas aplicações, é necessário reduzir a elevada percentagem de humidade da biomassa produzida pelo crescimento das microalgas. Para esse efeito foram determinadas experimentalmente curvas de secagem de biomassa de microalgas. A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que é possível secar a biomassa com elevado grau de eficiência até um grau de humidade de aproximadamente 20% recorrendo a uma fonte de calor. Com base na análise bibliográfica realizada, é recomendável a utilização de um *spray dryer* devido à sua elevada eficiência, sendo esta tecnologia, por esta razão, utilizada noutros tipos de indústria com fins semelhantes, como a alimentar e a farmacêutica.

Com a modelação e o trabalho desenvolvidos nesta tese pretendeu-se contribuir para a subsequente optimização do sistema produtivo de microalgas, e as soluções apontadas constituem potenciais melhoramentos a considerar no futuro.

ABSTRACT

Microalgae production technology is very interesting both scientifically and technologically due to its great potential. This technology allows not only the reduction of carbon dioxide emissions of an emitting industrial plant, but it can also be used for different applications, such as the production of complements for both human food and animal feed, the production of added value products for the pharmaceutical and cosmetics industries, wastewater treatment and the production of biofuels. There are various microalgae production processes, which operate under different conditions using diverse species of microalgae. This work was centered on the production of autochthonous microalgae in horizontal tubular photobioreactors (PBRs), under atmospheric conditions. The main goals focused on the different aspects concerning the energetic needs of a photobioreactor, namely the culture medium temperature control (by simulation of its profiles), the determination of heat transfer need after a scale-up process, and the selection of the best heat transfer method. The best drying process for obtaining a concentrated microalgae biomass was also selected.

One of the main or even critical factors of microalgae production is the culture medium temperature control. In this work, a modelling approach of a microalgae producing photobioreactor is used in order to simulate the culture medium temperature and thus understand what the most important factors are in its control. Two models for the transient state and one for the steady state were developed based on energy balances, using empirical correlations present in the literature for the determination of heat transfer coefficients and meteorological data (temperature, humidity, wind speed and solar radiation). The first model simulates the temperature profile of the culture medium in a PBR without temperature control system. It was concluded that solar radiation and convection phenomena are the main factors contributing to the temperature variation of the culture medium. The second model includes the effect of temperature control, using a heat transfer system consisting of the pulverization of water over the tubes (aspersion) in order to maintain the temperature within a predetermined interval (20-30°C). The goal of the steady state balance was to determine the heat supply and the heat removal needs of a PBR to maintain the temperature within the limits mentioned.

Several successive assumptions were made in order to simplify the base model, which was not very practical and needed unavailable data. The validity of the developed models was evaluated and confirmed by comparison with real data available from the industrial microalgae production process here studied: without aspersion, average relative errors of 2,3% were obtained for the maximum temperatures in the Summer and 2,9% for the minimum temperature in the Winter; with aspersion, the relative error for the maximum temperatures was 2,7% in the Summer. These values show a good fit between the actual temperature profiles and the results from the models developed in this work. Furthermore, the models were used for predicting the culture medium temperature in a given day,

knowing that day's maximum and minimum temperatures and nebulosity. Therefore, it is possible to predict if the temperature control by aspersion is needed in a given day, allowing savings in the amount of water used.

The steady state model developed in this work was applied to scaled-up photobioreactors. The amount of thermal energy needed to supply or to remove under certain ambient and operational conditions was calculated. This energy is intended to maintain the culture medium temperature within the considered ideal interval to achieve maximum productivity. This value was used to estimate the cooling water flow, the hot air flow and the heat transfer area needed, if a heat exchanger is used to control the temperature of the studied PBRs. Considering that the temperature control system by aspersion is operating during (i) the productive period (during daytime) or (ii) 24 hours per day, it was concluded that annually it would be needed to remove 481,8 MWh and to supply 9479,0 MWh in the case of (i). This represents a reduction of 73% on the supplied energy by comparing to (ii).

To assure the temperature control of the culture medium, the performance of different heat transfer units was evaluated and their design was made, such as a shell and tubes 1:2, an internal coil, a double coil and aspersion. It was concluded that aspersion is the best temperature control system due to its higher driving force and greater heat transfer area available.

In order to be used for its different applications, biomass produced from microalgae growth needs to be dried due to its great humidity content. To accomplish this, microalgae biomass drying curves were experimentally determined. From the results obtained, it was concluded that it is possible to dry the biomass with great efficiency to a humidity degree of approximately 20% using a heat source. According to the literature, it is recommended the use of a spray dryer due to its high efficiency. For this reason, this technology is also used in other industries with similar purposes, such as the food and pharmaceutical industries.

With the models and the work developed in this thesis, a contribution to the optimization of the microalgae production process was intended, and the solutions proposed are potential improvements to consider in the future.

Nomenclatura Geral

- Área, A [m^2]
- Velocidade de transferência de calor, Q [W]
- Capacidade calorífica, c_p [$J.kg^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]
- Absortividade, α
- Coeficiente de expansão térmica, β , [K^{-1}]
- Coeficiente de transferência de calor, h [$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$]
- Coeficiente de transferência de massa, k_G [$m.s^{-1}$]
- Coeficiente global de transferência de calor, U [$W.m^{-2}.^{\circ}C^{-1}$]
- Comprimento, L [m]
- Condutividade térmica, k [$W.m^{-1}.^{\circ}C^{-1}$]
- Constante dos gases perfeitos, R [$J.K^{-1}.mol^{-1}$]
- Diâmetro, D [m]
- Coeficiente de difusão, D_a [$m^2.s^{-1}$]
- Emissividade, ε
- Entalpia de vaporização, ΔH_v [$J.kg^{-1}$]
- Massa molar, M [$kg.mol^{-1}$]
- Massa volúmica, ρ [kgm^{-3}]
- Nº de Graschof, Gr
- Nº de Nusselt, Nu
- Nº de Prandtl, Pr
- Nº de Rayleigh, Ra
- Nº de Reynolds, Re
- Nº de Schmidt, Sc
- Pressão de saturação, P^{σ} [Pa]
- Temperatura, T [$^{\circ}C$] ou [K]
- Tempo, t [s]
- Tempo de residência, τ [s]
- Velocidade de transferência de massa, N_A [$mol.s^{-1}$]
- Velocidade, v [$m.s^{-1}$]
- Viscosidade dinâmica, η [$m^2.s^{-1}$]
- Viscosidade, μ [Pa.s]
- Volume, V [m^3]

Índice de Conteúdos

1. Motivação.....	1
2. Introdução.....	2
2.1 Considerações Ambientais.....	2
2.2 Produção de Microalgas e suas Aplicações	3
2.3 Produtividade e Fotobiorreactores	5
2.4 Objectivos Específicos e Organização do Trabalho	7
3. Desenvolvimento dos Modelos de Simulação da Temperatura de um Fotobiorreactor .	11
3.1 Análise dos Factores mais Importantes que Contribuem para a Variação da Temperatura num Fotobiorreactor	12
3.2 Desenvolvimento do Modelo sem Recurso a um Sistema de Controlo de Temperatura.....	23
3.3 Balanço energético em estado estacionário	25
3.4 Desenvolvimento de um Modelo para Simulação da Temperatura num PBR com Aspersão	25
3.5 Metodologia Utilizada na Implementação Computacional dos Modelos.....	30
3.6 Validação dos Modelos Desenvolvidos.....	32
3.7 Desenvolvimento de uma Metodologia de Previsão da Temperatura dos Fotobiorreactores.....	38
4. Aplicação do Modelo ao Projecto de Novos Fotobiorreactores.....	43
4.1 Hipóteses assumidas.....	43
4.2 Resultados Obtidos para a Transferência de Calor.....	44
5. Análise de Soluções de Controlo de Temperatura dos PBRs.....	50
5.1 Carcaça e Tubos 1:2	52
5.2 Serpentina.....	52
5.3 Arrefecimento por aspersão.....	53
6. Secagem da Mistura de Microalgas	54
6.1 Estudo de Curvas de Secagem de Microalgas	54
6.2 Análise e Selecção de Processos de Secagem	58
7. Conclusões.....	61
Bibliografia.....	63
Anexos	66

Anexo I – Análise de sensibilidade	67
Anexo II – Funções Desenvolvidas no Matlab	68
Anexo III – Perfis de Temperatura Simulados	81

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Produção anual de microalgas (adaptado de Brennan e Owende, 2010).....	3
Tabela 2 – Valores de produtividade de biomassa por unidade de área ($P_{\text{área}}$) e volume (P_{volume}), concentração máxima (X_{max}) e respectivos microalgas e fotobiorreactores utilizados (adaptado de Brennan e Owende, 2010).	6
Tabela 3 – Valores de radiação típicos em função da nebulosidade.	39
Tabela 4 – Estimativas de calor a remover/fornecer para manter os PBRs dentro da gama 20-30°C durante todo o dia.	46
Tabela 5 – Estimativas de calor a remover e fornecer para manter os PBRs dentro do set point (20-30°C) apenas durante o fotoperíodo.	48
Tabela 6 – Resultados obtidos para os ensaios de secagem realizados a diferentes temperaturas.	55
Tabela 7 – Resultados da análise de sensibilidade; T_{max} refere-se à temperatura máxima atingida num dia médio de Verão (cenário típico de Verão);	67

Índice de Figuras

Figura 1 – Esquema dos potenciais processos de conversão de biomassa (adaptado de Brennan e Owende, 2010).....	5
Figura 2 – Vista geral de um PBR da UPPM (tubos e depósito).	7
Figura 3 – Esquemas da vista frontal e de topo de um PBR típico.....	11
Figura 4 – Exemplo de aproximação do perfil de radiação solar por alisamento baseado em <i>splines</i>	16
Figura 5 – Esquema da fracção absorvida (α), reflectida (ρ) e transmitida (τ) da radiação incidente.	16
Figura 6 – Esquema da radiação incidente a) na vertical; b) na diagonal.	17
Figura 7 – Esquema da radiação incidente segundo o modelo simplificado proposto a) na vertical; b) na diagonal.	17
Figura 8 – Representação do ajuste por alisamento (Tambsim) dos dados de temperatura ambiente (Tamb)	20
Figura 9 – Estação meteorológica da UPPM	21
Figura 10 – Velocidade do vento registada pela estação meteorológica da UPPM entre 2 e 6 de Dezembro/2009.....	22
Figura 11 – Exemplo da variação da velocidade do vento ao longo de um dia de Verão.....	22
Figura 12 – Pulverização de água sobre os tubos (aspersores).....	26
Figura 13 – Perfis de temperaturas em vários locais de um PBR ao longo do tempo.	32
Figura 14 – Comparação de dados reais (Treal) com os resultados das simulações (Tsim), para a temperatura do meio de cultura no período considerado (um mês de Setembro).	34
Figura 15 – Temperatura real (Treal) e Simulada (Tsim) do meio de cultura num período de Inverno.....	36
Figura 16 – Efeito da pluviosidade na variação da temperatura real (T real) e na simulada (Tsim).	37
Figura 17 – Comparação entre os resultados obtidos pelo modelo (Tsim) e os dados recolhidos no PBR (T real) para um mês de Verão, usando aspersão.	38
Figura 18 – Aproximação empírica dos dados de radiação solar.....	40
Figura 19 – Perfis de temperatura obtidos com (Tc/tr) e sem (Ts/tr) recurso à aspersão.	41
Figura 20 – Esquema das soluções de controlo de temperatura.....	51
Figura 21 – Balança medidora de humidade PCE-MB-50 (Industrial Needs, 2010).....	54
Figura 22 – Curvas de secagem a diferentes temperaturas: variação da percentagem de humidade ao longo do tempo.	55
Figura 23 – Variação do declive das curvas de secagem ao longo do tempo de secagem.	56
Figura 24 – Variação do declive das curvas de secagem em função da percentagem de massa inicial.....	57
Figura 25 – Esquema simplificado de um <i>spray dryer</i> (adaptado de Perry e Green, 1997).....	59

1. Motivação

Este trabalho é o resultado da colaboração desenvolvida ao longo de um ano com a **A4F – AlgaFuel, S.A.**, que é uma empresa de biotecnologia que desenvolve projectos de produção de microalgas baseados num *scale-up* progressivo. A mitigação de emissões de dióxido de carbono de unidades industriais emissoras é um dos objectivos da utilização de microalgas e a produção de óleo vegetal para produção de biodiesel é uma das aplicações promissoras. Esta actividade de mitigação de emissões de gases com efeito de estufa é muito importante no contexto nacional, uma vez que permite reduzir o impacte ambiental das indústrias emissoras nacionais e contribuir para o combate às alterações climáticas.

Devido à natureza da colaboração estabelecida, o trabalho desenvolvido foi orientado para as necessidades da Unidade Protótipo de Produção de Microalgas (UPPM) desta empresa instalada em Pataias junto à cimenteira CMP - Fábrica Cibra-Pataias, S.A e teve como objectivo global a Modelação e a Optimização de uma Unidade Industrial de Produção de Microalgas, estando os objectivos específicos apresentados mais à frente. Com o trabalho realizado, pretendeu-se contribuir para a melhoria progressiva do processo de produção de microalgas, quer ao nível do aumento da produtividade, quer ao nível da sugestão de soluções para os problemas existentes relacionados com necessidades energéticas. De forma a cumprir os objectivos traçados, este trabalho teve uma vertente de modelação computacional, uma vertente experimental, e uma vertente de análise bibliográfica. Por isso, a estrutura desta tese é um pouco diferente da que resulta de um trabalho de índole exclusivamente experimental, cuja estrutura é geralmente constituída pela revisão bibliográfica, descrição da metodologia experimental e apresentação e discussão dos resultados obtidos.

No início do trabalho foi efectuado um acordo de confidencialidade entre as partes envolvidas em que foram estabelecidos limites para a divulgação da informação recolhida na Unidade Industrial. Para respeitar este acordo, parte desta informação e alguns dos resultados obtidos neste trabalho não podem ser divulgados de uma forma absoluta. Consequentemente, alguns dos dados/resultados encontram-se normalizados, e algumas informações relativas ao processo de produção de microalgas foram omitidas.

Apesar dos condicionalismos, procurou-se que este trabalho apresentasse o maior valor possível para a AlgaFuel e para o futuro da produção de microalgas praticada por esta empresa.

2. Introdução

2.1 Considerações Ambientais

No âmbito dos objectivos da União Europeia referentes às alterações climáticas e energias renováveis, conhecidos por “20-20-20”, é necessário os estados membros, até ao ano de 2020, reduzirem em 20% as emissões de gases com efeito de estufa (GEE), tendo por base o ano 1990, produzirem 20% da sua energia a partir de fontes renováveis e melhorarem a eficiência energética em 20% (Comissão das Comunidades Europeias, 2008). Os objectivos “20-20-20” surgiram para dar seguimento às metas resultantes do Protocolo de Quioto que terminam em 2012, e constituem uma política estratégica europeia de aposta nas energias renováveis e diminuição das emissões dos GEE. Estes objectivos pretendem combater o aquecimento global e contribuir para uma maior sustentabilidade dos países da União Europeia em geral e dos processos industriais em particular.

Actualmente, em Portugal, está estabelecido, pelo Decreto-Lei n.º 233/2004, de 14 de Dezembro, o Comércio Europeu de Licenças de Emissão de gases com efeito de estufa (CELE). Segundo o Plano Nacional para as Alterações Climáticas (PNAC), a cada instalação industrial cujas emissões de GEE estejam acima de determinados limites são atribuídas licenças de emissão de acordo com o PNALE II (Plano Nacional de Atribuição de Licenças de Emissão). Se uma instalação industrial apresentar emissões de GEE superiores às suas licenças de emissão, tem que comprar licenças adicionais a preço de mercado (Agência Portuguesa do Ambiente, 2010). Portanto, é importante cumprir os limites de emissão definidos e, se possível, reduzir as emissões abaixo desse limite de modo a vender as licenças excedentes, obtendo lucro através do CELE.

De entre os vários GEE a monitorizar e a reduzir segundo o PNALE II, dióxido de carbono, metano e óxido nitroso, o primeiro tem especial relevância, já que normalmente é o gás que se encontra em maiores concentrações nas emissões das empresas industriais emissoras. Além de alterações a nível processual que levem à diminuição das emissões de CO₂, existem diversas soluções de “fim de linha” que permitem reduzir as emissões deste GEE: a via física, como a captura e sequestro de dióxido de carbono em profundidade, a via química, como a captura e sequestro de dióxido de carbono em rochas ricas em óxidos de metais originando carbonatos, e a via biológica, como fonte de alimentação na produção de culturas de crescimento rápido, nomeadamente microalgas (Stewart & Hessami, 2005).

As microalgas são capazes de produzir biomassa a partir de dióxido de carbono e luz solar. O processo de produção de microalgas permite assim mitigar as emissões de GEE, evitar a compra de licenças adicionais, eventualmente vender as licenças prescindíveis e ainda produzir biomassa de microalgas para diversas aplicações, como descrito mais adiante.

2.2 Produção de Microalgas e suas Aplicações

As microalgas são algas microscópicas unicelulares. Ao contrário das plantas superiores, não possuem raiz, caule e folhas. Tanto podem ser seres autotróficos, se forem fotossintéticas, como heterotróficos, se não o forem (Chen *et al.*, 2011). Existem microalgas procariontes (cianobactérias) e eucariontes, onde se encontram as espécies de algas mais comuns (Brennan e Owende, 2010). As microalgas tipicamente usadas em sistemas de produção em larga escala são eucariontes fotoautotróficas. Na Tabela 1 encontram-se algumas das espécies de microalgas mais utilizadas.

A cinética de crescimento das microalgas pode ser complexa, principalmente se não for utilizada uma espécie única, mas sim uma mistura de espécies. As microalgas necessitam de diversos factores para crescer, como uma fonte de carbono, macro-nutrientes, como uma fonte de azoto ou fósforo, uma fonte de luz e micro-nutrientes. Existem outros factores que, dependendo da espécie utilizada, afectam a cinética de crescimento, dos quais é de realçar a temperatura. Por essa razão, é importante controlar a temperatura para garantir elevadas velocidades de crescimento. Se, como fonte de carbono, for utilizado dióxido de carbono proveniente de uma empresa industrial emissora, é possível mitigar as emissões de origem antropogénica deste gás com efeito de estufa, produzindo simultaneamente produtos a partir da biomassa gerada. Este tipo de microalgas são fotoautotróficas, e é nelas que se centra este trabalho.

Tabela 1 – Produção anual de microalgas (adaptado de Brennan e Owende, 2010).

Microalga	Produção Anual*	Aplicação e produto	Preço (€)
<i>Spirulina</i>	3000 ton (p.s.)	Nutrição humana Nutrição animal Cosméticos	36 kg ⁻¹
<i>Chlorella</i>	2000 ton (p.s.)	Ficobiliproteínas Nutrição humana Cosméticos	11 mg ⁻¹ 36 kg ⁻¹
<i>Dunaliella salina</i>	1200 ton (p.s.)	Aquacultura Nutrição humana Cosméticos	50 L ⁻¹
<i>Aphanizomenon flos-aquae</i>	500 ton (p.s.)	B-caroteno Nutrição humana	215-2150 kg ⁻¹
<i>Haematococcus pluvialis</i>	300 ton (p.s.)	Aquacultura Astaxantina	50 L ⁻¹ 7150 kg ⁻¹
<i>Cryptocodinium cohnii</i>	240 ton (óleo DHA)	Óleo DHA	43 g ⁻¹
<i>Schizochytrium</i>	10 ton (Óleo DHA)	Óleo DHA	43 g ⁻¹

* p.s. – peso seco; óleo DHA – ácido docosaheptaenóico

A biomassa produzida a partir de microalgas pode ser utilizada em diversas aplicações. Como apresenta valores nutritivos interessantes, a biomassa pode constituir um aditivo de ração ou ração completa para animais. Também pode ser comercializada como complementos para a alimentação humana, nomeadamente sob a forma de cápsulas. Além disso, determinadas microalgas produzem compostos de elevado valor acrescentado que podem ser extraídos e têm propriedades interessantes para a indústria farmacêutica ou para a indústria dos cosméticos. Da biomassa pode ainda ser extraído óleo vegetal para fabrico de biodiesel (Mata *et al.*, 2010). Além destas aplicações, as microalgas também podem reduzir a carga ambiental de efluentes de uma unidade industrial (Shiny *et al.*, 2005), já que estes podem ser utilizados como meio de cultivo de microalgas, desde que as suas características químicas e biológicas não ponham em causa o crescimento celular nem a aplicação do produto final. Esta é outra grande vantagem deste tipo de cultura, já que conduz a poupanças no tratamento de efluentes e na utilização de fontes de água.

A Tabela 1 apresenta aplicações e produtos das microalgas actualmente mais comuns, assim como a produção anual e o preço dos produtos. Como se pode verificar, a maioria das aplicações actuais está relacionada com a nutrição, com os cosméticos e outros produtos de valor acrescentado.

A produção de biocombustíveis a partir de microalgas (por um processo de biorefinação, por comparação com a indústria do petróleo) é uma das aplicações que ainda não se encontra muito desenvolvida devido a diversos factores económicos e técnicos. Apresenta, contudo, elevadas potencialidades, quer a nível ambiental, quer a nível económico. As vantagens ambientais estão relacionadas com a substituição de fontes não-renováveis por fontes renováveis de produção de combustíveis ou electricidade. Se a produção de microalgas for feita de forma sustentável, a biomassa produzida pode constituir uma fonte renovável de geração de energia, quer sob a forma de um biocombustível, quer sob a forma de electricidade. As vantagens económicas estão relacionadas com o crescimento de uma nova indústria de produção de energia baseada na biorrefinação de substâncias extraídas da biomassa produzida. Os processos de conversão de biomassa proveniente de microalgas em formas úteis de energia encontram-se esquematizados na Figura 1. Como se pode observar, são diversos os produtos que é possível gerar a partir de biomassa de microalgas. Estes incluem diversos biocombustíveis, como etanol, hidrogénio, bio-óleo, a geração de energia eléctrica, e a produção de combustíveis mais tradicionais como o gás de síntese (mistura de hidrogénio e dióxido de carbono) e o carvão.

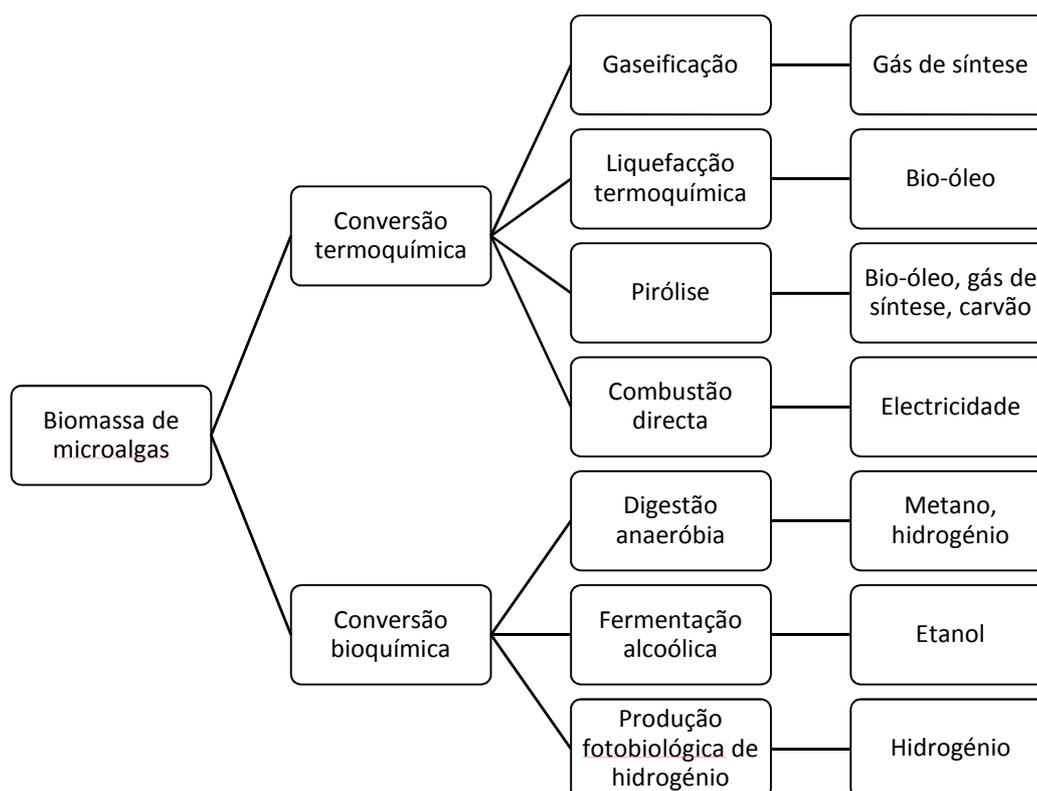


Figura 1 – Esquema dos potenciais processos de conversão de biomassa (adaptado de Brennan e Owende, 2010).

2.3 Produtividade e Fotobiorreactores

Qualquer que seja a aplicação da biomassa produzida, é muito importante que o processo de produção apresente todas as condições para que as microalgas cresçam e se multipliquem a uma velocidade tão elevada quanto possível. São vários os parâmetros a ter em conta na determinação da eficiência de crescimento, nomeadamente a produção de biomassa por unidade de volume, a produção por unidade de volume e tempo (produtividade), e talvez o mais importante, a produção de biomassa por unidade de área e tempo (produtividade em termos de área).

Na produção de microalgas fotoautotróficas, é necessário utilizar um fotobiorreactor (*photobioreactor*, PBR), ou seja, um reactor biológico construído em material transparente sobre o qual incide uma fonte de luz. A luz é o aspecto fundamental que limita a produtividade de fotobiorreactor (Akkerman *et al.*, 2002), porque, por um lado, é necessária à fotossíntese, e, por outro, inibe-a quando em excesso. Portanto, para melhor aproveitar a luz solar e combater o seu efeito inibidor, é importante que a razão entre a área exposta à luz e o volume seja elevada. Como tal, o espaço disponível é a variável limitante, e por isso a produtividade de um processo de produção é normalmente avaliada pelo factor biomassa por unidade de área e tempo. Logo, um processo de elevada produtividade é aquele que

consegue produzir mais biomassa por unidade de área num determinado período temporal. A Tabela 2 mostra alguns casos de processos de produção de microalgas e respectivos valores de produtividade e fotobiorreactores utilizados.

Tabela 2 – Valores de produtividade de biomassa por unidade de área ($P_{\text{área}}$) e volume (P_{volume}), concentração máxima (X_{max}) e respectivos microalgas e fotobiorreactores utilizados (adaptado de Brennan e Owende, 2010).

Espécie	Tipo de Reactor	Volume (L)	X_{max} (g L^{-1})	$P_{\text{área}}$ ($\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$)	P_{volume} ($\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$)	Referência
<i>Porphyridium cruentum</i>	Tubular airlift	200	3	-	1,5	Rubio <i>et al.</i> , 1999
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Tubular airlift	200	-	20	1,2	Fernández <i>et al.</i> , 2001
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Tubular airlift	200	-	32	1,9	Grima <i>et al.</i> , 2001
<i>Chlorella sorokiniana</i>	Tubular inclinado	6	1,5	-	1,47	Ugwu <i>et al.</i> , 2002
<i>Arthrospira platensis</i>	Tubular undular row	11	6	47,7	2,7	Carlozzi, 2003
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Tubular helicoidal exterior	75	-	-	1,4	Hall <i>et al.</i> , 2003
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Tubular paralelo (AGM)	25000	-	13	0,05	Olaizola, 2000
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Bubble column	55	1,4	-	0,06	Lopez <i>et al.</i> , 2006
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Tubular airlift	55	7	-	0,41	Lopez <i>et al.</i> , 2006
<i>Nannochloropsis sp.</i>	Flat plate	440	-	-	0,27	Cheng-Wu <i>et al.</i> , 2001
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Flat plate	25000	-	10,2	-	Huntley & Redalje, 2007
<i>Spirulina platensis</i>	Tubular	5,5	-	-	0,42	Converti <i>et al.</i> , 2006
<i>Arthrospira</i>	Tubular	146	2,37	25,4	1,15	Carlozzi, 2000
<i>Chlorella</i>	Flat plate	400	-	22,8	3,8	Doucha <i>et al.</i> , 2005
<i>Chlorella</i>	Flat plate	400	-	19,4	3,2	Doucha <i>et al.</i> , 2005
<i>Tetraselmis</i>	Coluna	1000	1,7	38,2	0,42	Zittelli <i>et al.</i> , 2006
<i>Chlorococcum</i>	Parábola	70	1,5	14,9	0,09	Sato <i>et al.</i> , 2006
<i>Chlorococcum</i>	Cúpula	130	1,5	11,0	0,1	Sato <i>et al.</i> , 2006

Como se pode verificar pelos valores da Tabela 2, a produtividade pode variar significativamente consoante a espécie de microalga utilizada e o reactor envolvido no processo. Tal como acontece com qualquer indústria, o cultivo de microalgas deve apresentar custos, quer de capital quer de operação, o mais baixos possível. No entanto, este ponto é particularmente importante no caso de uma cultura de microalgas. Quando comparado com uma indústria química tradicional, o processo exibe um longo tempo de residência e o meio líquido resultante (cultura) apresenta baixas concentrações, neste caso de biomassa. Por isso, os custos de secagem/extracção do produto final podem ser

consideráveis. Como tal, os custos de produção têm de ser baixos, para viabilizar o processo do ponto de vista económico-financeiro.

Por outro lado, os valores de produtividade devem ser tão altos quanto possível para rentabilizar o processo. Isto implica que a escolha do biorreactor é um aspecto fundamental a ter em consideração. Como se poder ver na Tabela 2, os PBRs mais utilizados e aqueles que são recomendados por apresentarem teoricamente maior eficiência (Akkerman *et al.*, 2002) são os *flat plate* e os tubulares. Os *flat plate* consistem em pratos transparentes colocados a uma curta distância, entre os quais circulam as microalgas. Os tubulares consistem em tubos com uma determinada geometria e posicionamento variável, no interior dos quais circulam as microalgas. De entre os vários tipos de biorreactores usados na produção de microalgas, este trabalho centra-se nos fotobiorreactores tubulares da empresa A4F – AlgaFuel, S.A. que em parceria com a CMP – Secil, S.A. possui uma Unidade Protótipo de Produção de Microalgas (UPPM) em Pataias. A Figura 2 mostra uma parte desses fotobiorreactores.



Figura 2 – Vista geral de um PBR da UPPM (tubos e depósito).

2.4 Objectivos Específicos e Organização do Trabalho

Este trabalho tem como objectivo global analisar diversos aspectos relacionados com as necessidades energéticas de fotobiorreactores semelhantes aos existentes na Unidade Industrial de Produção de Microalgas (UPPM) por recurso a um processo de Modelação e a consequente Optimização dessa unidade. Para cumprir este objectivo global definiram-se quatro tarefas específicas:

1. Simular e prever o perfil de temperatura de um PBR a partir de dados meteorológicos;
2. Determinar as necessidades de transferência de calor de PBRs após *scale-up*;
3. Analisar diferentes processos de transferência de calor para controlo de temperatura da cultura e seleccionar o mais apropriado;
4. Analisar diferentes processos de secagem da biomassa e seleccionar o mais adequado.

O primeiro objectivo deste trabalho está relacionado com o melhoramento do controlo de temperatura do meio de cultura de um PBR. Actualmente, o processo real que serviu de base a este trabalho decorre em modo semi-contínuo, uma vez que diariamente é retirada uma parte da cultura e substituída pelo mesmo volume de água. Também são introduzidos nutrientes de modo a possibilitar (e não limitar) o crescimento das microalgas. Assim, sob o ponto de vista cinético, a produção da biomassa está principalmente dependente de dois factores: 1) da luminosidade, uma vez que é este o factor limitante, quer por defeito (por exemplo no período nocturno) quer por excesso (por fotoinibição) durante o período diurno, e 2) da temperatura do meio de cultura (Akkerman *et al.*, 2002). Neste trabalho, adoptou-se como gama ideal de crescimento das microalgas a gama entre 20°C a 30°C. Quer abaixo de 20°C quer acima dos 30°C a cinética de crescimento é lenta, existindo inibição ou mesmo morte celular próximo dos 40°C. Estes valores limite são baseados em dados empíricos resultantes do processo de produção das microalgas usadas na UPPM. A razão para a existência de uma gama térmica ideal em vez de apenas um valor de temperatura deve-se à adaptabilidade das microalgas nativas no meio de cultura. Para que o meio de cultura se situe dentro desta gama, é necessário controlar a sua temperatura, uma vez que permite não só aumentar a produtividade como também evitar a morte de culturas devido a altas temperaturas. Este controlo térmico é efectuado actualmente através da pulverização de água sobre os tubos (aspersão) no período diurno.

Para cumprir este objectivo são desenvolvidos três modelos: dois em estado transiente e um em estado estacionário. O primeiro modelo tem o intuito de simular a temperatura de um PBR sem recurso à aspersão. Como os PBRs se encontram no exterior, a temperatura do meio de cultura depende de factores, sobretudo ambientais, tais como o vento, a chuva e a radiação solar térmica. Note-se que a radiação solar térmica se distingue da luminosidade, uma vez que a luminosidade corresponde à radiação com um comprimento de onda utilizável para a fotossíntese (essencialmente luz visível: 400 a 700 nm), enquanto a radiação solar térmica se caracteriza por uma gama mais abrangente de comprimentos de onda que contribuem para o aquecimento de um corpo (100 a 10⁵ nm, o que inclui toda a radiação infravermelha).

O segundo modelo pretende simular a temperatura de um PBR durante o período diurno quando se recorre ao sistema actualmente existente para controlo desta variável. No processo real estudado, esse controlo de temperatura é feito recorrendo a aspersores que dispersam gotículas de água sobre os PBRs. Com este sistema, ocorre transferência de calor por condução através da parede dos tubos entre a água que escorre pelo exterior destes e o

meio de cultura que circula no interior. Também ocorre evaporação da água, o que permite uma remoção adicional de calor dos tubos. Este processo tem a vantagem de originar uma elevada área de transferência de calor, mas apresenta a desvantagem de existirem perdas de água consideráveis por evaporação, o que se traduz em custos e impactes ambientais que não são desprezáveis.

Qualquer metodologia de simulação deve ser validada comparando os resultados da simulação com dados reais. Para tal, foram utilizados dados de temperatura recolhidos para um fotobiorreactor, e dados meteorológicos recolhidos na mesma altura de recolha dos dados de temperatura do PBR. O perfil de temperatura simulado pelos modelos desenvolvidos, utilizando as características do PBR em causa, é confrontado com o perfil real medido.

É fundamental poder prever-se, *a priori*, a necessidade do recurso ao sistema de controlo de temperatura por aspersão para os fotobiorreactores da UPPM considerando as condições ambientais específicas de um determinado dia. Por isso, foi também desenvolvida uma metodologia de estimativa das condições ambientais com base na previsão meteorológica de forma a determinar se é ou não necessário activar o sistema de controlo de temperatura. Esta metodologia de previsão do perfil de temperaturas recorre aos modelos desenvolvidos em estado transiente.

O modelo em estado estacionário é baseado no modelo sem o sistema de controlo de temperatura. Ele recorre a permutadores de calor que transferem o calor necessário para manter a temperatura dentro dos limites definidos, permitindo determinar o consumo de água de arrefecimento e o calor transferido.

O desenvolvimento dos modelos de simulação, a descrição da metodologia empregue, a sua validação e a metodologia de previsão encontram-se descritos no Capítulo 3 (Desenvolvimento dos Modelos de Simulação da Temperatura de um Fotobiorreactor).

O segundo objectivo é alcançado utilizando o modelo em estado estacionário desenvolvido neste trabalho para determinar as necessidades energéticas de PBRs de maiores dimensões. Pretende-se que a unidade protótipo da produção de microalgas sofra um *scale-up* para uma unidade de produção piloto e sucessivamente até uma unidade industrial. De modo a perceber quais seriam as necessidades energéticas de novos PBRs hipotéticos de maiores dimensões, o modelo de simulação da temperatura foi aplicado ao projecto destes novos PBRs. Este projecto pretende ser um exemplo de aplicação da metodologia desenvolvida de modo a mostrar as capacidades do modelo desenvolvido. Os resultados dessas simulações encontram-se descritos no Capítulo 4 (Aplicação do Modelo ao Projecto de Novos Fotobiorreactores).

Como o sistema de controlo de temperatura actualmente utilizado (a aspersão) apresenta algumas desvantagens, são propostas e analisadas várias soluções de sistemas de transferência de calor no Capítulo 5 (Análise de Soluções de Controlo de Temperatura dos

PBRs). O objectivo é compará-las de modo a ser possível tomar uma decisão sobre a solução mais vantajosa para um sistema de controlo de temperatura.

Outro aspecto muito importante neste processo é o destino da biomassa produzida. Como a biomassa produzida não é mais do que uma dispersão de microalgas no meio de cultura, numa primeira fase ela devia ser seca até baixos níveis de humidade. A forma como essa secagem é conduzida é importante, já que a selecção do processo de secagem mais adequado pode permitir obter poupanças no consumo energético. Por isso, pretende-se analisar a metodologia de secagem da biomassa produzida e sugerir tecnologias para melhorar esse processo. Os estudos realizados sobre esta temática encontram-se descritos no Capítulo 6 (Secagem da Mistura de Microalgas).

No Capítulo 7 são expostas resumidamente as principais conclusões deste trabalho. Nos Anexos são apresentados uma análise de sensibilidade, o código computacional desenvolvido neste trabalho, e alguns resultados das simulações.

3. Desenvolvimento dos Modelos de Simulação da Temperatura de um Fotobiorreactor

O fotobiorreactor (PBR) tubular considerado neste trabalho é constituído essencialmente por duas unidades: um depósito opaco (fechado, equipado com chaminé de exaustão), e um conjunto de tubos transparentes no interior dos quais ocorre o crescimento e a multiplicação celular – Figura 3. No depósito, as correntes provenientes dos tubos do PBR são misturadas e são injectados os gases de combustão provenientes de uma indústria próxima onde estes sejam produzidos. De entre os constituintes gasosos, o dióxido de carbono é aquele que é completamente dissolvido (>99%). A injeção e dissolução do dióxido de carbono ocorrem de modo a manter o pH do meio de cultura aproximadamente constante. Os restantes gases de combustão (essencialmente azoto), sendo insolúveis em água, escapam pela chaminé do depósito. A injeção de gases provoca a turbulência nos depósitos, a qual contribui para garantir a homogeneidade da mistura, não existindo, por isso, outro tipo de agitação.

Considerou-se que do depósito sai um fluxo de líquido que é bombeado e dividido em 5 correntes, uma para cada tubo do PBR, como se pode observar esquematicamente na Figura 3. Considerou-se ainda que cada tubo do PBR dá 6 voltas. O meio de cultura líquido interno circula em regime turbulento, recebendo radiação solar e, em consequência da fotossíntese, gera-se biomassa. No final das 6 voltas, as correntes são de novo misturadas no depósito. Desta forma o meio de cultura contendo as microalgas é permanentemente recirculado e homogeneizado. Para efeitos de simplicidade linguística empregar-se-á doravante a designação “cultura” à suspensão de microalgas no meio de cultura.

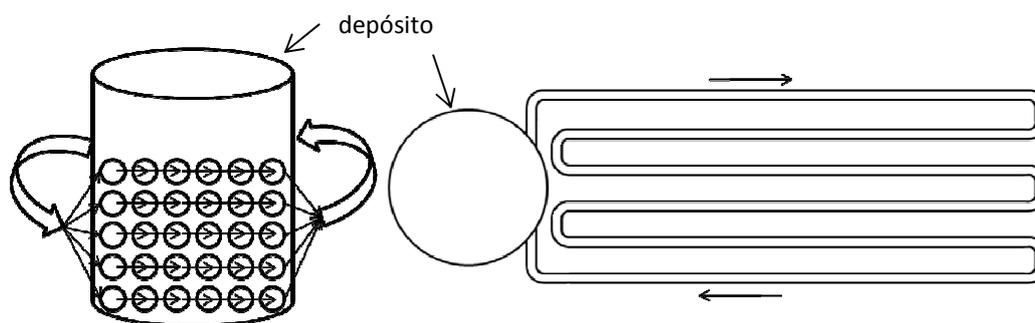


Figura 3 – Esquemas da vista frontal e de topo de um PBR típico.

3.1 Análise dos Factores mais Importantes que Contribuem para a Variação da Temperatura num Fotobiorreactor

Com o objectivo de melhorar o controlo de temperatura e, conseqüentemente, aumentar a produtividade de um fotobiorreactor, é fundamental desenvolver um modelo capaz de simular o seu perfil de temperatura ao longo do dia. Para isso, é necessário compreender o seu comportamento térmico e as condições a que um PBR está sujeito. Define-se aqui “sistema” como sendo constituído por um PBR onde é produzida biomassa, e “vizinhança” como todo o ambiente contando factores externos que com ele interferem. Desta forma, é possível listar todas as entradas e saídas do sistema que podem contribuir para uma variação de temperatura do mesmo.

Possíveis trocas energéticas

As transferências de energia a considerar entre o sistema (PBR) e a sua vizinhança são as seguintes:

- Entrada de radiação solar;
- Potência fornecida pelas bombas de recirculação;
- Injecção de gases de combustão;
- Retirada de cultura e adição de água;
- Adição de nutrientes em solução;
- Trocas de calor com a vizinhança por convecção;
- Trocas de calor com a vizinhança por radiação;
- Consumo de energia na reacção de fotossíntese e geração de energia na reacção de respiração celular;

Além destas trocas, existe ainda a necessidade de retirar ou fornecer calor para o processo, dependendo da sua temperatura. Como referido anteriormente, pretende-se que a temperatura dos PBRs se situe entre 20°C e 30°C, que é a gama de temperaturas identificada como sendo melhor para o crescimento das microalgas.

Identificadas as possíveis trocas de energia, é necessário analisar quais as mais relevantes e quais podem ser desprezadas por não contribuírem significativamente para alterações na temperatura do processo. Estas sucessivas aproximações permitem simplificar o modelo, tornando-o mais fácil de aplicar. As trocas de energia existentes são discutidas de seguida.

Biomassa e Água

Diariamente, no início do fotoperíodo, ou seja, após o nascer do Sol, é feita uma colheita de biomassa. É retirada uma determinada massa de cultura, que é substituída por igual quantidade de meio de cultura fresco ou, por vezes, água ($m_{\text{substituída}}$). Uma vez que no início do fotoperíodo não existe aquecimento devido a radiação, a temperatura do sistema é igual à temperatura ambiente. Também a temperatura do meio de cultura adicionado se encontra muito próxima da temperatura ambiente ($T_{\text{adição}}$ próximo de $T_{\text{remoção}}$), sendo a diferença entre ambas tipicamente inferior a 5°C. Assim, nem a recolha de biomassa nem a adição de meio de cultura constituem trocas de calor significativas. Um pequeno balanço energético esclarece esta conclusão (consideram-se os valores de capacidade calorífica da cultura e do meio de cultura muito próximos).

$$m \cdot cp \cdot \Delta T_{\text{inicial}} + m_{\text{substituída}} \cdot cp \cdot (T_{\text{adição}} - T_{\text{remoção}}) = m \cdot cp \cdot \Delta T_{\text{final}} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow T_{\text{final}} = T_{\text{inicial}} + (T_{\text{adição}} - T_{\text{remoção}}) \cdot m_{\text{substituída}} / m$$

Como $|T_{\text{adição}} - T_{\text{remoção}}| < 5^\circ\text{C}$, e a massa de água substituída em relação à massa total do meio de cultura se encontra numa razão inferior a 1:5, ou seja, $m_{\text{substituída}}/m < 1/5$, então a variação de temperatura é inferior a 1°C. Por isso, este efeito de remoção de cultura e sua substituição por meio de cultura é desprezado.

Nutrientes

Sempre que necessário, também é adicionada uma mistura de nutrientes essenciais ao crescimento da cultura de microalgas. Esta mistura é adicionada com uma frequência relativamente baixa, e apresenta um volume diminuto quando comparado com o volume no interior do sistema (na ordem de 1:200). Além disso, a temperatura da mistura de nutrientes encontra-se próxima da temperatura ambiente e por isso também próxima da temperatura do meio de cultura, no início do fotoperíodo. Esta adição não constitui uma troca de calor relevante, sendo a variação de temperatura imperceptível, pelo que será desprezada.

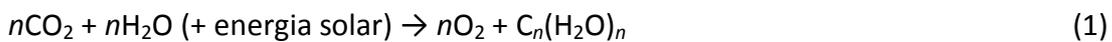
Gases de combustão

Os gases de combustão provenientes de uma indústria próxima são injectados no depósito de forma a dissolver o dióxido de carbono presente. Os restantes gases (sobretudo azoto) saem pela chaminé de exaustão no topo do depósito. O trajecto percorrido pelos gases em conduta metálica não isolada, desde a sua produção até ao local de injeção, é suficientemente longo para que se dê um arrefecimento até uma temperatura próxima da temperatura do meio de cultura. O caudal de injeção desses gases varia, uma vez que a injeção é feita de forma a manter o pH da cultura e assegurar as melhores condições de acidez para o crescimento das microalgas. Ainda assim, tipicamente o caudal de gases é

baixo. Por estes motivos, as trocas energéticas entre os gases de combustão e o meio de cultura são desprezáveis. Estes pressupostos são suportados pela observação experimental realizada na UPPM, uma vez que quando se aumenta o caudal de injeção de gases num depósito, não se observa uma variação significativa da sua temperatura.

Reacção de Fotossíntese e Respiração Celular

A reacção de fotossíntese é a responsável pela transformação de dióxido de carbono em biomassa. Ocorre durante o fotoperíodo, ou seja entre o nascer e o pôr-do-sol, e pode ser descrita pela seguinte reacção global que leva à produção de compostos orgânicos ($C_n(H_2O)_n$) (Akkerman *et al.*, 2002):



Esta reacção consome 470 kJ/mol CO_2 , sendo esta necessidade energética suprida pela radiação incidente na gama do espectro visível (400-700 nm). Esta energia corresponde apenas a 3 a 10% da radiação solar incidente no caso em que o oxigénio é removido de imediato e na sua totalidade. Se esta remoção não acontecer estes valores reduzem-se para 1 a 2% (Akkerman *et al.*, 2002; Brennan e Owende, 2010). Tendo em conta estes valores, pode ser pressuposto que o balanço energético ao sistema não é afectado pela reacção de fotossíntese.

Por seu lado, a respiração celular ocorre ao longo de todo o dia, e tem como função a manutenção do funcionamento celular. A equação global da respiração celular aeróbia é a inversa da equação de fotossíntese, excepto no que toca à energia solar. Apesar de serem conhecidos os mecanismos de respiração celular (Barsanti e Gualtieri, 2006), não se conhece de uma forma exacta a quantidade de energia que uma célula necessita para manter tal actividade, estimando-se que cerca de metade da matéria orgânica produzida por fotossíntese seja consumida para manutenção celular. O processo de respiração celular tem como objectivo a produção de energia útil para a célula, gerando também calor residual. Apesar desse calor afectar a temperatura do sistema, assume-se que a sua geração é muito baixa quando comparada com outras fontes de calor, como a radiação solar. Uma prova disso é que no período nocturno, a temperatura do sistema é próxima da temperatura ambiente, o que é consistente com o facto da respiração celular não ser suficiente para elevar a temperatura da cultura.

Bombas de recirculação

A cultura de microalgas é recirculada com o auxílio de bombas do depósito para os tubos do PBR. Estas fornecem uma determinada potência, que, além de aumentar a velocidade de escoamento da cultura, também provoca, teoricamente, um aumento de temperatura. Em termos práticos esse aumento de temperatura é imperceptível e por isso

negligenciável, pelo que o efeito das bombas no modelo e na análise de trocas de calor com o exterior é desprezado.

Radiação Solar

A principal fonte de aquecimento de um PBR é a radiação térmica. É sobretudo devido à radiação solar recebida pelo sistema que a temperatura deste se eleva acima da temperatura ambiente. Este aumento é observado através dos medidores de temperaturas dos PBRs, que, na ausência de um sistema de controlo de temperatura, apresentam valores de temperatura tanto mais altos quanto mais próximo se está da hora em que a radiação solar é máxima (tipicamente entre as 12h e as 14h).

O valor de potência de radiação perpendicular a um determinado local pode ser calculado a partir da radiação que atinge a atmosfera, tendo em conta a latitude do local. Esse valor de radiação que atinge a atmosfera é denominado Constante Solar ($G_{S_{0^\circ}}$) e apresenta um valor de cerca de 1395 W/m^2 (Incropera & DeWitt, 1998; Holman, 1997). Este valor resulta da integração das potências de radiação monocromáticas de todo o espectro de radiação. Multiplicando esta constante pelo coseno da latitude, obtém-se a potência de radiação máxima que se pode verificar. Na região onde se situa a Unidade Protótipo de Produção de Microalgas (UPPM), a latitude é de $39^\circ 40' \text{ N}$ ($\sim 39,7^\circ$). Assim, o valor máximo de radiação é de $G_{S_{39,7^\circ}} = 1395 \times \cos(39,7) = 1073 \text{ W/m}^2$. Na realidade, a radiação que chega ao solo depende de diversos factores, tais como factores meteorológicos. Além disso, esta varia ao longo do dia, aumentando desde o nascer do Sol até cerca das 14 h e diminuindo depois até ao pôr-do-sol. A determinação do valor efectivo de G_S baseou-se na medição da radiação solar incidente pela estação meteorológica da UPPM, a qual fornece leituras de 15 min em 15 min. Esses dados recolhidos foram tratados e aproximados através de uma interpolação por *splines*. A metodologia de ajuste é explicada mais à frente, na secção 3.5. A Figura 4 ilustra um perfil de radiação solar típico ao longo do dia.

Como se pode ver analisando a Figura 4, o valor máximo efectivo é inferior ao valor de 1073 W/m^2 , tal como explicado anteriormente. O tipo de perfil da variação horária da radiação solar é explicado pelo ângulo de incidência do Sol sobre a superfície terrestre. O ajuste efectuado traduz bastante bem os valores registados.

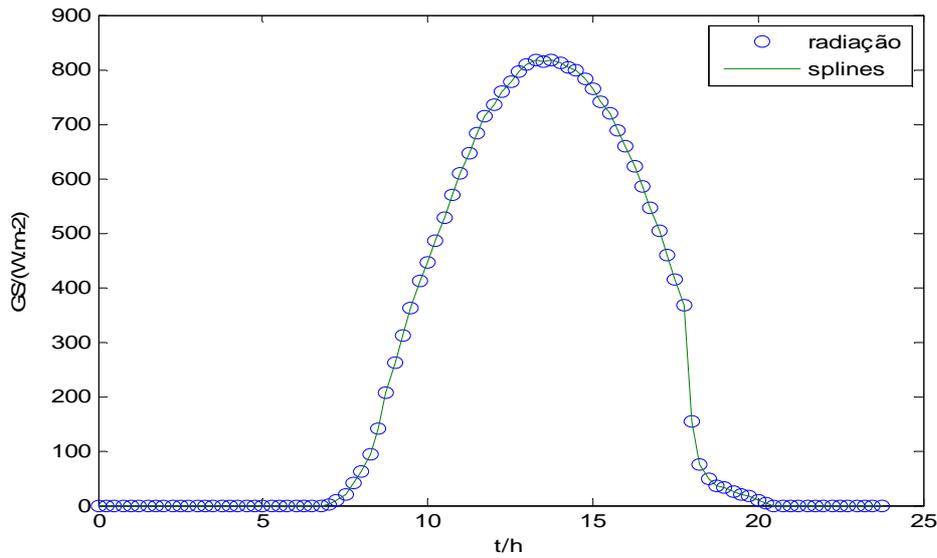


Figura 4 – Exemplo de aproximação do perfil de radiação solar por alisamento baseado em *splines*.

No entanto, nem toda a radiação recebida contribui para o aquecimento de um corpo. Uma parte da radiação é absorvida, outra reflectida, e outra transmitida (Figura 5).

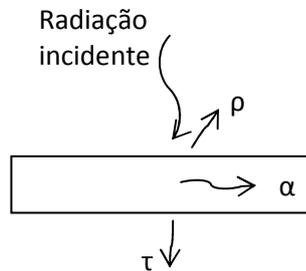


Figura 5 – Esquema da fracção absorvida (α), reflectida (ρ) e transmitida (τ) da radiação incidente.

Apenas a fracção absorvida (α) da radiação incidente contribui para o aquecimento de um corpo. Para um corpo negro, $\alpha=1$, mas como os corpos reais raramente se podem equiparar a corpos negros, $\alpha<1$. Pela Lei de Kirchhoff, a absorptividade é igual à emissividade ($\alpha=\epsilon$) para um corpo opaco (Incropera e DeWitt, 1998). Para determinar a taxa de calor recebido por radiação solar, Q_{rad} , basta multiplicar o valor de radiação, G_S , pela área exposta à radiação, A_{rad} , e pela absorptividade solar da superfície, α_S :

$$Q_{rad} = \alpha_S \cdot G_S \cdot A_{rad} \tag{2}$$

A área A_{rad} corresponde à área projectada dos tubos cilíndricos por onde circula a cultura de microalgas nos PBRs. Considerando um PBR constituído por 5 correntes que dão 6 voltas antes de serem de novo misturadas no depósito e novamente circularem, a área seria aquela correspondente a esses 6x5 tubos. No entanto, como estes tubos se situam sobrepostos, a radiação térmica que atinge os tubos superiores não é igual à que atinge os tubos inferiores, como se percebe pela análise da Figura 6-a.

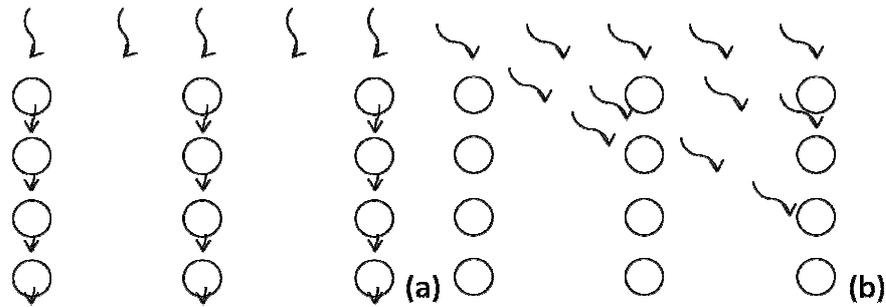


Figura 6 – Esquema da radiação incidente a) na vertical; b) na diagonal.

Para determinar a radiação térmica que passa de uma fila para outra fila de tubos é necessário determinar a fracção de radiação que é reflectida pelo material do tubo de material transparente, a fracção transmitida, e a fracção absorvida. Depois, é necessário determinar as mesmas fracções para a cultura de microalgas. Desta forma determina-se a radiação que se propaga para o tubo seguinte. Embora este raciocínio seja válido para uma radiação que incide perpendicularmente aos tubos, se o ângulo de incidência for um pouco diferente existem alterações na radiação recebida pelos tubos inferiores (Figura 6-b). De forma a contornar este problema e simplificá-lo, propõe-se uma outra, em alternativa, a qual consiste em considerar o sistema como uma caixa paralelepipedica que recebe a totalidade da radiação térmica. Esta aproximação encontra-se evidenciada na Figura 7.

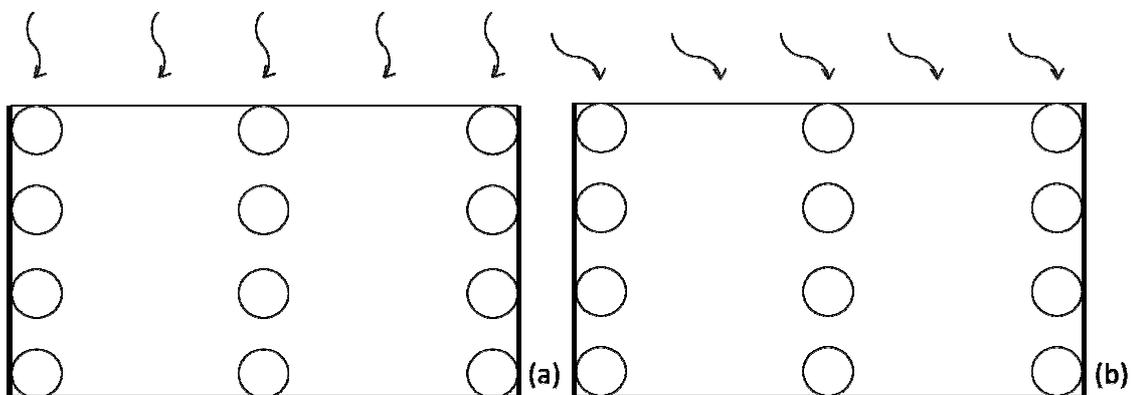


Figura 7 – Esquema da radiação incidente segundo o modelo simplificado proposto a) na vertical; b) na diagonal.

Deste modo, a área considerada é a área da face superior deste paralelepípedo. Claramente esta aproximação também apresenta alguns defeitos. Por exemplo, no caso de uma radiação perpendicular às condutas, está-se a considerar que a radiação que atinge o espaço entre dois tubos adjacentes também contribui para o aquecimento, o que não é o caso. No entanto, no caso mais comum da radiação incidir com um determinado ângulo (da esquerda para a direita como ilustrado na Figura 7-b), esta aproximação é bastante eficaz para contabilizar a radiação que atinge não só os tubos superiores, como também os inferiores. Neste caso, não se inclui a entrada de radiação solar que incide na área lateral esquerda dos PBRs (segundo a Figura 7-b), que, portanto, se considera opaca. No entanto, também não está a ser contabilizada a saída de radiação que atravessa os tubos (e que sairia pelo lado direito na Figura 7-b), compensando a não contabilização da primeira. Por outro lado, para um futuro PBR de maiores dimensões a ser construído, em que existem muitos mais tubos colocados uns ao lado dos outros, praticamente toda a radiação incidente acaba por entrar no sistema e contribuir para o aquecimento.

O valor de absorvidade solar deve ser calculado tendo em conta a camada de material transparente que compõe os tubos e a absorvidade solar da cultura de microalgas/água. Tendo em conta os valores encontrados na literatura (The Engineering Toolbox; Incropera e DeWitt, 1998), adoptou-se um valor aproximado de $\alpha_s=0,95$.

Trocas de radiação com as vizinhanças

Distingue-se aqui a radiação solar da radiação térmica trocada entre o sistema e as vizinhanças. A radiação solar tem como fonte o sol, enquanto a radiação trocada com as vizinhanças consiste no valor líquido da quantidade de radiação que é trocada entre o sistema e os corpos em seu redor, nomeadamente o solo, os objectos paisagísticos, e outros. O fluxo de radiação ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) trocada com as vizinhanças é calculada a partir de $j_{\text{rad viz}} = \epsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T_\infty^4)$, onde ϵ é a emissividade do material que constitui os PBRs, σ é a constante de Stefan-Boltzmann, T é a temperatura absoluta do PBR e T_∞ é a temperatura absoluta das redondezas. Como a temperatura do PBR não difere grandemente da temperatura das redondezas (no máximo 30°C), este fluxo tem um valor de ordem de grandeza de $\sim 0,1 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, enquanto o fluxo da radiação solar é na ordem de $\sim 1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$, como se viu anteriormente. Por isso, quando comparado com o calor de radiação solar recebido (ou mesmo com o calor trocado por convecção analisado de seguida), o valor líquido de radiação que o sistema troca com o ambiente é desprezável.

Transferência de calor por Convecção

A transferência de calor por convecção no seio do ar resulta da diferença de temperatura entre a superfície dos tubos do PBR e o ambiente. Este calor é igualmente

transferido através da parede dos tubos e no seio do meio de cultura que circula no interior dos tubos, ocorrendo assim três resistências à transferência de calor entre o interior e o exterior dos tubos. É este fenómeno convectivo que garante que a temperatura do sistema tenda a aproximar-se da temperatura ambiente, principalmente na ausência de radiação solar. De facto, este calor pode constituir uma entrada ou uma saída de energia do sistema, mas normalmente, como a temperatura do PBR se encontra acima da temperatura ambiente devido ao aquecimento por radiação, o calor transferido constitui uma saída de calor. Atendendo ao conhecimento da *driving-force* global de temperatura, este calor é calculado pela equação 3:

$$Q_{\text{conv}} = U \cdot A_t \cdot \Delta T_{\text{ml}} \quad (3)$$

onde U é o coeficiente global de transferência de calor baseado na área de transferência externa A_t e ΔT_{ml} a média logarítmica da diferença entre as temperaturas da cultura e do ambiente à entrada e à saída dos tubos do PBR. Por hipótese, assume-se que a temperatura não varia consideravelmente ao longo dos tubos dos PBRs. Esta hipótese é testada na Secção 3.6. Esta homogeneidade térmica é justificada pela grande velocidade a que a cultura circula, ou seja, pelo curto tempo de residência médio em cada tubo do reactor, e pela constante mistura das diferentes correntes. Assim, considera-se que a temperatura do sistema é aproximadamente homogénea em todo o PBR. Como tal, e como a temperatura do ar é também aproximadamente uniforme, em vez de ΔT_{ml} pode-se utilizar a diferença de temperaturas $\Delta T = T - T_{\text{amb}}$, em que T é a temperatura média nos tubos do PBR, e T_{amb} a temperatura ambiente.

A temperatura ambiente (T_{amb}) varia ao longo do dia, tal como G_s . Aliás, a temperatura ambiente está relacionada com a radiação solar. Esta influência do comportamento de G_s em T_{amb} é fácil de perceber, já que é a radiação solar que aquece a superfície terrestre e, por conseguinte, o ar ambiente. Para simular a temperatura ambiente, recorre-se ao mesmo procedimento descrito para G_s , ajustando-se valores medidos pela estação meteorológica através de uma função por *splines*. A Figura 8 ilustra este tipo de ajuste.

Como se pode ver na Figura 8, o ajuste efectuado é muito bom na aproximação à temperatura ambiente e a todas as suas variações ao longo do dia, conseguindo-se obter uma curva suave com um erro relativamente baixo.

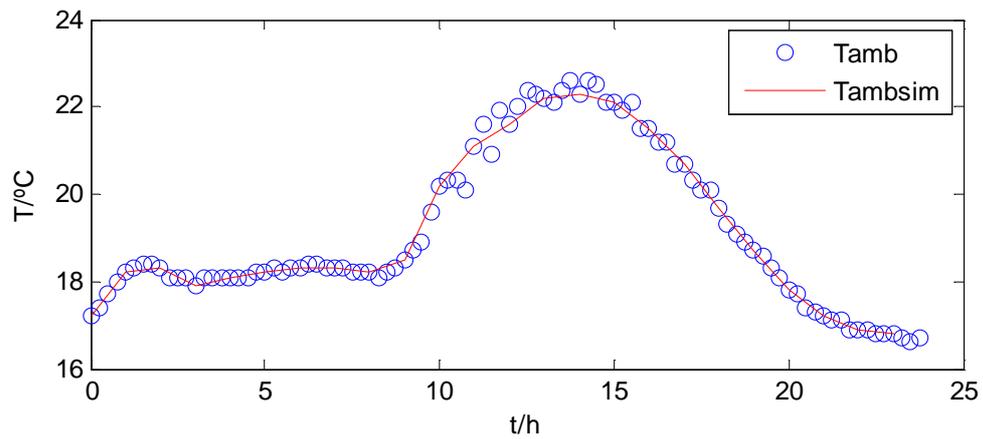


Figura 8 – Representação do ajuste por alisamento (Tambsim) dos dados de temperatura ambiente (Tamb)

A área de transferência de calor corresponde à área exposta dos tubos cilíndricos do PBR, ou seja, $A_t=5 \times 6 \times L \times \pi \times D_o$, sendo L o comprimento de cada tubo (1 volta) e D_o o seu diâmetro externo. Tendo em conta as três resistências à transferência de calor referidas anteriormente, o coeficiente global de transferência de calor (baseado na área externa A_t) é definido como:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{D_o \ln \frac{D_o}{D_i}}{2.k} + \frac{D_o}{h_i.D_i} \quad (4)$$

A condutividade térmica do material (k) de que são constituídas as paredes dos tubos (material transparente), é aproximadamente $0,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ (The Engineering Toolbox). Os coeficientes de transferência de calor, h_i e h_o , podem ser estimados a partir de correlações empíricas encontradas na literatura. O coeficiente de transferência de calor associado ao escoamento da cultura, h_i , pode ser calculado pela correlação de Dittus-Boelter – eq. 5 (Incropera e DeWitt, 1998), que é válida para $0,7 < Pr < 160$, regime turbulento (mais especificamente para $Re > 10^4$), com perfis de velocidade e temperatura perfeitamente estabelecidos ($L/D > 10$) em tubos lisos, como se assume ser o caso. Todas estas condições são verificadas experimentalmente: $L/D \sim 2700$, $Re \sim 5,3 \times 10^4$ e $Pr \sim 7$.

$$Nu = 0,023.Re^{0,8}.Pr^n \quad (5)$$

Nesta correlação, $n=0,3$ (arrefecimento), ou $n=0,4$ (aquecimento). Normalmente, durante o dia, a temperatura do sistema situa-se acima da temperatura ambiente pelo que ocorre arrefecimento. A altura em que isto não acontece é no início do fotoperíodo, quando a transferência de calor por radiação começa a aquecer o sistema. De noite, após um período de arrefecimento, a temperatura do sistema fica próxima da temperatura ambiente. Por isso, assume-se $n=0,3$ para o caso mais crítico, que é o arrefecimento do sistema com uma temperatura superior à ambiente, com o objectivo de evitar o sobreaquecimento dos tubos. Apesar desta escolha do valor de n ser uma aproximação e de provocar alguma variação no cálculo de h_i , na verdade não tem muita influência no valor final do coeficiente

global de transferência de calor já que este coeficiente toma valores elevados face a h_0 (~ 3000 vs. $\sim 10 \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$). Além disso, há que ter em conta que o erro típico das correlações empíricas é da ordem de 20% (Incropera e DeWitt, 1998).

Para aplicar esta correlação, recorre-se ao cálculo dos números adimensionais Re , Pr , determina-se Nu pela correlação, e calcula-se h_i . Assume-se que a cultura apresenta propriedades próximas às da água, devido à baixa concentração de biomassa e às semelhanças de propriedades entre a biomassa e a água.

$$Re = \rho \cdot D_i \cdot v / \mu \quad (6)$$

$$Pr = \mu \cdot c_p / k \quad (7)$$

$$Nu = h_i \cdot D_i / k \quad (8)$$

Para o cálculo de h_0 , recorre-se à correlação de Churchill e Bernstein (equação 9) para escoamento transversal no exterior de condutas (Incropera e DeWitt, 1998; Çengel, 1998), válida para $Re \cdot Pr > 0,2$. Neste caso, o valor experimental para este produto é $Re \cdot Pr \sim 6 \times 10^3$.

$$\overline{Nu_D} = 0,3 + \frac{0,62 \cdot Re^{1/2} \cdot Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0,4}{Pr}\right)^{2/3}\right]} \left[1 + \left(\frac{Re}{282000}\right)^{5/8}\right]^{4/5} \quad (9)$$

Para determinar os valores dos números adimensionais Re , Pr e Nu incluídos na eq. 9, recorre-se às propriedades do ar (The Engineering Toolbox) à temperatura média estimada, sendo necessário ter uma estimativa da velocidade média do vento. Essa estimativa é um pouco difícil de determinar devido à variabilidade natural da velocidade linear do vento. Para estimar a velocidade média do vento recorre-se aos valores determinados de 15 min em 15 min pela estação meteorológica da UPPM (Figura 9). No entanto, é preciso ter em conta que estes valores são obtidos a uma determinada altura do chão, sem quaisquer efeitos barreira, pelo que são valores acima dos verificados nos PBRs. Estes valores são registados (em km/h) sem nenhuma casa decimal, pelo que apresentam erros de arredondamento relativamente elevados. Além disso, a velocidade do vento varia substancialmente num curto espaço de tempo. Como exemplo, são mostrados na Figura 10 os valores recolhidos de velocidade do vento para um período de tempo em Dezembro de 2009 e na Figura 11 apresenta-se a variação horária da velocidade do vento ao longo de um dia, no final do Verão.



Figura 9 – Estação meteorológica da UPPM

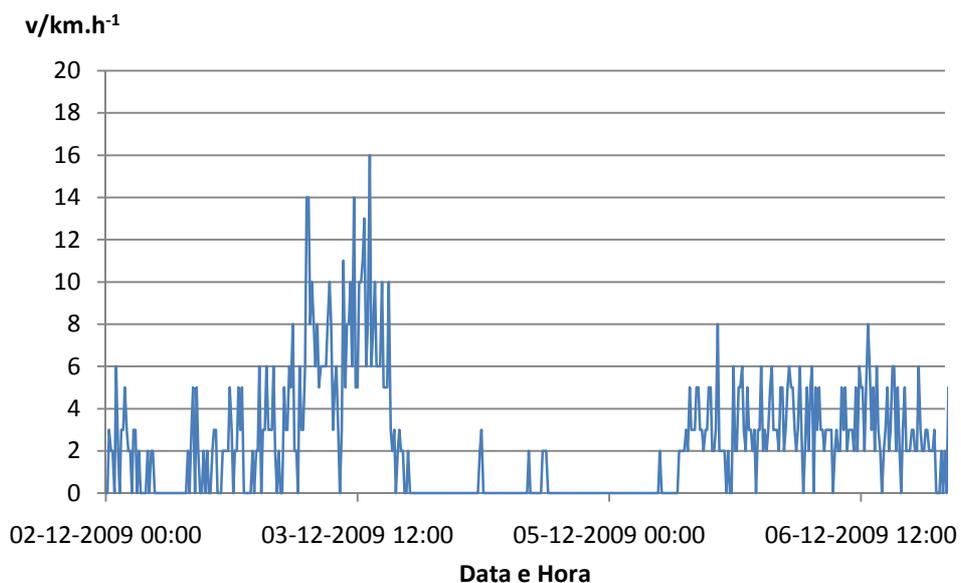


Figura 10 – Velocidade do vento registada pela estação meteorológica da UPPM entre 2 e 6 de Dezembro/2009.

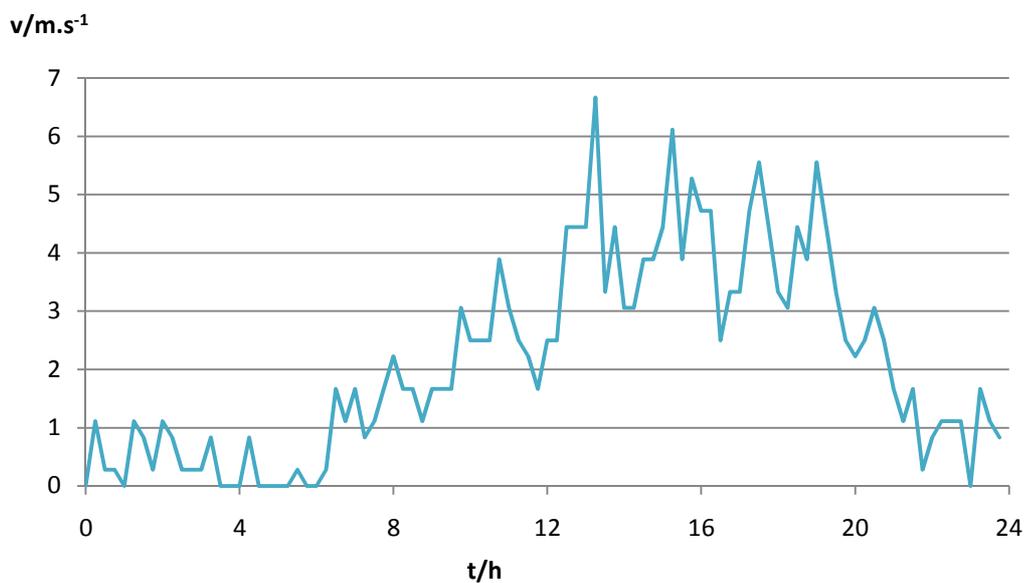


Figura 11 – Exemplo da variação da velocidade do vento ao longo de um dia de Verão.

Note-se que, como referido, os valores não têm nenhuma casa decimal, pelo que um valor de 0 pode na verdade ser qualquer valor até 0,5 km/h exclusive. Como se pode ver, a velocidade do vento varia ao longo do dia e apresenta bastante variabilidade. Como tal, torna-se difícil definir um valor ou perfil para esta variável. Apesar desta enorme variabilidade e ao cálculo de um velocidade média do vento estar associada uma elevada

incerteza, optou-se por determinar valores médios indicativos da sua ordem de grandeza. No caso do dia apresentado na Figura 11, o valor obtido para a velocidade média foi de 2,1 m/s. Através do estudo dos valores registados, chegou-se a um valor de velocidade média de 0,5 m/s no Inverno e de 2,0 m/s no Verão. Esta diferença na velocidade média, consoante a estação do ano, é explicada pela maior temperatura ambiente que provoca maiores deslocamentos de massas de ar no Verão.

Tendo em conta que os valores apresentados para a velocidade média do vento têm um erro relativamente elevado e são sobrestimados por serem recolhidos a maior altitude, o valor de 2,0 m/s é uma estimativa razoável para a velocidade média do vento, tendo este valor sido usado para o cálculo de h_o no Verão. Com os coeficientes de transferência de calor determinados, é possível então calcular o valor de U , e assim calcular Q_{conv} , recorrendo à equação 3.

3.2 Desenvolvimento do Modelo sem Recurso a um Sistema de Controlo de Temperatura

Uma vez conhecidos os principais factores que contribuem para a variação de temperatura de um PBR ao longo do tempo, é possível construir um modelo que permita simular esse perfil. Com esse modelo, pretende-se compreender melhor como ocorrem as variações de temperatura para que seja possível tomar medidas para o seu controlo. Nesta secção é desenvolvido um modelo para simular a temperatura do meio de cultura num PBR sujeito a condições ambientais sem recurso a um sistema de controlo de temperatura.

Um fotobiorreactor pode ser visto como um conjunto de tubos cilíndricos conectados a um tanque, por hipótese perfeitamente agitado. Como tal, o balanço entálpico ao meio de cultura nos tubos é definido pelo balanço microscópico, dado pela equação 10 (Bird *et al.*, 2002).

$$\rho \cdot cp \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho \cdot cp \cdot v \cdot \frac{\partial T}{\partial z} + k \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \cdot \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (10)$$

Nesta equação, T refere-se à temperatura do meio de cultura, ρ é a sua massa volúmica, cp a sua capacidade calorífica, v a sua velocidade, k a sua condutividade térmica, t é o tempo, z é a variável de comprimento axial ($z \in [0, L]$) e r é a variável de comprimento radial ($r \in [0, R]$). Os parâmetros físicos são considerados constantes, porque não variam substancialmente na gama de temperatura estudada. Esta equação precisa de ser completada com uma condição inicial (C.I.) e condições fronteira (C.F.) como se apresentam a seguir:

$$\text{C.I.: } t = 0: T(t, r, z) = T_{\text{inicial}}(r, z)$$

$$\text{C.F.: } z = 0: T|_{z=0} = T_d$$

$$z = L: T|_{z=L} = \frac{\tau}{n^{\circ} \text{ de tubos}} \frac{\partial T_d(t)}{\partial t} + T_d(t)$$

$$r = 0: \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0} = 0$$

$$r = R: k \cdot \frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R} = U \cdot [T_{\text{amb}}(R,z) - T(R,z)] + \epsilon \cdot G_S(t,z)$$

T_d refere-se à temperatura no depósito. A condição fronteira para $z=L$ foi definida com base num balanço energético ao meio de cultura no depósito, resolvido em ordem à temperatura de entrada no depósito (que é a temperatura de saída dos tubos, $T|_{z=L}$), onde τ é o tempo de residência. Para esta equação diferencial às derivadas parciais ser resolvida, seria necessário ter acesso a um código de integração robusto, bem como conhecer valores de radiação para cada fila horizontal de tubos. A resolução desta equação seria morosa devido à sua complexidade, e teria problemas devido ao elevado número de dados necessários. Por esses motivos, foram feitas aproximações, de modo a ser possível determinar a temperatura do meio de cultura de uma forma eficiente e utilizando os dados existentes, e evitando estimar quantidades afectadas por níveis de incerteza elevados, as quais, em última instância, afectariam negativamente a exactidão das estimativas fornecidas pelo modelo.

Neste contexto, optou-se neste trabalho por desenvolver um modelo parcimonioso, com número reduzido de parâmetros, mas suficientemente flexível e rigoroso para captar as tendências térmicas que se pretendem descrever. Como o processo consiste numa mistura permanente das correntes no depósito, não variando muito as propriedades da cultura, nomeadamente a concentração de biomassa, pode-se entender o sistema como pseudo-homogéneo. Desta forma, o sistema pode ser modelado a partir de um balanço macroscópico sob o ponto de vista de entradas e saídas (eq. 2 e 3) da seguinte forma:

$$\rho \cdot V_t \cdot c_p \cdot dT/dt = Q_{\text{rad}}(t) - Q_{\text{conv}}(t) - Q_{\text{tr}}(t) \quad (11)$$

onde Q_{tr} é o calor que é necessário transferir do processo para que a temperatura se mantenha constante (unidades em watt). A condição inicial para esta equação é $T(0)=T_{\text{amb}}(0)$, ou seja, a temperatura inicial é igual à temperatura ambiente. Quando não existe o recurso ao sistema de controlo da temperatura, $Q_{\text{tr}}=0$. A equação a integrar, por substituição das eq. 2 e 3 na eq. 11, para $Q_{\text{tr}}=0$, é a seguinte:

$$\rho \cdot V_t \cdot c_p \cdot dT/dt = \alpha_S \cdot A_{\text{rad}} \cdot G_S(t) - U \cdot A_t \cdot (T(t) - T_{\text{amb}}(t)) \quad (12)$$

Mais uma vez, a condição inicial corresponde ao primeiro valor de temperatura ambiente registado no período em análise. Dependendo de G_S e T_{amb} , obtêm-se diferentes perfis de variação de T . Desta forma, pode-se simular a temperatura do sistema em vários cenários. A equação 12 é muito mais simples de ser resolvida que a equação complexa 10. A hipótese de homogeneidade da mistura é crucial para a aproximação realizada. Esta aproximação é discutida na secção 3.6.

Uma vez construído o modelo, é necessário proceder à sua validação com dados reais. Essa validação é feita também na secção 3.6. Após validação, este modelo pode ser utilizado para prever o perfil de temperatura de um fotobiorreactor ao longo do dia, sujeito a determinadas condições ambientais. Esse trabalho é apresentado na secção 3.7.

3.3 Balanço energético em estado estacionário

Para determinar a necessidade de aquecimento ou arrefecimento de modo a manter a cultura no intervalo 20-30°C, é feito um balanço em estado estacionário, a partir da equação 12:

$$Q_{tr}(t) = Q_{rad}(t) - Q_{conv}(t) \quad (13)$$

Resolvendo esta equação, é possível calcular a quantidade de calor que é necessário fornecer (quando a temperatura é inferior a 20°C) e remover (quando a temperatura é superior a 30°C). É também possível conhecer os calores máximos (ou valores-pico) a fornecer ou remover. Este balanço é depois aplicado ao projecto de novos PBRs de maiores dimensões no Capítulo 4 (Aplicação do Modelo ao Projecto de Novos Fotobiorreactores). Conhecendo esses valores, pode-se projectar um sistema de permutadores de calor que satisfaça as necessidades para os previsíveis PBRs após o *scale-up*. Essa análise é realizada no Capítulo 5 (Análise de Soluções de Controlo de Temperatura dos PBRs).

3.4 Desenvolvimento de um Modelo para Simulação da Temperatura num PBR com Aspersão

O objectivo do controlo de temperatura dos PBRs é manter a temperatura da cultura entre os 20°C e os 30°C durante o fotoperíodo, de modo a optimizar a produção de biomassa. Fora do fotoperíodo, pretende-se que a cultura não atinja temperaturas que prejudiquem a manutenção celular, como por exemplo temperaturas muito baixas ou mesmo negativas.

Actualmente, o sistema de controlo de temperatura consiste em usar a água que se encontra disponível em reservatórios na unidade industrial, recorrendo a aspersores que, ao pulverizarem a água, garantem a manutenção de uma camada de água em contacto com os PBRs, contribuindo para a moderação térmica do meio de cultura – Figura 12. Esta água escorre pelo exterior dos tubos dos PBRs e é reunida na base, voltando seguidamente ao reservatório. A este processo de troca de calor recorrendo a aspersores denomina-se aspersão. A troca de calor por aspersão apresenta perdas de água devido à evaporação e ao

arraste pelo vento, pelo que um certo volume de água é periodicamente reposto no reservatório. É de notar que este reservatório alimenta os aspersores existentes em todos os PBRs da UPPM.



Figura 12 – Pulverização de água sobre os tubos (aspersores).

Para melhor perceber as capacidades de aproveitamento de água do reservatório como fluido térmico, é necessário analisar como a sua temperatura varia ao longo do dia. Para tal, recorre-se a um balanço energético à camada de água sobre os PBRs, um balanço energético à água no reservatório e um balanço energético ao meio de cultura.

Balanço energético à água no reservatório

O reservatório contendo a água usada para o controlo de temperatura do meio de cultura consiste num tanque paralelepípedo, com o topo aberto, e localizado dentro de um edifício fechado. O ar em contacto com a água encontra-se aproximadamente à temperatura ambiente. As paredes e o tecto do edifício são opacos, pelo que não existe radiação solar incidente no reservatório. Assim, as principais trocas de calor para a água são a transferência de calor por convecção natural, a evaporação, a troca líquida de radiação térmica com as paredes e o tecto do edifício, e a energia associada às correntes de entrada e saída da água. A água sai do reservatório para os aspersores com o caudal mássico m , sendo o calor correspondente $Q_{saída}$. As entradas de água no reservatório (cujo calor total associado é $Q_{entrada}$) provêm dos aspersores e da corrente de água que é renovada para compensar as perdas nos aspersores. Estima-se que cerca de 20% da água é perdida nos aspersores, pelo que 20% da água é renovada. Este é um dado empírico. O balanço energético à água no reservatório resulta portanto na eq. 14:

$$\rho \cdot V_{res} \cdot c_p \cdot dT_a / dt = -Q_{conv\ nat} - Q_{evap} - Q_{rad} + Q_{entrada} - Q_{saída} \quad (14)$$

onde ρ é a massa volúmica da água, V_{res} é o volume de água no reservatório, e c_p é a capacidade calorífica a pressão constante da água. A condição inicial é $T_a(0)=T_{amb}(0)$, ou seja, a temperatura inicial da água é igual à temperatura ambiente inicial. Os calores trocados são definidos por:

$$Q_{conv\ nat} = h \cdot A \cdot (T_a - T_{amb}) \quad (15)$$

$$Q_{evap} = N_A \cdot M \cdot \Delta H_v \quad (16)$$

$$Q_{rad} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_a^4 - T_{amb}^4) \quad (17)$$

$$Q_{entrada} = 0,8 \cdot m \cdot c_p \cdot \Delta T_{entrada} + 0,2 \cdot m \cdot c_p \cdot \Delta T_{renovação} \quad (18)$$

$$Q_{saída} = m \cdot c_p \cdot \Delta T_{saída} \quad (19)$$

onde h é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural, A é a área de transferência de calor (área da interface água-ar), M é a massa molar da água, N_A é a velocidade de difusão molar do vapor de água no ar, ΔH_v é a entalpia de vaporização da água, ϵ é a emissividade da água, σ é a constante de Stefan-Boltzmann e $\Delta T_{entrada}$, $\Delta T_{renovação}$, $\Delta T_{saída}$ são, respectivamente, as diferenças entre as temperaturas no PBR, da água de renovação, e da água no reservatório e a temperatura de referência. A velocidade de difusão molar é definida como (Cussler, 1997):

$$N_A = k_G \cdot A \cdot \left(\frac{P^\sigma}{R \cdot T_a} - \frac{P_{amb}}{R \cdot T_{amb}} \right) \quad (20)$$

onde k_G é o coeficiente de transferência de massa, P^σ é a pressão de saturação da água à temperatura T_a , P_{amb} é a pressão parcial da água no ar, e R é a constante dos gases perfeitos. Para determinar o coeficiente de transferência de massa k_G e o coeficiente de transferência de calor h , é necessário recorrer a correlações empíricas. Neste caso, usou-se uma correlação empírica para determinar h e a analogia de Chilton-Colburn $j_D=j_H$ entre transferência de calor e transferência de massa para calcular k_G .

$$k_G = \eta_{ar} \cdot h \cdot \frac{\left(\frac{Pr_{ar}}{Sc} \right)^{2/3}}{\mu_{ar} \cdot c_{par}} \quad (21)$$

onde η_{ar} é a viscosidade dinâmica do ar, μ_{ar} é a viscosidade do ar, c_{par} é a capacidade calorífica do ar. Estas propriedades utilizadas referem-se ao ar porque é no ar que se processa a transferência de massa. Os números adimensionais Schmidt (Sc) e Prandtl (Pr) são definidos por:

$$Sc = \eta_{ar} / D_a \quad (22)$$

$$Pr_{ar} = \mu_{ar} \cdot c_{par} / k_{ar} \quad (23)$$

onde D_a é a difusividade do vapor de água no ar, e k_{ar} é a condutividade térmica do ar. Para o coeficiente de transferência de calor:

$$h = Nu \cdot k_{ar} / L \quad (24)$$

onde a dimensão característica é definida por:

$$L = A/P \quad (25)$$

em que A é a área da superfície da água no reservatório e P é o seu perímetro. O número adimensional Nusselt (Nu) é calculado a partir das correlações empíricas (Incropera e DeWitt, 1998):

1) sendo a temperatura da água superior à temperatura ambiente:

$$Nu = 0,15.Ra^{1/3} \quad (26)$$

2) sendo a temperatura da água inferior à temperatura ambiente:

$$Nu = 0,27.Ra^{1/4} \quad (27)$$

O número de Rayleigh, Ra, é calculado pelo produto do número de Grashof e do número de Prandtl:

$$Ra = Gr.Pr_{ar} \quad (28)$$

O número de Grashof é definido a partir da seguinte expressão:

$$Gr = \beta.g.L^3 \cdot |T_a - T_{amb}| / \eta_{ar}^2 \quad (29)$$

onde β é o coeficiente de expansão térmica do ar, calculado como o inverso da temperatura média em kelvin, g é a aceleração da gravidade, e η_{ar} é a viscosidade cinemática do ar.

Balanco energético à camada de água sobre os tubos

O balanço energético à camada de água sobre os tubos, usada para controlo de temperatura do meio de cultura, é realizado considerando como hipótese que a temperatura da água não varia substancialmente ao longo do seu percurso nos tubos, pelo que se pode considerar homogénea. Com esta hipótese simplificativa desprezam-se variações de temperatura no espaço mas ganham-se simplicidade e velocidade de cálculo. No balanço à água que se encontra em contacto com os tubos é necessário considerar a radiação solar (Q_{radc}), a evaporação para o ambiente (Q_{evapc}), o calor associado às entradas e saídas de água do reservatório, o calor transferido por convecção para o ambiente (Q_{convc}) e o calor recebido proveniente do interior dos tubos (Q_{tr}). É este último que vai efectivamente permitir o controlo de temperatura do meio de cultura. Para a radiação solar, considera-se uma absorvidade de 0,20, que é a estimativa da radiação solar térmica absorvida por uma camada de água com uma espessura cerca de 1 mm. Para a transferência de calor por convecção para o ambiente e para o calor associado à evaporação, considera-se que a área de transferência de calor e de evaporação (A_{tagua}) corresponde a metade da área total da superfície dos tubos, ou seja, que apenas metade da superfície dos tubos se encontra molhada. O balanço resulta na equação seguinte, onde T_c é a temperatura da água usada no sistema de controlo de temperatura:

$$\rho.V_c.c_p.dT_c/dt = Q_{tr} - Q_{convc} + Q_{radc} - Q_{evapc} + (Q_{saída} - Q_{entrada c})/nPBR \quad (30)$$

onde nPBR se refere ao número de PBRs existentes e pelos quais o caudal de água usada no sistema de controlo de temperatura é repartido. Como condição inicial considera-se que a temperatura inicial da água é igual à temperatura ambiente inicial. Os diversos calores transferidos nesta equação são definidos por:

$$Q_{tr} = U_c.A_{tagua}.(T-T_c) \quad (31)$$

$$Q_{entrada c} = m.c_p.\Delta T_{entrada} \quad (32)$$

$$Q_{convc} = U_a.A_{tagua}.(T_c-T_{amb}) \quad (33)$$

$$Q_{radc} = \alpha_s.G_s.A_{rad} \quad (34)$$

$$Q_{evap2} = N_A.M.\Delta H_v \quad (35)$$

onde α_s é a absorptividade solar média da água. No cálculo de Q_{tr} foi utilizada a diferença simples de temperaturas, em vez da média logarítmica, devido às hipóteses de homogeneidade térmica dos fluidos envolvidos. Os coeficientes globais de transferência de calor são calculados a partir das seguintes expressões:

$$\frac{1}{U_c} = \frac{D_o \ln \frac{D_o}{D_i}}{2.k} + \frac{D_o}{h_i.D_i} \quad (36)$$

$$\frac{1}{U_a} = \frac{1}{h_o} + \frac{1}{h_{ia}} \quad (37)$$

O coeficiente de transferência de calor, h_{ia} , é calculado seguindo a mesma metodologia e correlações que no caso de h_o (substituindo obviamente as propriedades do ar pelas da água), uma vez que também se trata de escoamento externo. Neste balanço, a *driving-force* para o calor associado à evaporação, que corresponde à diferença entre a pressão de saturação e a pressão parcial da água no ar ambiente, apresenta um grande efeito no resultado final. Por isso, para o cálculo da pressão parcial, e para manter o rigor dos cálculos, foram utilizados os dados de humidade relativa do ar recolhidos pela estação meteorológica existente no local. Através de alguns testes preliminares de modelação, verificou-se que a velocidade do vento também apresentava uma grande influência nos resultados, pelo que em vez de ser estimada através de um valor médio, foram utilizados os dados da estação meteorológica ao longo do tempo.

Balanço energético ao meio de cultura

O balanço ao meio de cultura é traduzido por:

$$\rho.V.c_p.dT/dt = Q_{rad} - Q_{tr} - Q_{conv} \quad (38)$$

A condição inicial para esta equação é $T(0)=T_{amb}(0)$ (a temperatura inicial é igual à temperatura ambiente inicial). Com os três balanços (ao meio de cultura, à água no

reservatório, e à água sobre os tubos dos PBRs) é possível prever a temperatura do meio de cultura quando se recorre ao sistema de controlo de temperatura por aspersão. Este resultado pode ser comparado com o resultado sem recurso ao sistema de controlo de temperatura por aspersão de modo a verificar qual o efeito associado a este sistema.

Uma vez construído o modelo de simulação da temperatura do meio de cultura de microalgas, é necessário proceder à validação do mesmo. Essa validação é apresentada na secção 3.6. Após a validação, este modelo pode ser utilizado na previsão do perfil temperatura de um PBR ao longo do dia, sujeito a determinadas condições atmosféricas, como se discute na secção 3.7.

3.5 Metodologia Utilizada na Implementação Computacional dos Modelos

Definidos os balanços energéticos a resolver, é necessário agora determinar os valores das diferentes variáveis envolvidas. Só assim é possível simular o perfil de temperatura do meio de cultura de um PBR e partir para o controlo dessa temperatura. Além de se ter em conta que muitas dessas variáveis apresentam variações ao longo do dia, também se tem que considerar que existem variações ao longo do ano, nomeadamente na radiação solar e temperatura ambiente. Por isso, foram criados diferentes cenários, de modo a analisar o que ocorre em diferentes alturas do ano.

Os cenários definidos para utilização no modelo são os seguintes:

- Cenário 1 – dia típico de Verão;
- Cenário 2 – dia extremo de Verão;
- Cenário 3 – dia típico de Primavera/Outono;
- Cenário 4 – dia típico de Inverno;
- Cenário 5 – dia extremo de Inverno;

Os cenários 1, 3 e 4 analisam períodos típicos do ano. O cenário 3 traduz tanto a estação da Primavera como a do Outono devido à semelhança entre ambas, quer a nível de temperatura como a nível de radiação solar. Os cenários 2 e 5 são cenários *worst case*, ou seja, têm como objectivo analisar o que acontece em situações extremas, isto é, nos dias mais quentes e nos dias mais frios do ano.

Além destes cenários foram também organizados os dados mês a mês para que se possa simular o que acontece num determinado mês, de um determinado ano. Foram analisados dados desde Maio de 2009 até Janeiro de 2011. Este intervalo de tempo está relacionado com a disponibilidade de dados registados pela estação meteorológica no período de desenvolvimento deste trabalho. Ao contrário dos cenários anteriores em que é analisado um dia típico de um determinado período, no caso dos dados mensais é analisado todo o mês de forma a perceber como decorre a evolução térmica ao longo desse período.

Os dados necessários para inputs do modelo são a radiação solar, a temperatura ambiente, e a velocidade do vento. Estes dados são recolhidos pela estação meteorológica da UPPM, que regista os valores destas variáveis de 15 em 15 minutos. Esses dados são tratados, organizados, e é feito um ajuste através de uma função por *splines* (“nearestinterp”) recorrendo ao *software* Matlab® de modo a obter funções que traduzam a variação aproximada da radiação solar e da temperatura ambiente ao longo do período considerado como se exemplificou na Figura 4 e na Figura 8. O valor de velocidade média do vento é fornecido pelo utilizador, uma vez que não se justificava a aproximação por uma função interpoladora, como é explicado mais à frente. A função desenvolvida que realiza todos estes passos tem o nome “fitdata.m”. Esta função, escrita na linguagem Matlab®, também guarda os coeficientes das funções de interpolação num ficheiro “.mat” de modo a que eles estejam sempre disponíveis. Desta forma, não é necessário analisar os dados em bruto, mas apenas é necessário avaliar os coeficientes das funções interpoladoras. Deste modo ganha-se velocidade de cálculo. Também foi definida uma função denominada “pbr.m” que fornece, de forma expedita, as dimensões do PBR em estudo. Esta função foi desenvolvida de modo a tornar mais fácil a alteração das dimensões dos PBRs e a simplificar o estudo de PBRs diferentes, nomeadamente quando se trata de uma análise de *scale-up*.

Estas duas funções trabalham os *inputs* do programa principal, chamado “simulador.m”. Para realizar um balanço sem recurso ao sistema de controlo de temperatura este programa utiliza a função “balanço.m”. Um balanço com recurso ao sistema de controlo de temperatura utiliza a função “balancotr.m”. O cálculo do calor que é necessário fornecer ou retirar ao sistema para o manter em estado estacionário é feito pela função “Calort.m”.

A integração do balanço energético diferencial é realizada utilizando a função ODE45, que integra equações diferenciais ordinárias do tipo $dy/dt=f(t,y)$ segundo o método de Runge-Kutta explícito de 4ª e 5ª ordem, também conhecido por método de Dormand-Prince. Como o método é de 4ª e 5ª ordem, o erro numérico em que ele incorre é de 5ª e 6ª ordem, ou seja, bastante baixo quando comparado com outras fontes de erro, tais como erros de medição nos dados recolhidos, erros de estimativa nos coeficientes estimados, entre outros.

Todas as funções desenvolvidas neste trabalho na linguagem Matlab podem ser consultadas no Anexo II. Com estas funções foi possível validar os modelos e partir para a sua aplicação, quer na previsão de perfis de temperatura, quer na determinação das necessidades energéticas de fotobiorreactores.

3.6 Validação dos Modelos Desenvolvidos

Validação da Hipótese de Homogeneidade do Meio de Cultura

Numa primeira fase, foi necessário validar a hipótese de homogeneidade térmica do meio de cultura dos fotobiorreactores. Para isso, é preciso verificar se a temperatura medida ao longo dos tubos do PBR não varia substancialmente. Foram utilizados dados da AlgaFuel de temperatura da cultura recolhidos em quatro locais distintos de um PBR: à entrada dos tubos após saída do depósito, a meio do comprimento total dos tubos (meia volta), na extremidade dos tubos (1 volta), e à saída dos tubos antes da entrada no depósito. A Figura 13 ilustra os resultados obtidos. Os resultados relativos à temperatura do meio de cultura de PBRs encontram-se normalizados, de modo a proteger os dados da empresa AlgaFuel. No entanto, a normalização efectuada permite manter a forma do perfil de temperatura, pelo que as conclusões resultantes da análise gráfica se mantêm.

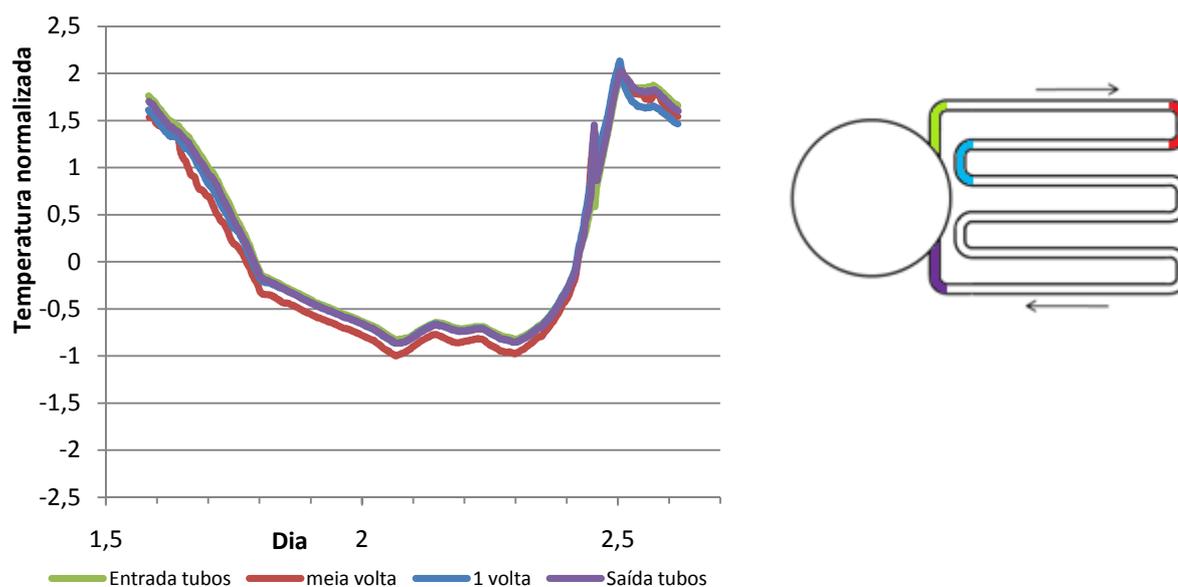


Figura 13 – Perfis de temperaturas em vários locais de um PBR ao longo do tempo.

Como se pode verificar, as diferenças de temperatura são muito pouco significativas excepto para as medições a meio dos tubos (meia volta). Entre as medições neste local e as medições nos restantes pontos a diferença de temperatura não ultrapassa 1°C de forma significativa. Por isso, como aproximação e cometendo um erro máximo de 1°C (na ordem de 3-5%), a hipótese da homogeneidade térmica da cultura é razoável.

Foi feito um estudo posterior recorrendo a um termómetro laser onde se mediram as temperaturas em vários locais de um PBR, tal como anteriormente. Com este equipamento é

possível uma medição mais prática e expedita da temperatura. Os resultados destas medições permitiram concluir que a diferença máxima de temperaturas do meio de cultura dentro dos tubos é de 1,1°C, o que está de acordo com os dados da Figura 13. O perfil obtido neste último estudo também estava de acordo com os dados representados na Figura 13.

Validação dos Modelos Desenvolvidos

Numa segunda fase, foi necessário validar os modelos desenvolvidos nas duas situações: com recurso ao sistema de controlo de temperatura por aspersão, e sem recurso a esse sistema. Para isso, recorreu-se a dados de temperatura de um PBR registados na UPPM para essas duas situações.

Para realizar essa análise, foram utilizados dados recolhidos entre 26/8/09 e 28/9/09, e entre 2/12/09 e 10/1/10, respeitantes à temperatura de um PBR, temperatura ambiente, radiação solar, e velocidade média do vento. Esses dados de temperatura de um PBR foram cedidos pela AlgaFuel. Eles foram analisados e tratados de modo a eliminar possíveis erros de leitura ou registo (como dados incoerentes de radiação solar nocturna, e outros). De seguida, foi feita uma simulação do perfil esperado, utilizando a metodologia de simulação desenvolvida anteriormente, tendo como inputs o perfil de temperatura ambiente e de radiação solar verificados naqueles dias e ainda a velocidade média do vento. Note-se que, como o modelo recorre a funções de interpolação dos dados de temperatura ambiente e radiação, é natural que exista um erro devido a essa aproximação. Este erro contribui para o erro final que resulta da diferença entre perfis de temperaturas simulado e real. A partir da simulação realizada, obteve-se um perfil de temperatura simulado, o qual foi comparado com o perfil de temperatura observado através das medições realizadas.

A validação do modelo foi dividida em três partes, pois existiam dois conjuntos de dados distintos, um no período de Inverno, entre Dezembro e Janeiro, e um para o período de Verão/Outono, entre Agosto e Setembro, ambos sem recurso à aspersão, e um outro período de Verão com recurso à aspersão. Um subconjunto de dados foi usado para a validação no Verão sem utilização do sistema de controlo de temperatura, outro para a validação no Inverno também sem utilização do sistema de controlo de temperatura, e um terceiro para a validação no Verão com utilização dos aspersores. No período de Inverno estudado em que o sistema de controlo de temperatura por aspersão esteve operacional, não foram atingidas temperaturas que activassem esse sistema. Por isso, esse processo de controlo térmico nunca chegou a ser utilizado.

As dimensões do PBR utilizadas na validação dos dados são as correspondentes ao PBR onde foram feitas as medições de temperatura na Unidade de Produção de Microalgas. Esse PBR é denominado PBR X, e tem a particularidade de possuir mais tubos, tanto na vertical como na horizontal que um PBR típico. Além deste aspecto, não existem diferenças de maior entre este PBR e um PBR típico.

Foi ainda realizada uma análise de sensibilidade do modelo sem recurso ao sistema de controlo de temperatura, de modo a perceber como cada variável e parâmetro contribuem para o resultado final de temperatura do meio de cultura das microalgas. Esse trabalho pode ser consultado no Anexo I. Concluiu-se que as variações no calor transferido devido à radiação solar são as que mais afectam o resultado final, seguidas das variações no calor transferido por convecção para o ar ambiente.

Verão sem utilização de aspersão

Nesta análise, foram utilizados dados de um mês de Setembro. Os dados de temperatura do PBR X, de temperatura ambiente e de radiação solar foram trabalhados de modo a poderem ser utilizados pelo simulador, seguindo a metodologia descrita anteriormente. A temperatura ambiente e radiação solar foram aproximadas por uma função interpoladora, como referido.

Foi realizada uma simulação alterando as variáveis de acordo com a operação do PBR, nomeadamente através da variação do volume do mesmo (segundo informação fornecida pelos responsáveis do processo). Os resultados relativos ao período considerado na simulação encontram-se representados na Figura 14. Esta figura pode ser observada em maior detalhe no Anexo III.

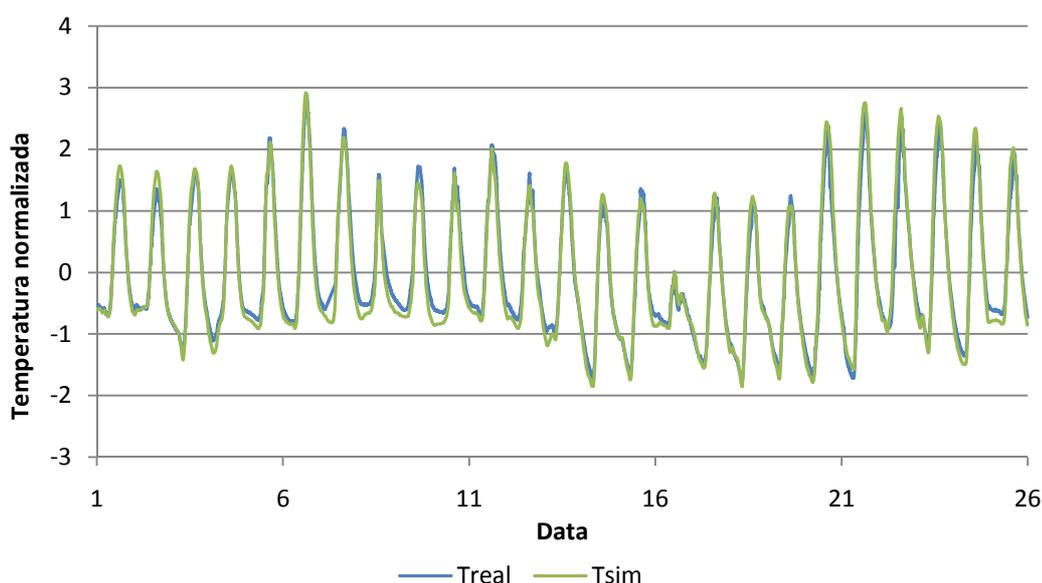


Figura 14 – Comparação de dados reais (Treal) com os resultados das simulações (Tsim), para a temperatura do meio de cultura no período considerado (um mês de Setembro).

Como se pode verificar pelos resultados da Figura 14, o modelo utilizado aproxima bastante bem os dados reais. A aproximação é particularmente boa nos períodos de

aquecimento e arrefecimento. Os maiores desvios verificados entre a temperatura real e a simulada ocorrem nas condições extremas diárias: nos períodos mais frios e nos períodos mais quentes. Existem alguns desvios nos períodos onde se atinge o máximo na temperatura diária, quer por excesso quer por defeito, o que pode ser explicado pelos erros de ajuste aos dados de radiação solar e de temperatura ambiente. A temperatura máxima atingida é um parâmetro muito importante no controlo de temperatura dos PBRs, uma vez que é o excesso de temperatura que provoca a diminuição de produtividade ou mesmo morte das células. Foi obtido um erro relativo médio na temperatura máxima de 2,3%, o que constitui um erro pouco significativo. Verifica-se que apesar de existirem alguns desvios na temperatura máxima, eles não são indicativos de erros sistemáticos, ou seja, a temperatura simulada máxima alterna entre temperaturas acima e abaixo das temperaturas máximas verificadas.

Quanto à temperatura mínima, existe nalguns dias uma temperatura simulada inferior à verificada. A principal fonte de erro que explica esta discrepância ocasional é a estimativa da velocidade do vento. Como visto anteriormente, a velocidade do vento é tendencialmente menor de noite, pelo que o valor utilizado de velocidade média está a sobreestimar este parâmetro no período nocturno. Desta forma, os efeitos convectivos são agravados pelo modelo, e a temperatura simulada é inferior à real. Ainda assim, quer ao nível da temperatura máxima, quer ao nível da temperatura mínima, os erros são bastante baixos, pelo que o modelo desenvolvido consegue, com sucesso, simular o perfil de temperatura do meio de cultura no PBR.

Inverno sem recurso à aspersão

Tal como na análise anterior, foram utilizados dados de temperatura do PBR X para comparar com dados de temperatura simulados, desta vez para um período que envolveu os meses de Dezembro e Janeiro. A metodologia aplicada foi exactamente a mesma que na análise anterior. Nos dados provenientes deste período de tempo, existiram alguns problemas, nomeadamente no alinhamento temporal dos dados fornecidos, mas que foram possíveis de resolver. Os resultados encontram-se representados na Figura 15. Esta figura pode ser consultada em maior detalhe no Anexo III.

Como se pode verificar pela análise da Figura 15, o modelo simula com grande sucesso a temperatura verificada. O factor mais importante a ter em atenção neste período é a temperatura mínima, uma vez que baixos valores conduzem a uma diminuição da cinética de crescimento das microalgas, que é traduzida numa diminuição de produtividade. O erro relativo médio na temperatura mínima é de 2,9%, o que significa que o modelo é bastante bom na simulação da temperatura do meio de cultura.

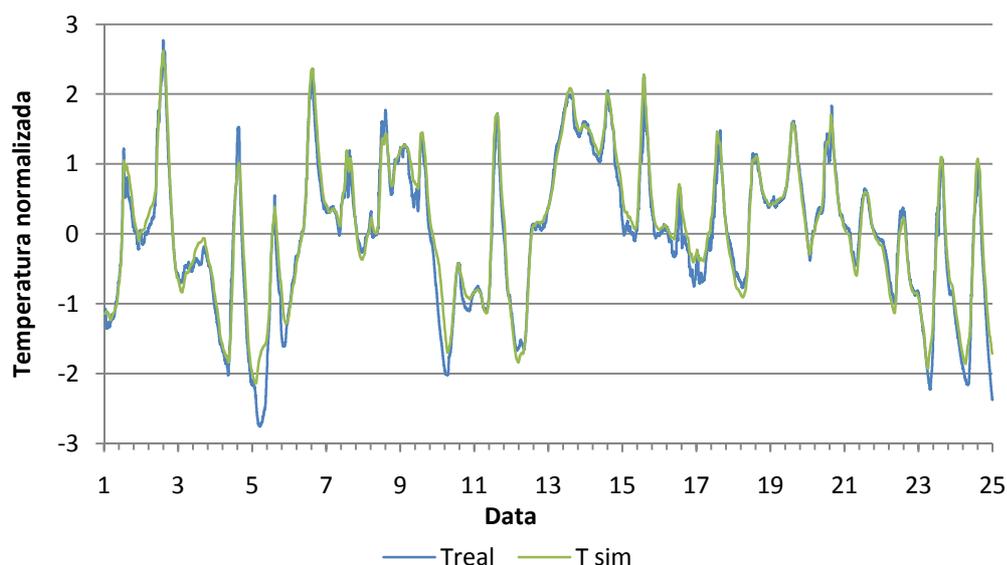


Figura 15 – Temperatura real (Treal) e Simulada (Tsim) do meio de cultura num período de Inverno.

Existem alguns períodos em que se verificam desvios, quer ao nível da temperatura máxima, quer ao nível da temperatura mínima provavelmente devido aos erros de interpolação ou devido a outros factores não considerados, como a pluviosidade. A pluviosidade é um modo de transferência de calor que não foi directamente considerado no modelo. No entanto, ela afecta indirectamente a temperatura dos PBRs, através da temperatura ambiente. Além disso é uma “aspersão não controlada”.

O modelo também não é capaz de simular na perfeição os aumentos e diminuições de temperatura súbitos. Em vez disso, estima um comportamento mais suave para a variação de temperatura do meio de cultura que, apesar de tudo, se encontra bastante próximo da temperatura real. Estas variações súbitas devem-se à precipitação, como a Figura 16 ilustra (as variações súbitas encontram-se circundadas). Os dados de pluviosidade utilizados têm como fonte a estação meteorológica que mede a altura de água acumulada num determinado volume durante 15 minutos. Os dados de temperatura representados na Figura 16 referem-se a uma amostra da temperatura real dos primeiros dias da Figura 15.

Observa-se que sempre que chove existem variações súbitas na temperatura do meio de cultura (valores circundados na Figura 16). O modelo desenvolvido, apesar de não conseguir prever este comportamento consegue aproximar o comportamento da temperatura do meio de cultura bastante bem através das variações na temperatura ambiente. Por isso, não foi necessário incluir a pluviosidade no modelo, já que a variação da temperatura ambiente provocada pela pluviosidade é suficiente para traduzir um efeito aproximado na temperatura simulada do meio de cultura.

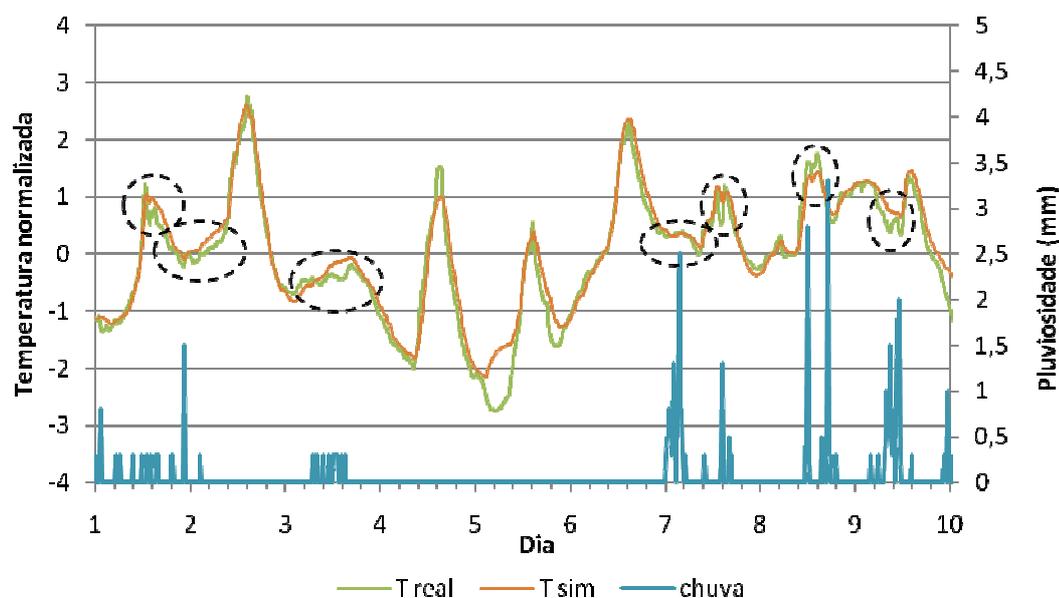


Figura 16 – Efeito da pluviosidade na variação da temperatura real (T real) e na simulada (Tsim).

Verão com recurso à aspersão

O modelo com controlo de temperatura por aspersão, que inclui os balanços energéticos à água usada na aspersão e ao meio de cultura foi validado com dados de temperatura do Verão. Esse modelo foi aplicado seguindo a metodologia descrita, mas utilizando dados de velocidade do vento e da humidade instantâneos recolhidos para o mesmo período. Não se utilizou o valor médio da velocidade do vento uma vez que o modelo apresenta uma menor robustez, ou seja, os resultados variam significativamente com ligeiras alterações nos dados. Este aumento do número de *inputs* provocou um aumento do número de iterações por parte da função integradora, o que levou a um tempo de cálculo muito superior ao modelo sem aspersão (próximo de 1/2 hora em vez de alguns segundos ou minutos).

Verificou-se que o modelo tende a sobrestimar o calor perdido pela água por evaporação quando se encontra em contacto com os tubos. Isto pode dever-se a uma má estimativa da analogia de Chilton-Colburn para o coeficiente de transferência de massa, a uma má estimativa do coeficiente de transferência de calor externo usado nesta analogia, a uma sobrestimativa da velocidade do vento devido à não consideração dos efeitos barreira provocados pelos tubos, ou a todos estes factores em conjunto. A utilização de uma correlação empírica para estimar o coeficiente de transferência de calor seguida da analogia de Chilton-Colburn tem um efeito de propagação de erros considerável, o que pode explicar a má estimativa do calor perdido por evaporação. Por isso, para obter resultados próximos dos valores realmente observados, o calor de evaporação foi multiplicado por um factor de 0,25. Esta foi a única correcção que foi implementada ao modelo. De resto, todo o modelo foi desenvolvido com base em princípios de transferência de calor e correlações apropriadas,

tal como o modelo sem aspersão. Os resultados para o período de Verão considerado encontram-se na Figura 17.

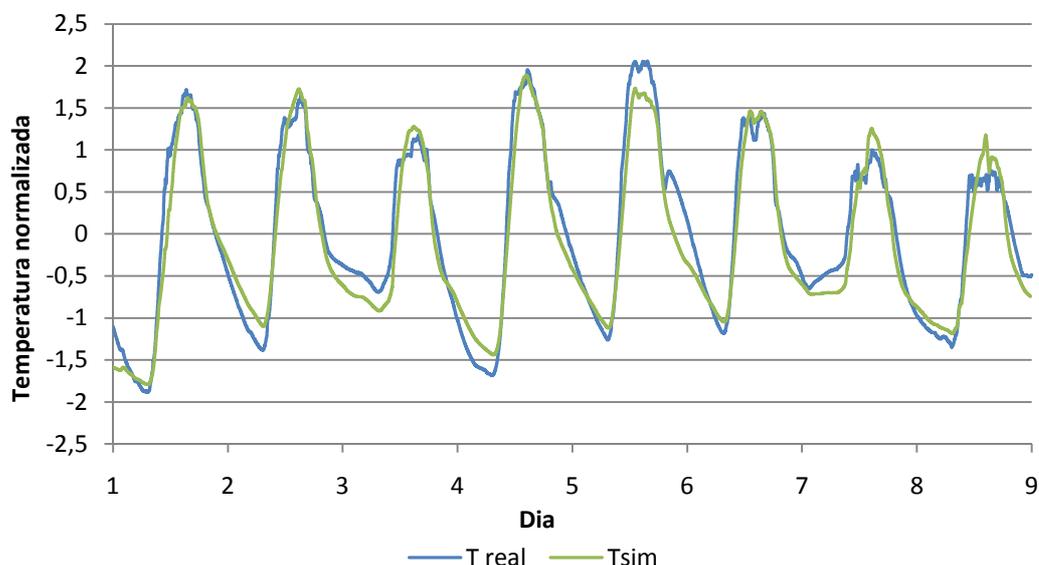


Figura 17 – Comparação entre os resultados obtidos pelo modelo (Tsim) e os dados recolhidos no PBR (T real) para um mês de Verão, usando aspersão.

Como se pode observar, por vezes existe um desfaseamento nas temperaturas real e simulada nos períodos de menor temperatura (de noite). Isto pode dever-se ao facto dos dados de velocidade do vento serem demasiado arredondados, o que faz com que valores inferiores a 0,5 m/s sejam aproximados para 0, subestimando os fenómenos convectivos que arrefeceriam o meio de cultura. Além desta diferença de valores, o modelo é capaz de simular com bastante exactidão a temperatura real, embora com curvas mais suaves, o que se deve essencialmente aos ajustes realizadas aos dados, os quais têm um efeito amortecedor. O erro relativo médio obtido para a temperatura máxima é de 2,7%, o que traduz a boa aproximação do modelo aos dados reais.

3.7 Desenvolvimento de uma Metodologia de Previsão da Temperatura dos Fotobiorreactores

Os modelos desenvolvidos foram utilizados de modo a prever se é necessário recorrer ao controlo de temperatura num determinado dia. Desta forma, pode-se prever em que dias se deve recorrer ao sistema de controlo de temperatura por aspersão, e em que dias a activação desse sistema não é necessário. Assim, é possível obter poupanças de água

do sistema de aspersão. Para atingir esse objectivo, foi desenvolvido um método de previsão cujos *inputs* são apenas a temperatura máxima, a temperatura mínima, a existência ou não de nuvens e a hora aproximada de início do fotoperíodo (hora a que o Sol nasce). Estes são os dados fornecidos diariamente pela meteorologia, pelo que é fácil obter estes *inputs* quando se pretende realizar uma previsão da temperatura do meio de cultura.

Os restantes *inputs* dos modelos, radiação solar, vento e humidade do ar, são estimados com base nos dados fornecidos pelo utilizador. Para efectuar essas estimativas, foram analisados dados recolhidos pela estação meteorológica. Com base nesses dados foi possível obter perfis típicos de radiação solar, humidade do ar e temperatura ambiente, e valores médios de velocidade do vento em função dos *inputs* fornecidos pelo utilizador. A radiação solar foi estimada com base na presença de nuvens. O utilizador pode fornecer um de três valores para a existência de nebulosidade: 0 para céu limpo, 1 para a situação de haver algumas nuvens, 2 para a existência de muita nebulosidade. Os valores de radiação solar máximos foram estimados a partir desta informação, com base nos dados meteorológicos recolhidos (já referidos anteriormente). Para cada valor dado à nebulosidade, foi ainda determinado um valor máximo e um valor mínimo típicos de radiação solar, para construir diferentes cenários prováveis. Esses valores encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores de radiação típicos em função da nebulosidade.

nebulosidade	Radiação solar mínima (W/m ²)	Radiação solar máxima (W/m ²)
0	780	930
1	380	620
2	80	200

O perfil de radiação solar foi estimado com base no melhor perfil que traduz um perfil solar típico. A equação utilizada (39) foi uma equação quadrática, que assume as 14h como a hora de maior radiação e maior calor. Eventualmente, é necessário alterar este parâmetro devido à mudança de horário que ocorre em Portugal entre o Verão e o Inverno. Nesta equação, G_{Smax} é o valor de radiação solar definido na Tabela 3, t_0 é a hora de início do fotoperíodo, e t o tempo em horas. Esta equação apenas é válida entre o início do fotoperíodo e o seu fim, ou seja, apenas importam os valores positivos. Os restantes valores (negativos) dados pela equação são substituídos por zero. O resultado da aproximação pode ser visto na Figura 18.

$$G_S = - \frac{G_{Smax} \cdot (t-t_0) \cdot (t-2 \times 14-t_0)}{(14-t_0)^2} \quad (39)$$

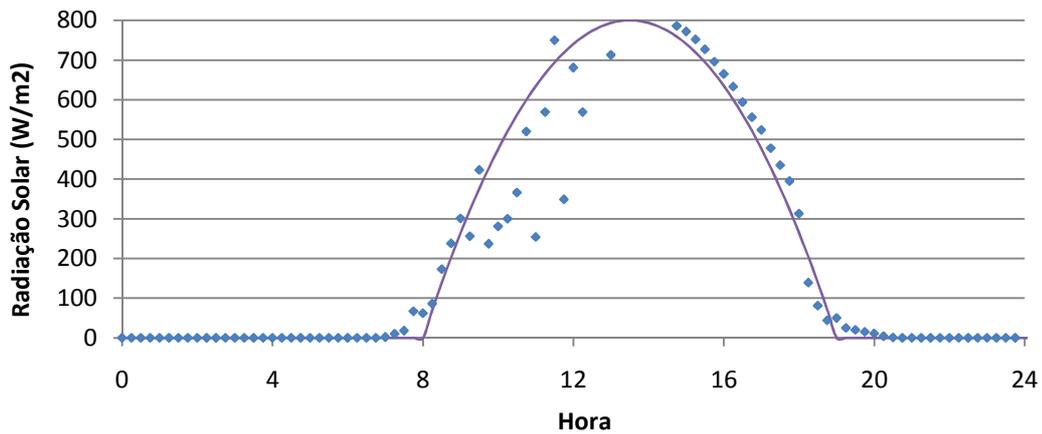


Figura 18 – Aproximação empírica dos dados de radiação solar

Utilizando o par de valores da Tabela 3 é possível obter um perfil mínimo e um perfil máximo de radiação solar. Cada um desses perfis é utilizado para estimar a temperatura ambiente e a humidade do ar. A temperatura ambiente é estimada por uma função definida por ramos. Até ao valor da hora de maior calor (14h), o perfil é descrito pela equação 40. A partir desse valor, a equação utilizada é idêntica à equação 40, mas é utilizado um valor de G_S calculado com um t_0 superior. A hora de maior calor tem um valor estimado baseado em valores médios. No entanto, esse valor pode sofrer variações nomeadamente pela mudança horária que ocorre entre o horário de Verão e o horário de Inverno. Nesse caso, este valor deve ser alterado para melhor traduzir a hora de maior calor. Esta metodologia tem como objectivo simular um perfil típico de temperatura ambiente em que o arrefecimento durante o dia é mais lento que o seu aquecimento. A humidade do ar foi estimada pela equação 41. Nesta equação é necessário um coeficiente de humidade (coefH) que tem por objectivo estimar um perfil de tempo seco (coefH=10) e um perfil de tempo húmido (coefH=25).

$$T_{\text{amb}} = \frac{G_S}{G_{S\text{max}}/(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})} + T_{\text{min}} \quad (40)$$

$$\text{Hum} = 95 - G_S/\text{coefH} \quad (41)$$

Cada um destes perfis é emparelhado com cada um dos perfis de temperatura ambiente e radiação solar, de modo a se obter um conjunto de dados “optimista” e um conjunto de dados “pessimista”, embora sempre dentro de valores típicos e prováveis. O valor médio de velocidade do vento é determinado com base na temperatura máxima do dia. Para uma temperatura máxima superior a 28°C, a velocidade média do vento é de 2 m/s. Para uma temperatura máxima inferior a 18°C, a velocidade média é de 0,5 m/s. Para valores de temperatura máxima intermédios, a velocidade média é 1,25 m/s.

De modo a exemplificar esta metodologia de cálculo, definiu-se como temperatura mínima 14°C, temperatura máxima 24°C, nebulosidade=0 e $t_0=8$. Obtiveram-se os resultados

presentes na Figura 19. Nesta Figura, T_s/tr é a temperatura sem recurso à aspersão (mínima e máxima) e T_c/tr é a temperatura com utilização de aspersão (mínima e máxima).

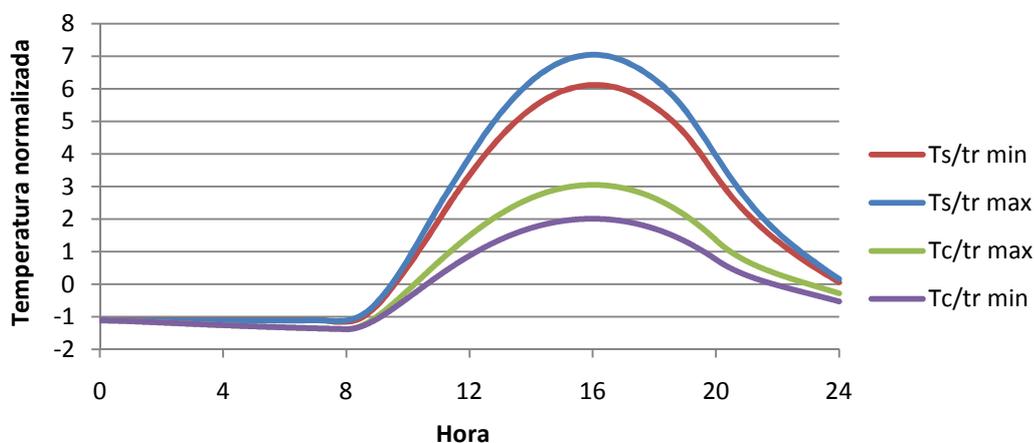


Figura 19 – Perfis de temperatura obtidos com (T_c/tr) e sem (T_s/tr) recurso à aspersão.

Como se pode observar, tal como era esperado, a temperatura é muito superior na ausência de controlo de temperatura por aspersão. Também é possível perceber como as incertezas incluídas na estimação dos parâmetros através de um perfil máximo e um mínimo afectam os resultados finais. A temperatura máxima atingida pelo meio de cultura varia consideravelmente dependendo dos valores de estimativa utilizados.

Note-se que embora o perfil correcto se encontre provavelmente entre os perfis mínimo e máximo, é possível que alguns conjuntos de dados se situem abaixo ou acima destas curvas. Isto pode acontecer devido a variação de condições meteorológicas, como alterações na nebulosidade ou na velocidade do vento, por exemplo. Por isso, os perfis traçados são apenas perfis prováveis e servem apenas de orientação.

É ainda de notar que o recurso ao sistema de controlo de temperatura foi aplicado a todo o dia. Se a aspersão apenas existir durante o fotoperíodo, obter-se-á um perfil intermédio entre o perfil da temperatura sem e com aspersão. Esse novo perfil de temperatura depende da temperatura de *set point* que se utilizar no controlador de temperatura, e que deve ser fornecida pelo utilizador.

Também é possível, recorrendo às funções desenvolvidas no Matlab, determinar o caudal mínimo de água necessário para manter a temperatura dentro da gama óptima. Desta forma, conseguem-se obter poupanças de água e minimizar a quantidade de água perdida.

A partir deste tipo de previsão é possível determinar se, no curto prazo, é necessário ou não recorrer ao sistema de controlo de temperatura. Por exemplo, se a temperatura máxima prevista sem recurso à aspersão se encontrar dentro do intervalo ideal (20-30°C)

mas for suficientemente alta para accionar o sistema de controlo de temperatura, pode-se optar por manter o sistema desligado, obtendo-se poupanças de água.

4. Aplicação do Modelo ao Projecto de Novos Fotobiorreactores

Como referido na Introdução a este trabalho, os PBRs existentes constituem uma Unidade Protótipo. Com os resultados desta unidade pretende-se, no futuro, proceder a um *scale-up* para uma Unidade Piloto, e mais tarde para uma Unidade Industrial. Sendo o *scale-up* deste tipo de processos um projecto complexo, é necessário possuir a maior quantidade de informação possível de forma a tomar decisões que levem a bom porto a realização de um projecto de construção de PBRs de maiores dimensões. Por isso, é útil conhecer *a priori* a quantidade de energia que será necessário transferir para garantir que a temperatura do meio de cultura se situe dentro dos limites definidos para alcançar a máxima produtividade. Como o meio de transferência de calor mais barato e prático é a água, é importante estimar a quantidade de água consumida para efectuar esse controlo de temperatura.

De modo a atingir este objectivo, o modelo desenvolvido na Secção 3.3 para simular a temperatura de fotobiorreactores em estado estacionário foi aplicado a novos PBRs de maior dimensão de modo a estimar as necessidades de transferência de calor para manter a temperatura dentro dos limites 20-30°C. A partir das estimativas das energias térmicas envolvidas, foram também calculadas, neste capítulo, estimativas para a área de transferência de calor de permutadores, e respectivos caudais de fluidos térmicos. Esses parâmetros permitem a reflexão sobre a melhor solução de controlo de temperatura, a partir da escolha do tipo de permutador mais adequado. O controlo de temperatura dos PBRs consiste num arrefecimento do meio de cultura usando água fria, ou num aquecimento utilizando água quente.

4.1 Hipóteses assumidas

A aplicação do modelo desenvolvido ao projecto de novos PBRs foi realizada tendo em conta 4 tamanhos previstos (denominados S, M, L e XL) e os 5 cenários identificados anteriormente na Secção 3.5 (Verão típico, Verão extremo, Inverno típico, Inverno extremo, e Primavera/Outono). Considerou-se ainda que, num ano, existem 15 dias de temperaturas extremamente baixas no Inverno e 15 dias de temperaturas extremamente altas no Verão, 75 dias de temperatura moderada tanto no Inverno como no Verão, e os restantes 185 de temperaturas típicas de Primavera/Outono. Estes valores foram definidos com base no número médio de dias correspondentes a cada estação do ano e às vagas de frio ou calor anuais. O número de PBRs projectados para os tamanhos S, M, L e XL são respectivamente 6, 6, 10, 1. Recorde-se que um PBR é constituído por um depósito e um conjunto de tubos. Foram ainda assumidas as seguintes hipóteses:

- para o sistema de aquecimento

1. O sistema de aquecimento dos PBRs consiste na utilização de água quente, previamente aquecida com ar quente num segundo permutador;
2. O ar quente (disponível na fábrica) que aquece a água de aquecimento entra a 200°C e sai a 60°C;
3. O coeficiente global de transferência de calor toma o valor $U = 400 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para a transferência entre o ar quente e a água;
4. A água de aquecimento entra no permutador água-meio de cultura a 40°C e sai a 25°C;

- para o sistema de arrefecimento

5. A água de arrefecimento entra no permutador a 13°C nos cenários de Inverno, 15°C nos cenários de Primavera/Outono, e 18°C nos cenários de Verão; sai a 25°C;

- para ambos os sistemas

6. O coeficiente global de transferência de calor toma o valor $U = 850 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ para a transferência entre a água (de aquecimento ou de arrefecimento) e o meio de cultura;
7. As estimativas de área de transferência de calor necessárias são valores mínimos, dado que não foram tidas em conta as eficiências dos permutadores;
8. Foram utilizadas propriedades físicas aproximadas e com valor constante, tais como a capacidade calorífica da água (4,18 kJ/(kg.°C)) e a do ar (1,006 kJ/(kg.°C));

As estimativas foram calculadas para manutenção da temperatura da cultura dentro dos valores de referência, durante 24h por dia. No entanto, como não é tão interessante manter o controlo de temperatura da cultura durante a noite, especialmente no Verão, foram também calculadas estimativas para a manutenção da temperatura dentro da gama pretendida apenas durante o fotoperíodo (cerca de 10h).

4.2 Resultados Obtidos para a Transferência de Calor

Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 4 e na Tabela 5, para cada PBR de determinadas dimensões e para cada período do ano considerado. Em cada um desses casos, encontram-se listados o valor do calor máximo e do calor total a transferir, as áreas necessárias para cada tipo de permutador considerado (permutadores meio de cultura-água e água-ar), e os caudais envolvidos (máximo e total diário, para água e ar). Por fim, são apresentados no final de cada tabela os somatórios das quantidades de calor a transferir. Exemplificando, para o PBR XL, no cenário de temperaturas médias de Verão, é necessário o fornecimento de 2823,6 kWh por dia, com um valor máximo de 419,9 kW. Este cenário não

carece de remoção de calor. A área de transferência de calor necessária ao aquecimento do meio de cultura é de 45,7 m², enquanto a área de transferência de calor do permutador água-ar é de 12,8 m². A quantidade de água quente necessária num dia é cerca de 162 ton, sendo o caudal máximo de 6,7 kg/s. A quantidade de ar necessário é cerca de 72 ton, e o caudal máximo é de 3,0 kg/s.

Pode-se ainda observar na Tabela 4 e na Tabela 5 que, se o sistema de controlo de temperatura funcionar apenas durante o fotoperíodo, conseguem-se poupanças no fornecimento de calor na ordem de 73%, relativamente à utilização do sistema de controlo de temperatura durante as 24 horas do dia. Esta grande poupança energética é facilmente explicável com o não aquecimento dos PBRs durante a noite no Inverno. De facto, durante a noite, não existe crescimento de microalgas, mesmo que exista controlo de temperatura. Por isso, é recomendável que só se mantenha o controlo de temperatura activa durante o fotoperíodo. No entanto, se as temperaturas forem muito adversas no período nocturno, como por exemplo temperaturas negativas, é conveniente accionar o sistema de controlo de temperatura.

Tabela 4 – Estimativas de calor a remover/fornecer para manter os PBRs dentro da gama 20-30°C durante todo o dia.

PBR XL		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0,0	419,9	1111,5	725,9	0,0	1201,4	0,0	1918,5	0,0	1045,9
	total (kWh)	0,0	2823,6	4885,9	4623,0	0,0	24370,0	0,0	36264,2	0,0	12346,1
Área	transf. com água (m ²)	0,0	45,7	113,6	120,6	0,0	107,4	0,0	148,0	0,0	113,7
	transf.com ar (m ²)	-	12,8	-	22,1	-	36,5	-	58,3	-	31,8
Caudal	máximo de água (kg/s)	0,0	6,7	38,0	11,6	0,0	19,2	0,0	30,6	0,0	16,7
	total de água (ton)	0,0	162,1	167,0	265,4	0,0	1399,2	0,0	2082,2	0,0	708,9
	máximo de ar (kg/s)	-	3,0	-	5,2	-	8,5	-	13,6	-	7,4
	total de ar (ton)	-	72,2	-	118,2	-	622,9	-	926,9	-	315,6

PBR L		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0,0	209,9	538,9	363,0	0,0	600,7	0,0	959,2	0,0	523,1
	total (kWh)	0,0	1419,1	2345,0	2315,4	0,0	12234,6	0,0	18170,2	0,0	6185,8
Área	transf.com água (m ²)	0,0	22,8	55,6	64,9	0,0	53,4	0,0	73,9	0,0	56,9
	transf.com ar (m ²)	-	6,4	-	11,0	-	18,3	-	29,2	-	15,9
Caudal	máximo de água (kg/s)	0,0	3,3	18,4	5,8	0,0	9,6	0,0	15,3	0,0	8,3
	total de água (ton)	0,0	81,5	80,1	132,9	0,0	702,5	0,0	1043,3	0,0	355,2
	máximo de ar (kg/s)	-	1,5	-	2,6	-	4,3	-	6,8	-	3,7
	total de ar (ton)	-	36,3	-	59,2	-	312,7	-	464,4	-	158,1

PBR M		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0,0	62,9	154,8	108,8	0,0	180,1	0,0	287,5	0,0	156,9
	total (kWh)	0,0	428,5	664,8	695,6	0,0	3687,1	0,0	5461,7	0,0	1859,4
Área	transf.com água (m ²)	0,0	6,8	18,7	15,9	0,0	17,5	0,0	25,6	0,0	17,1
	transf.com ar (m ²)	-	1,9	-	3,3	-	5,5	-	8,7	-	4,8
	máximo de água (kg/s)	0,0	1,0	5,3	1,7	0,0	2,9	0,0	4,6	0,0	2,5
Caudal	total de água (ton)	0,0	24,6	22,7	39,9	0,0	211,7	0,0	313,6	0,0	106,8
	máximo de ar (kg/s)	-	0,4	-	0,8	-	1,3	-	2,0	-	1,1
	total de ar (ton)	-	11,0	-	17,8	-	94,2	-	139,6	-	47,5

PBR S		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0,0	20,9	48,7	36,2	0,0	59,9	0,0	95,7	0,0	52,2
	total (kWh)	0,0	143,9	205,4	232,1	0,0	1235,2	0,0	1823,8	0,0	621,1
Área	transf.com água (m ²)	0,0	2,3	6,5	4,4	0,0	6,1	0,0	9,3	0,0	5,7
	transf.com ar (m ²)	-	0,6	-	1,1	-	1,8	-	2,9	-	1,6
	máximo de água (kg/s)	0,0	0,3	1,7	0,6	0,0	1,0	0,0	1,5	0,0	0,8
Caudal	total de água (ton)	0,0	8,3	7,0	13,3	0,0	70,9	0,0	104,7	0,0	35,7
	máximo de ar (kg/s)	-	0,1	-	0,3	-	0,4	-	0,7	-	0,4
	total de ar (ton)	-	3,7	-	5,9	-	31,6	-	46,6	-	15,9

Calor total por período (kWh)	Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono		Calor total anual (MWh)	
	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
	0	1533675	503356,5	500148	0	13218735	0	3925188	0	16481114	503,4	35658,9

Tabela 5 – Estimativas de calor a remover e fornecer para manter os PBRs dentro do set point (20-30°C) apenas durante o fotoperíodo.

PBR XL		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0	322	1111,5	516,7	0	1176,5	0	1675,7	0	1045,9
	total (kWh)	0	414,2	4667,2	487,4	0	8065	0	13715,4	0	2450,7
Área	transf.com água (m ²)	0	35	113,6	85,9	0	105,2	0	129,3	0	113,7
	transf.com ar (m ²)	-	9,8	-	15,7	-	35,8	-	50,9	-	31,8
Caudal	máximo de água (kg/s)	0	5,1	38	8,2	0	18,8	0	26,7	0	16,7
	total de água (ton)	0	23,8	574,2	28	0	463,1	0	787,5	0	140,7
	máximo de ar (kg/s)	-	2,3	-	3,7	-	8,4	-	11,9	-	7,4
	total de ar (ton)	-	10,6	-	12,5	-	206,1	-	350,6	-	62,6

PBR L		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0	162,3	538,9	259,5	0	588,7	0	841	0	523,1
	total (kWh)	0	213,6	2243,8	247,3	0	4081,1	0	6891,3	0	1233,8
Área	transf.com água (m ²)	0	17,7	55,6	46,4	0	52,4	0	64,8	0	56,9
	transf.com ar (m ²)	-	4,9	-	7,9	-	17,9	-	25,6	-	15,9
Caudal	máximo de água (kg/s)	0	2,6	18,4	4,1	0	9,4	0	13,4	0	8,3
	total de água (ton)	0	12,3	276,1	14,2	0	234,3	0	395,7	0	70,8
	máximo de ar (kg/s)	-	1,2	-	1,8	-	4,2	-	6	-	3,7
	total de ar (ton)	-	5,5	-	6,3	-	104,3	-	176,1	-	31,5

PBR M		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0	49,2	154,8	78,3	0	176,7	0	253,3	0	156,9
	total (kWh)	0	66,9	637,7	75,6	0	1242,7	0	2079,1	0	373,1
Área	transf.com água (m ²)	0	5,3	18,7	11,4	0	17,1	0	22,5	0	17,1
	transf.com ar (m ²)	-	1,5	-	2,4	-	5,4	-	7,7	-	4,8
	máximo de água (kg/s)	0	0,8	5,3	1,2	0	2,8	0	4	0	2,5
Caudal	total de água (ton)	0	3,8	78,5	4,3	0	71,4	0	119,4	0	21,4
	máximo de ar (kg/s)	-	0,3	-	0,6	-	1,3	-	1,8	-	1,1
	total de ar (ton)	-	1,7	-	1,9	-	31,8	-	53,1	-	9,5

PBR S		Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono	
		Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
Calor	máximo (kW)	0	16,6	48,7	26,2	0	58,9	0	84,8	0	52,2
	total (kWh)	0	23,5	197,7	25,9	0	421,6	0	697,4	0	125,7
Área	transf.com água (m ²)	0	1,8	6,5	3,2	0	6	0	8,3	0	5,7
	transf.com ar (m ²)	-	0,5	-	0,8	-	1,8	-	2,6	-	1,6
	máximo de água (kg/s)	0	0,3	1,7	0,4	0	0,9	0	1,4	0	0,8
Caudal	total de água (ton)	0	1,4	24,3	1,5	0	24,2	0	40	0	7,2
	máximo de ar (kg/s)	-	0,1	-	0,2	-	0,4	-	0,6	-	0,4
	total de ar (ton)	-	0,6	-	0,7	-	10,8	-	17,8	-	3,2

Calor total por período (kWh)	Verão médio		Verão extremo		Inverno médio		Inverno extremo		Primavera/Outono		Calor total anual (MWh)	
	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer	Remover	Fornecer
	0	231945	481764	53541	0	4414635	0	1489311	0	3289578	481,8	9479,0

5. Análise de Soluções de Controlo de Temperatura dos PBRs

Um dos objectivos deste trabalho é analisar e sugerir alternativas de controlo de temperatura do meio de cultura para os fotobiorreactores existentes como forma de melhorar o seu desempenho, em particular para os novos PBRs em fase de projecto. A principal motivação para processos alternativos de controlo de temperatura à solução por aspersão de água existente actualmente é a poupança de água. No controlo de temperatura por aspersão é perdida uma grande quantidade de água, quer por evaporação, quer por arraste pelo vento, a qual tem de ser repostada. Uma nova solução deveria conduzir a uma poupança de água. Também se pretende que as propostas de controlo de temperatura sejam pouco dispendiosas, tanto em termos de custo de investimento como em termos de custos de operação.

Como se pretende ter um sistema que possa aquecer ou arrefecer o meio de cultura dos PBRs, de modo a manter a temperatura dentro da gama pretendida, surgem duas alternativas à partida. Podem ser utilizados dois sistemas de permutadores de calor, um para aquecimento e outro para arrefecimento, ou um sistema único. A vantagem de um sistema único é a redução de equipamento e portanto de custos. O fluido térmico poderia ser um fluido de refrigeração para aquecimento e um qualquer fluido quente para aquecimento. No entanto, a refrigeração obriga a custos elevados, e não pode ser utilizado um fluido quente com elevada temperatura porque se corre o risco de localmente a cultura atingir temperaturas que conduzam à morte de células. Por isso, o fluido mais aconselhável tanto por motivos económicos como operacionais é a água. Sendo o fluido térmico apenas um, é recomendável que seja utilizado um sistema único de permutador de calor.

No entanto, a água apresenta alguns inconvenientes, principalmente relacionados com a *driving-force* que se estabelece entre este fluido térmico e o meio de cultura. Ao ser usada como fluido frio, é necessário que a água se encontre a uma temperatura inferior ao meio de cultura. Para isso, deve ser armazenada num local coberto para evitar o aquecimento por radiação solar, e bem ventilado para que a evaporação da água contribua para o seu arrefecimento. Naturalmente que isso conduz a algumas perdas de água, mas que são muito inferiores às que ocorrem na aspersão. Ainda assim, a diferença de temperatura entre a água e o meio de cultura não deverá ser muito elevada (inferior a 10°C), o que exige uma área de transferência de calor bastante elevada e uma alta eficiência de transferência de calor.

Para ser utilizada como fluido quente, a água necessita de ser aquecida. Desde cedo surgiu a ideia de aquecer a água com uma fonte de calor não utilizada na fábrica. Isto exige um segundo permutador para que um fluido quente existente na fábrica aqueça a água quando for necessário. Como a fábrica utiliza sobretudo ar quente, esse permutador teria que ser do tipo gás-líquido. Não é possível aquecer directamente o meio de cultura de um

PBR devido à elevada temperatura do ar quente utilizado, o que, como referido anteriormente, poderia conduzir localmente a temperaturas do meio de cultura que conduziriam à morte de algumas células, diminuindo a produtividade.

Quanto à transferência de calor entre a água (de aquecimento ou de arrefecimento) e o meio de cultura, analisaram-se várias soluções possíveis. Algumas das ideias foram rejeitadas à partida por apresentarem problemas técnicos. As ideias que foram analisadas em maior detalhe foram as seguintes:

- tubo que percorresse o depósito verticalmente com duas passagens, tornando-o semelhante a um permutador do tipo carcaça e tubos 1:2 (Figura 20-a);
- serpentina no interior do depósito do PBR (Figura 20-b);
- dupla serpentina no interior do depósito do PBR (Figura 20-c);
- processo actualmente em funcionamento: aspersão.

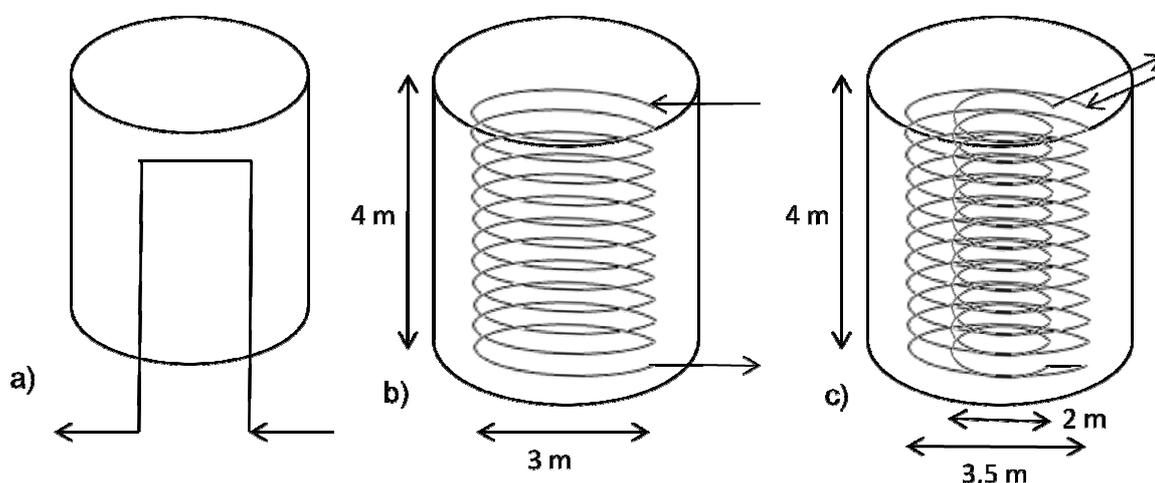


Figura 20 – Esquema das soluções de controlo de temperatura

Foi considerado o reactor de dimensões XL, pelo que o calor a remover para cumprir as especificações da Tabela 4 (1111,5 kW num cenário de Verão extremo), considerando ainda uma pequena margem de manobra, é de aproximadamente 1200 kW. Considerou-se ainda que a água entra a 20°C. Na realidade, num cenário de Verão, a temperatura inicial da água armazenada seria de 16-18°C, mas ao ser utilizada, a água aquece e torna-se difícil arrefecê-la até essa temperatura inicial. Essa dificuldade está relacionada com a contínua utilização da água em circuito fechado, e ao longo tempo necessário para o arrefecimento da água até à sua temperatura inicial. Por esses motivos, foi usada a estimativa de 20°C. Assume-se ainda uma *driving-force* mínima (ΔT_{\min}) de 5°C, pelo que, tendo em conta que a temperatura máxima que pode ser atingida pelo meio de cultura é de 30°C, a temperatura da água ao sair do permutador será no máximo de $30-5=25^\circ\text{C}$. Considera-se que a

temperatura do meio de cultura se mantém aproximadamente constante. Assim, a média logarítmica da diferença de temperaturas (ΔT_{ml}) é, aproximadamente, 7,5°C.

5.1 Carcaça e Tubos 1:2

O coeficiente global de transferência de calor, U , para um permutador do tipo carcaça e tubos 1:2 entre dois fluidos aquosos tem o valor aproximado de 1100 W/(m².°C) (Incropera e DeWitt, 1998). Para este tipo de permutador, é necessário estimar o factor correctivo f da média logarítmica, na equação de projecto: $Q=U.A.\Delta T_{ml}.f$. Este factor pode ser calculado por via gráfica através de dois parâmetros, R e S (Incropera e DeWitt, 1998). Utilizando os valores de temperatura considerados, obteve-se $R\approx 0,05$ e $S\approx 0,5$, a que corresponde um valor de $f\approx 1$, pelo que a correcção não é necessária. A área necessária à transferência de calor é portanto $A=Q/(U.\Delta T_{ml}.f)=145,5$ m².

Assumindo que o comprimento do tubo (L) pode ter uma altura igual à altura do depósito visto que se encontra na vertical, (Figura 20-a) e que o tubo dá uma volta dentro do depósito, o diâmetro do tubo será então $D=A/(2.\pi.L) \Leftrightarrow D=5,8$ m. Este elevado valor de diâmetro mostra que esta solução de controlo de temperatura não é adequada. Por isso, foi rejeitada.

5.2 Serpentina

O coeficiente global de transferência de calor, U , entre dois fluidos aquosos numa serpentina é cerca de 1400 W/(m².°C) (Incropera e DeWitt, 1998). Assim, a área de serpentina necessária é de $A=Q/(U.\Delta T_{ml})=114,3$ m².

Considerando por hipótese um depósito cilíndrico com cerca de 4 m de altura útil por 4 m de diâmetro, o diâmetro das voltas da serpentina seria de 3 m (Figura 20-b). Assume-se que o diâmetro externo da serpentina é de uma polegada (medida *standard*), ou seja, cerca de 0,025 m. A distância vertical entre cada volta da serpentina seria também de 0,025 m, pelo que a altura efectiva da serpentina é de $4/2=2$ m. Assim, o número máximo de voltas da serpentina é de $2/0,025=80$ voltas.

A área de cada volta de serpentina é $A_{1volta}=PxD'$, onde P é o perímetro externo da serpentina, e D' é o diâmetro da volta da serpentina. Assim, tem-se $A_{1volta}=\pi^2 \times 0,025 \times 3=0,74$ m². A área total disponível é de $A_{total}=A_{1volta}.n^{\circ}_{voltas}=0,74 \times 80=59,2$ m². Confrontando este valor com o valor de área necessária determinado anteriormente (114,3 m²) verifica-se que a área disponível é claramente insuficiente. Sendo assim, esta solução não é adequada.

Para contornar este problema, pensou-se numa dupla serpentina, em que uma serpentina se encontraria no interior de outra (Figura 20-c). A serpentina exterior teria um diâmetro de volta de $D'=3,5$ m, enquanto a interior teria $D''=2$ m. Assim, a área disponível seria de $A_{\text{total}}=(\pi^2 \times 0,025 \times 3,5 + \pi^2 \times 0,025 \times 2) \times 80 = 108,6 \text{ m}^2$. Mesmo esta solução apresenta um valor de área insuficiente, tendo sido também rejeitada.

5.3 Arrefecimento por aspersão

A solução aplicada actualmente consiste na utilização de aspersores para pulverizar água sobre os tubos dos PBRs, arrefecendo o meio de cultura que neles circula. A água que arrefece os tubos é continuamente reunida num reservatório, e utilizada novamente, em ciclo. A *driving-force* é maior que nas soluções anteriores, já que a evaporação contribui para a diminuição da temperatura da água (temperatura de termómetro húmido). A área disponível coincide com a área superficial dos tubos, pelo que toma um valor de cerca de 140 m^2 para um PBR típico. Este grande valor de área de transferência, aliado à maior *driving-force* devido à evaporação, explica o sucesso do controlo de temperatura por aspersão. Claro que a evaporação também tem a desvantagem de conduzir a perdas de água. Por esta razão, é necessário repor a água no reservatório periodicamente. Ainda assim, sob o ponto de vista económico, é preferível ter perdas de água que são repostas sem grandes custos do que possuir uma solução de controlo de temperatura mais dispendiosa e complexa. Os processos de transferência de calor apresentados anteriormente apresentam custos de investimento superiores ao processo de transferência por aspersão, já que requerem equipamento de transferência de calor não utilizado na aspersão, e têm custos de operação superiores devido aos maiores custos de bombagem.

A solução de aspersão é portanto a mais indicada para o controlo de temperatura dos fotobiorreactores. No entanto, podem ainda ser feitas melhorias a este sistema de forma a evitar desperdícios de água. Com os modelos desenvolvidos no Capítulo 3, é possível prever qual o perfil que o meio de cultura vai apresentar num determinado dia, conhecendo as previsões meteorológicas para esse dia, e consegue-se assim tomar uma decisão sobre a utilização ou não do sistema de aspersão. Desta forma, o sistema de controlo de temperatura pode deixar de ser utilizado diariamente para passar a operar só quando for de facto necessário.

6. Secagem da Mistura de Microalgas

A secagem da suspensão de microalgas que se obtém no processo de produção de biomassa a partir de gases de combustão é uma etapa muito importante, uma vez que permite obter uma pasta concentrada de microalgas ou mesmo um composto sólido de microalgas. É esta etapa que permite a comercialização da biomassa enquanto produto, para as suas diversas aplicações. Tal como as restantes tarefas realizadas neste trabalho, a secagem da biomassa está relacionada com necessidades energéticas do processo, e uma optimização deste passo conduz a melhorias no processo global de produção de microalgas. Por essa razão, a secagem foi estudada de modo a avaliar o comportamento da biomassa durante esse processo, quantificar a energia necessária e tirar conclusões quanto ao melhor processo de obtenção de biomassa com um baixo grau de humidade capaz de ser utilizada para uma determinada aplicação.

Para concretizar estes objectivos foi necessário conhecer a curva de secagem da suspensão de microalgas. Esta curva permite saber até que ponto é possível secar com elevada eficiência e baixos custos, e a partir de que percentagem de humidade os custos se tornam excessivos.

6.1 Estudo de Curvas de Secagem de Microalgas

Para os ensaios de secagem usou-se uma suspensão de microalgas proveniente do processo de produção. Esses ensaios foram realizados a diferentes temperaturas constantes, 60°C, 90°C, e 120°C, e consistiram na medição da massa de biomassa húmida, de minuto a minuto, no caso das temperaturas de 60°C e 90°C, e de 30 em 30 segundos, no caso da temperatura de 120°C. Os ensaios foram realizados numa balança medidora de humidade PCE-MB-50, que funciona com radiação infravermelha, e consistiram na secagem de biomassa em pratos de alumínio de tamanho *standard* (Figura 21).



Figura 21 – Balança medidora de humidade PCE-MB-50 (Industrial Needs, 2010)

A partir dos valores de variação da massa é possível determinar a variação percentual de humidade ao longo do tempo, tendo como base a massa final (seca) obtida. Os resultados obtidos encontram-se condensados na Tabela 6 e na Figura 22.

Tabela 6 – Resultados obtidos para os ensaios de secagem realizados a diferentes temperaturas.

T (°C)	$m_{\text{final}}/m_{\text{inicial}}, \%^*$
60	0,94
90	0,88
120	0,83

* - razão entre as massas final e inicial de microalgas em percentagem

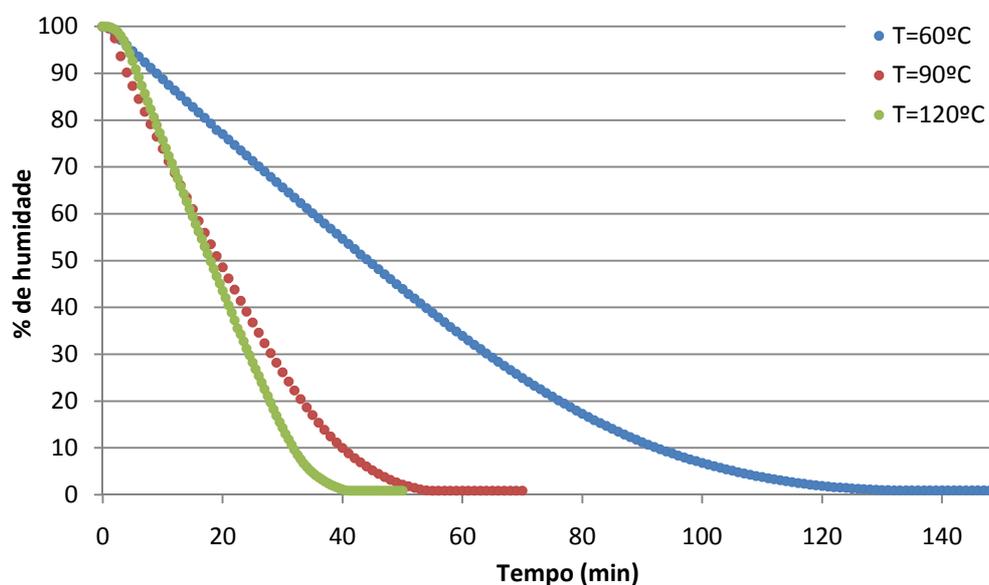


Figura 22 – Curvas de secagem a diferentes temperaturas: variação da percentagem de humidade ao longo do tempo.

Pelos resultados da Tabela 6 nota-se que a massa final depende da temperatura de secagem. Este facto é indicador de que a altas temperaturas não é apenas água que se evapora, mas também compostos orgânicos que fazem parte da constituição do meio de cultura e das próprias microalgas. No entanto, considera-se que a massa seca é a massa resultante do ensaio a 120°C, uma vez que é este o padrão normalmente usado. Pela análise da Figura 22 confirma-se que quanto maior é a temperatura, menor é o tempo de secagem, embora esta relação não seja linear. Um aumento de 60°C para 90°C permite uma grande redução do tempo de secagem para atingir a mesma percentagem de humidade, mas um aumento de 90°C para 120°C apresenta uma redução de tempo muito inferior.

Foi também calculado o declive das curvas de secagem, em $\text{kg}_{\text{água}}/(\text{kg}_{\text{massa seca}}\cdot\text{min})$, de modo a conhecer a variação temporal da taxa de secagem da suspensão de microalgas. Foram obtidos os resultados apresentados na Figura 23.

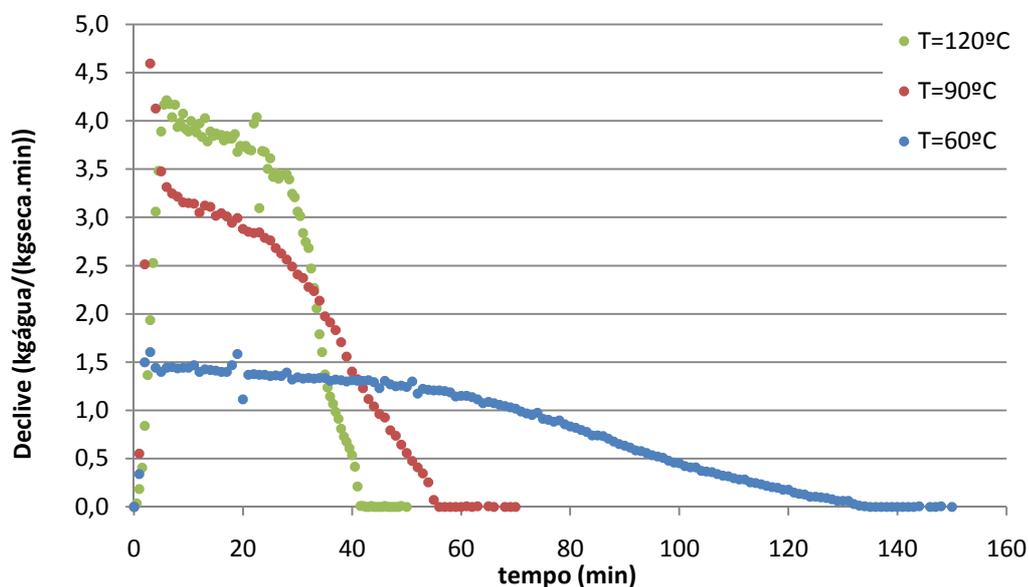


Figura 23 – Variação do declive das curvas de secagem ao longo do tempo de secagem.

Como se pode observar, existem 4 etapas na curva de secagem. Uma primeira etapa, que é uma *lag phase*, em que a suspensão se encontra em aquecimento até à temperatura de secagem. Numa segunda etapa, o declive é bem definido e é tanto mais elevado quanto maior for a temperatura de secagem. Na etapa seguinte, existe um decréscimo rápido do declive. Esse decréscimo é tanto maior quanto maior for a temperatura de secagem. Finalmente, o declive deixa de variar substancialmente, quando é atingida a massa final.

Na segunda etapa, esperava-se uma taxa de evaporação de água constante. A variação de declive nessa etapa é explicada pela acumulação parcial de vapor dentro da balança. Esta acumulação diminui a *driving-force* de evaporação, o que se traduz numa diminuição de taxa de evaporação. O facto da taxa de evaporação ter um maior decréscimo para maiores temperaturas corrobora esta explicação, já que a altas temperaturas a acumulação é mais rápida, enquanto para temperaturas menores, como a taxa de evaporação é menor, o vapor formado tem tempo para ir saindo pelos orifícios localizados na tampa da balança.

Na terceira etapa, a taxa de evaporação diminui com a diminuição da percentagem de humidade presente. Isso acontece porque a presença das microalgas (partículas sólidas) provoca um aumento da entalpia de evaporação, pois há menos água livre, restando água ligada para evaporar. É essa diferença de entalpia de evaporação que distingue as etapas 2 e 3. Nesta fase, também ocorre alguma transferência de água do interior das células para o

exterior, pelo que a resistência da membrana celular a esta transferência também pode contribuir para um aumento da dificuldade da transferência de massa.

Também se pode representar a taxa de variação de massa de água em função da percentagem de massa inicial. Nesse caso, obtêm-se os resultados ilustrados na Figura 24.

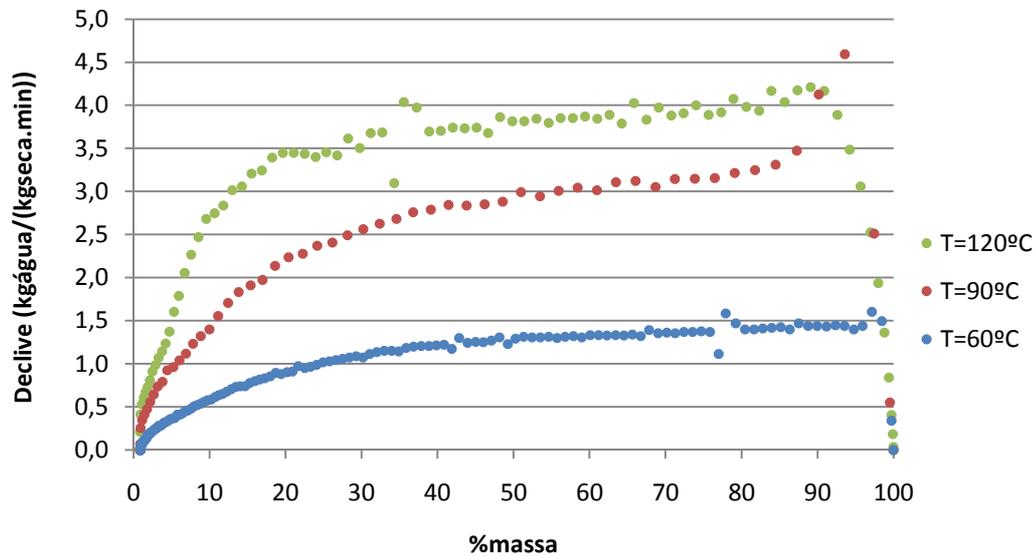


Figura 24 – Variação do declive das curvas de secagem em função da percentagem de massa inicial.

Pela análise da Figura 24 conclui-se que se conseguem ter boas taxas de secagem até se obter aproximadamente 20% da massa inicial. A partir deste valor o declive diminui, conseguindo-se ainda obter boas velocidades de secagem até cerca de 5% da massa inicial. Este comportamento é mais facilmente observado na curva correspondente à temperatura de 120°C.

Através da análise da massa de água evaporada é possível calcular uma estimativa do calor mínimo que é necessário fornecer. Desprezando os efeitos de mistura e as resistências à transferência de calor e massa já discutidas, recorrendo ao valor de entalpia de evaporação da água, obtém-se um valor de 269 kJ/g_{seca}. Devido às aproximações efectuadas este é um valor aproximado por defeito, ou seja, o valor real será sempre superior a este, e esta estimativa deve ser vista com uma estimativa de ordem de grandeza.

6.2 Análise e Selecção de Processos de Secagem

Conhecida uma estimativa do valor de energia que é necessário utilizar para secar a biomassa, podem-se analisar as soluções de secagem que conduzam a menores gastos energéticos. Existem vários processos possíveis para, numa primeira fase, espessar a suspensão de microalgas, e secar essa biomassa, numa segunda fase. Esta ordem é importante, uma vez que as tecnologias de separação de sólidos em líquidos são relativamente baratas mas só conseguem atingir um determinado limite de humidade. A partir desse limite, é necessário secar recorrendo a energia térmica. Entre as soluções de espessamento contam-se a sedimentação, a centrifugação, a flotação, a filtração e a floculação (Brennan e Owende, 2009; Chen *et al.*, 2010). A floculação pode ser usada como complemento das restantes técnicas para melhorar a sua eficiência.

Se houver energia térmica disponível (não aproveitável para outros fins) e em quantidade suficiente de tal forma que seja possível secar a biomassa sem recorrer a uma etapa de espessamento, essa solução é preferível. Nesse caso, podem ser usados sistemas de secagem em estufa, por *flash dryer*, *spray dryer*, entre outros (Perry e Green, 1997). A escolha do equipamento depende da humidade que se pretende para o produto final. Caso se pretenda um composto de microalgas sólido ou muito viscoso, a secagem por *spray dryer* é recomendada, uma vez que é obtida biomassa com um baixo grau de humidade de uma forma simples e relativamente barata, utilizando apenas um fluido quente. Esta é também a técnica utilizada na indústria alimentar e farmacêutica (Perry e Green, 1997). Um *spray dryer* típico consiste na atomização da mistura a separar, que é depois aquecida por um fluido quente (ver Figura 2). Esse contacto entre fluidos pode-se dar em co-corrente ou contracorrente. Ao aquecer, a água da mistura atomizada evapora e os sólidos são compactados. Regulando a atomização consegue-se manipular a distribuição de tamanho dos sólidos. Os sólidos são recolhidos na base do equipamento e podem ainda passar por um leito fluidizado vibrante para maior eficiência de desumidificação. O fluido quente, à saída do *spray dryer*, pode ainda ser utilizado para pré-aquecer a biomassa ou ter outra utilização mediante integração energética (Perry e Green, 1997).

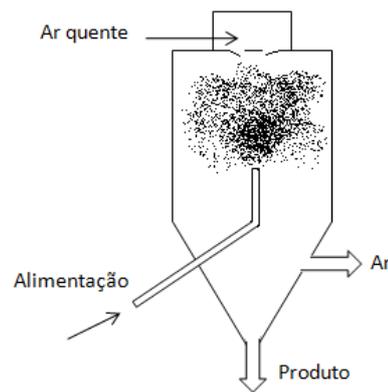


Figura 25 – Esquema simplificado de um *spray dryer* (adaptado de Perry e Green, 1997)

No caso de se pretender atingir uma poupança de utilidade quente, é necessário considerar as soluções de espessamento como complemento às soluções de secagem. De uma forma geral, a sedimentação é o processo mais barato, pelo que deve ser preferido numa primeira etapa, embora a semelhança do valor das densidades das microalgas e da água não torne este processo muito eficiente e possa obrigar à utilização de um sedimentador de grandes dimensões. A floculação pode aumentar a eficiência deste processo ou dos restantes, mas leva à introdução de compostos químicos que têm um efeito directo na composição do produto final e encarecem o processo. Por estes motivos, a floculação não é recomendável. Também a flotação apresenta custos de operação superiores à sedimentação, uma vez que é necessário bombear microbolhas de ar que conduzam à agregação das microalgas à superfície. No entanto, este processo não apresenta provas dadas de capacidade técnica e económica relativamente à separação de microalgas, pelo que não é recomendável nesta fase (Brennan e Owende, 2010). A centrifugação é um processo que apresenta uma grande capacidade de separação, mas também a um custo mais elevado devido à necessidade de gerar elevadas forças centrífugas. A filtração é um processo relativamente barato do ponto de vista de custos de operação, mas caro em custos de investimento. No entanto, apresenta uma capacidade de separação muito superior à sedimentação e custos geralmente inferiores à centrifugação. Porém, uma filtração simples apenas consegue separar células de maior dimensão ($>70 \mu\text{m}$). Para separar microalgas de menores dimensões ($<30 \mu\text{m}$) como a *Chlorella*, é necessário recorrer à microfiltração ou à ultrafiltração (Brennan e Owende, 2010). Por isso, para grandes escalas, a necessidade de substituição de microfiltros pode conduzir a custos superiores à centrifugação (Brennan e Owende, 2010).

Concluindo, a filtração é o processo recomendado, embora os custos tenham que ser comparados com a centrifugação para se fazer uma escolha mais económica para uma determinada cultura de microalgas produzida a uma determinada escala. Este processo pode ser ou não precedido de uma sedimentação, dependendo da capacidade de sedimentação das microalgas. Para microalgas que apresentem um longo tempo de sedimentação, este

processo não é recomendado, já que levaria à utilização de um sedimentador de grandes dimensões.

Após a etapa de espessamento, é necessário utilizar calor para desumidificar a biomassa. Nesta etapa, como referido acima, pode-se recorrer a um *spray dryer* ou outro tipo de equipamento de acordo com a finalidade escolhida, utilizando calor que exista disponível e não aproveitado. Desta forma, não é dispendida tanta energia, uma vez que já não é necessário evaporar uma grande percentagem da água que foi separada pela operação anterior. Assim, o valor de calor necessário já não será $269 \text{ kJ/g}_{\text{seca}}$, mas sim algo inferior, dependendo da eficiência da tecnologia escolhida para a etapa de espessamento. O produto final será uma pasta de biomassa altamente concentrada, ou biomassa em blocos sólidos. Se o objectivo for a produção de biodiesel, deve ser feita a extracção e purificação dos óleos presentes na biomassa, seguida de uma transesterificação (Amin, 2009). Se se pretender extrair diferentes produtos de valor acrescentado, como certos óleos ou proteínas, também se deverá proceder a uma extracção.

7. Conclusões

Este trabalho centrou-se na produção de microalgas autóctones em fotobiorreactores (PBRs) tubulares horizontais, sujeitos a condições atmosféricas. Na realização deste trabalho foi possível entender o potencial de contribuição do processo de produção de microalgas para os objectivos de redução de emissões de gases com efeito de estufa, assim como para a produção de uma diversificada gama de produtos com diversas aplicações. As tarefas principais incidiram na determinação das necessidades energéticas de um fotobiorreactor e da etapa de secagem subsequente, bem como a análise do controlo de temperatura do meio de cultura como forma de maximizar a produtividade. Essa análise passou pela simulação dos perfis de temperatura em função de parâmetros relacionados com as condições atmosféricas.

Em primeiro lugar, foram analisados os factores que mais contribuem para a variação de temperatura do meio de cultura dos fotobiorreactores. Concluiu-se que os factores mais importantes são a radiação solar e a transferência de calor por convecção para o ar ambiente. A radiação solar é a principal responsável pelo aquecimento do meio de cultura, enquanto os fenómenos convectivos contribuem para que a temperatura do meio de cultura tenda a aproximar-se da temperatura ambiente. Foram desenvolvidos modelos que traduzem o perfil de temperatura diário do meio de cultura de um PBR com e sem recurso a um sistema de controlo de temperatura por aspersão. Esses modelos foram validados com êxito, recorrendo a ferramentas computacionais e por comparação com dados reais disponíveis do processo industrial de produção de microalgas aqui estudado. No caso de não haver aspersão, obtiveram-se erros relativos médios de 2,3% nas temperaturas máximas (Verão) e 2,9% nas temperaturas mínimas (Inverno); com o uso de aspersão, o erro relativo obtido no Verão foi de 2,7% nas temperaturas máximas. Estes valores reflectem uma boa concordância entre os perfis de temperatura reais e os obtidos pelos modelos desenvolvidos neste trabalho. A partir destes modelos foi desenvolvida uma metodologia de previsão do perfil de temperatura do meio de cultura num PBR, sujeito a determinadas condições atmosféricas, que permite tomar decisões quanto à activação do sistema de controlo de temperatura.

Tendo em vista as necessidades energéticas de PBRs após um processo de *scale-up*, foram calculados os calores necessários em vários cenários e o total anual. Concluiu-se que se conseguem obter poupanças significativas de energia (na ordem de 73%) se for utilizado o sistema de controlo de temperatura apenas durante o fotoperíodo (período produtivo). Também se verificou que o calor a fornecer ao processo para manter a temperatura dentro dos limites definidos é elevado (cerca de 9500 MWh num ano).

Foram estudadas várias hipóteses de sistemas para controlo de temperatura e concluiu-se que o mais prático e eficiente do ponto de vista do controlo é o que envolve a

utilização de aspersores, tal como é usado pela empresa. Este resultado é explicado pela grande área de transferência de calor que esta solução apresenta, e pela maior *driving-force* devido ao abaixamento da temperatura da água por evaporação.

A jusante do processo produtivo, foram analisados vários processos de secagem que permitem obter os produtos pretendidos. Este estudo foi complementado com ensaios de curvas de secagem que permitiram delimitar a necessidade de calor para a secagem da biomassa. Dependendo do objectivo final da biomassa e da disponibilidade de energia térmica, as soluções mais adequadas passam por uma secagem em *spray dryer* complementada, ou não, *a priori* por um sistema de filtração ou centrifugação. A decisão de escolha entre estas tecnologias passa por factores económicos e de escala.

Como trabalho futuro sugere-se a avaliação da influência da temperatura na cinética de crescimento das microalgas. Para isso, é necessário conhecer em detalhe como se comportam as espécies das microalgas envolvidas neste processo produtivo, que factores afectam o seu crescimento, e como a velocidade de crescimento varia ao longo do tempo. Só conhecendo a cinética de crescimento das microalgas é possível encontrar a relação entre a temperatura do meio de cultura e a produtividade.

Sugere-se ainda um melhor registo dos factores atmosféricos que foram identificados neste trabalho como fundamentais na variação da temperatura do meio de cultura. Desta forma, é possível melhorar a exactidão dos resultados obtidos por qualquer modelo e alcançar uma melhor optimização do processo.

Bibliografia

- 1) Agência Portuguesa do Ambiente; <http://www.apambiente.pt>; consultado em 2010;
- 2) Ahmad, A.L., Yasin, N.H. M., Derek, C.J.C., Lim, J.K., 2011; Microalgae as a sustainable energy source for biodiesel production: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, 584–593;
- 3) Akkerman, I., Janssen, M., Rocha, J., Wijffels, R. H., 2002; Photobiological hydrogen production: photochemical efficiency and bioreactor design; *International Journal of Hydrogen Energy* 27; 1195 – 1208;
- 4) Amin, S., 2009; Review on biofuel oil and gas production processes from microalgae, *Energy Conversion and Management* 50, 1834–1840;
- 5) Barsanti, L., Gualtieri, P., 2006; *Algae Anatomy, Biochemistry, and Biotechnology*; CRC Press, Taylor & Francis Group;
- 6) Bird, R.B., Stewart, W.E., Lightfoot, E.N., 2002; *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, Inc., 2nd edition;
- 7) Brennan, L., Owende, P., 2010; Biofuels from microalgae—A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 557–577;
- 8) Carozzi P. 2000; Hydrodynamic aspects and *Arthrospira* growth in two outdoor tubular undulating row photobioreactors, *Applied Microbiology and Biotechnology*; 54(1):14–22;
- 9) Carozzi P., 2003; Dilution of solar radiation through “culture” lamination in photobioreactor rows facing south-north: a way to improve the efficiency of light utilization by cyanobacteria (*Arthrospira platensis*), *Biotechnology and Bioengineering*; 81(3):305–15;
- 10) Çengel, Y. A., 1998; *Heat Transfer: A Practical Approach*, McGraw-Hill;
- 11) Chen, C.-Y., Yeh, K.-L., Aisyah, R., Lee, D.-J., Chang, J.-S., 2011; Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review, *Bioresource Technology* 102, 71–81;
- 12) Cheng-Wu Z., Zmora O., Kopel R., Richmond A., 2001; An industrial-size flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. (Eustigmatophyceae), *Aquaculture*; 195(1–2):35–49;
- 13) Comissão das Comunidades Europeias, 2008; Package of Implementation measures for the EU's objectives on climate change and renewable energy for 2020; Bruxelas, SEC 85/3;
- 14) Converti A., Lodi A., Del Borghi A., Solisio C. 2006; Cultivation of *Spirulina platensis* in a combined airlift-tubular reactor system, *Biochemical Engineering Journal*; 32(1):13–8;
- 15) Cussler, E.L., 1997; *Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems*, Cambridge University Press;

- 16) Doucha J., Straka F., Lívanský K. 2005; Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor, *Journal of Applied Phycology*; 17(5):403–12;
- 17) Fernández F.G.A., Sevilla J.M.F., Perez J.A.S., Grima E.M., Chisti Y., 2001; Airlift-driven external-loop tubular photobioreactors for outdoor production of microalgae: assessment of design and performance, *Chemical Engineering Science*; 56(8): 2721–32;
- 18) Grima E.M., Belarbi E.H., Fernández F.G.A., Medina A.R., Chisti Y., 2001; Tubular photobioreactor design for algal cultures, *Journal of Biotechnology*; 92(2):113–31;
- 19) Hall D.O., Fernández F.G.A., Guerrero E.C., Rao K.K., Grima E.M., 2003; Outdoor helical tubular photobioreactors for microalgal production: modeling of fluid-dynamics and mass transfer and assessment of biomass productivity, *Biotechnology and Bioengineering*; 82(1):62–73;
- 20) Holman, J. P., 1997; *Heat Transfer*, McGraw-Hill, 8th edition;
- 21) Huntley M., Redalje D. 2007; CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: a new appraisal, *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*; 12(4):573–608;
- 22) Incropera, F. P., DeWitt, D. P., 1998; *Fundamentos de Transferência de Calor e Massa*, LTC Editora, 4^a edição;
- 23) Industrial Needs; <http://www.industrial-needs.com/technical-data-scales/moisture-analyser-balance-pce-mb-series.htm>; consultado em 2010;
- 24) Lopez M.C.G.M., Sanchez E.R., Lopez J.L.C., Fernández F.G.A., Sevilla J.M.F., Rivas J., *et al.*, 2006; Comparative analysis of the outdoor culture of *Haematococcus pluvialis* in tubular and bubble column photobioreactors, *Journal of Biotechnology*; 123(3):329–42;
- 25) 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, 217–232;
- 26) Olaizola M., 2000; Commercial production of astaxanthin from *Haematococcus pluvialis* using 25,000-liter outdoor photobioreactors, *Journal of Applied Phycology*; 12(3):499–506;
- 27) Perry, R.H., Green, D.W., 1997; *Perry's Chemical Engineers' Handbook*, McGraw-Hill, 7th edition;
- 28) Rubio, F. C., Fernández F.G.F., Pérez J.A.S., Camacho F.G., Grima E.M., 1999; Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture; *Biotechnology and Bioengineering*; 62(1): 71–86;
- 29) Sato T., Usui S., Tsuchiya Y., Kondo Y. 2006; Invention of outdoor closed type photobioreactor for microalgae, *Energy Conversion and Management*; 47(6):791–9;
- 30) Shiny, K.J., Remani, K.N., Nirmala, E., Jalaja, T.K., Sasidharan V.K., 2005; Biotreatment of wastewater using aquatic invertebrates, *Daphnia magna* and *Paramecium caudatum*; *Bioresource Technology* 96, 55–58;

- 31) Stewart, C., Hessami, M.-A., 2005; A study of methods of carbon dioxide capture and sequestration – the sustainability of a photosynthetic bioreactor approach; *Energy Conversion and Management*; 46(3): 403-420;
- 32) The Engineering Toolbox, www.engineeringtoolbox.com; consultado ao longo de 2010;
- 33) Ugwu C.U., Ogbonna J., Tanaka H., 2002; Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers, *Applied Microbiology and Biotechnology*; 58(5):600–7;
- 34) Zittelli G.C., Rodolfi L., Biondi N., Tredici M.R. 2006; Productivity and photosynthetic efficiency of outdoor cultures of *Tetraselmis suecica* in annular columns. *Aquaculture*; 261(3):932–43;

Anexos

Anexo I – Análise de sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade para perceber qual a influência que cada variável tem no resultado final. Foi analisada a variação de 10% em cada variável em estudo. Os resultados encontram-se na Tabela 7. Como se pode ver, a maior contribuição na temperatura máxima atingida (T_{max}) vem do calor de radiação solar.

Tabela 7 – Resultados da análise de sensibilidade; T_{max} refere-se à temperatura máxima atingida num dia médio de Verão (cenário típico de Verão);

Variável alterada	Variável em estudo	Efeito da seguinte variação na variável em estudo (%)	
		-10%	+10%
$\rho_{cultura}$	h_i	-8,1	7,9
$V_{cultura}$	h_i	-8,1	7,9
$\mu_{cultura}$	h_i	5,4	-4,6
$c\rho_{cultura}$	h_i	-3,1	2,9
v_{ar}	h_o	-5,6	5,4
η_{ar}	h_o	6,0	-5,1
μ_{ar}	h_o	-4,1	3,9
$c\rho_{ar}$	h_o	-4,1	3,9
k_{ar}	h_o	-6,2	5,9
h_i	U	-0,1	0,1
h_o	U	-6,4	5,9
$k_{acrílico}$	U	-4,0	3,6
$P_{a_{amb}}$	N_A	11,2	-11,3
V_t	T_{max}	0,2	-0,2
V_{ta}	T_{max}	0,3	-0,2
Qrad	T_{max}	-3,2	3,1
Qconv	T_{max}	1,5	-1,4
Qtr	T_{max}	1,2	-1,0
Qnat	T_{max}	0,0	0,0
Qevap	T_{max}	0,2	-0,2
Qradl	T_{max}	0,0	-0,0

Anexo II – Funções Desenvolvidas no Matlab

Neste anexo são apresentadas as funções desenvolvidas no Matlab. Devido ao acordo de confidencialidade mantido entre as partes envolvidas neste trabalho, os dados relativos aos PBRs e ao processo de produção de microalgas foram substituídos por dois asteriscos (**). Os dados a preencher pelo utilizador foram substituídos por um asterisco (*).

Programa principal: simulador.m

```

%% Simulador da temperatura de fotobiorreactores na UPPM de Pataias
clear;close all;clc
global dados sizePBR volume vento dadosH Tsetpoint

%% Inputs a preencher pelo utilizador (*)
% seleccione uma data ou um cenário
% ex dia: 010110; ex cenário: vermed (verao), verext (verao extremo),
% invmed (inverno), invext (inverno2 extremo), primed (primavera)
data = '*';
% selecção do PBR
sizePBR = '*'; % seleccionar o tamanho do PBR aqui: xl, l, m, s, xs, x
volume = *; % selecção de volume (opcional; obrigatório só para PBR X) [m3]
vento = *; % velocidade média do vento [m/s]
% para realizar uma previsão de temperatura, digite 'sim' (não é necessário
% definir a data nem realizar mais nenhum balanço)
prever = '*';
Tmax = *; % temperatura máxima [°C]
Tmin = *; % temperatura mínima [°C]
tinicial = *; % hora a que se inicia o fotoperíodo [h]
nuvens = *; % existência de nebulosidade (2 para céu escuro, 1 para nuvens,
0 para céu limpo)
Tsetpoint = *; % temperatura de setpoint para o controlo de temperatura
% para cálculo dos calores transferidos no set point, digite 'sim'
calcsp = '*';
Tsp = [* *]; % intervalo de temperaturas de set point [°C]
Tar = [* *]; % temperaturas de entrada e saída da água de arrefecimento
[°C]
Taf = [* *]; % temperaturas de entrada e saída da água de aquecimento [°C]
Tarf = [* *]; %temperaturas de entrada e saída do ar de aquecimento da água
de aquecimento [°C]
U = *; % coeficiente global de transferência de calor água-água [W/(m2.°C)]
U2 = *; % coeficiente global de transferência de calor ar-água (para o lado
da água) [W/(m2.°C)]
% para realizar um balanço sem controlo de temperatura, digite 'sim'
balsemtermo = '*';
% para realizar um balanço com controlo de temperatura por aspersão, digite
'sim'
baltermo = '*';
% para guardar os dados obtidos na simulação, digite 'sim' (apenas para os
% balanços com e sem controlo de temperatura)
guardar = '*';

%% Abrir os dados necessários
if strcmp(data,'vermed')==1 || strcmp(data,'verext')==1 ||
strcmp(data,'invmed')==1 || strcmp(data,'invext')==1 ||
strcmp(data,'primed')==1

```

```

    dados = strcat('Dados\cen',data);
    load(dados)
else
    dados = strcat('Dados\data',data);
    load(dados)
end

%% Construção das curvas de T ambiente e radiação solar, e parâmetros
t0 = hTamb(1); % [h]
tf = hTamb(end); % [h]
f = 1; % numeração de figuras
tt = t0:0.1:tf; % [h]
GS = feval(cR,tt); % [W/(m2.°C)]
Tamb = feval(cTamb,tt); % [°C]

%% Previsão de perfil de temperatura
if strcmp(prever,'sim')==1
    if nuvens==0 % céu limpo
        GSmax1=**;
        GSmax2=**;
    elseif nuvens==1 % com nuvens
        GSmax1=**;
        GSmax2=**;
    elseif nuvens==2 % céu escuro
        GSmax1=**;
        GSmax2=**;
    end
    coefH=25;
    [t1,T1,ttr1,Ttr1,tt2,Tamb2] = previsao( Tmax,Tmin,tinicial,GSmax1,coefH
);
    coefH=10;
    [t2,T2,ttr2,Ttr2] = previsao( Tmax,Tmin,tinicial,GSmax2,coefH );
    if max([T1;T2])<30
        disp('Não é necessário recorrer à controlo de temperatura')
    end

    % plots
    figure(f)

    plot(t1,T1,'r',ttr1,Ttr1(:,1),'b',tt2,Tamb2,'g',t2,T2,'m',ttr2,Ttr2(:,1),'c
');
    xlim([t1(1) t1(end)])
    xlabel('t/h'); ylabel('T/°C');

    legend('Tsim.max','Tc/tr.max','Tambiente','Tsim.min','Tc/tr.min','location
','northeast')
    title('Temperatura do PBR sem controlo de temperatura')
    f=f+1;

end

%% Cálculos no intervalo de set point
if strcmp(calensp,'sim')==1
    % Calores transferidos em estado estacionário
    [Qrad,Qconv,Q30] = Calort(tt,Tsp(2));
    [Qrad,Qconv,Q20] = Calort(tt,Tsp(1));
    Q = zeros(1,length(Q20));
    for i = 1:length(Q20)
        if Q30(i)<0
            Q(i) = Q30(i);
        elseif Q20(i)>0
            Q(i) = Q20(i);
        end
    end
end

```

```

end
end

% gráfico
figure(f)
plot(tt,Q/1000)
legend('Qnec','location','northeast')
title('Calor que é necessário trocar para atingir o set point')
xlim([tt(1) tt(end)])
xlabel('t/h'); ylabel('Q/kW');
f = f+1;

% Cálculos do controlo de temperatura
[ Do,Di,nl,nh,lt,L,Vt ] = pbr( sizePBR,volume );
cp = **; % capacidade calorífica da mistura [J/(kg.°C)]
v = **; % velocidade [m/s]
rho = **; % rho da mistura [kg/m3]
cpar = **; % capacidade calorífica do ar [J/(kg.°C)]
rhoar = **; % rho do ar [kg/m3]
m = nl*(pi*(Di^2)/4)*v*rho; % caudal mássico [kg/s]
dT = -Q/(m*cp); % aumento de T [°C]

% Determinação do consumo de utilidade fria
Qremove = max(-Q); % calor máximo a remover [W]
Qfornecer = max(Q); % calor máximo a fornecer [W]
if Qremove<=0
    Qremove=0;
end
if Qfornecer<=0
    Qfornecer=0;
end
Qrtot = -trapz(Q(Q<0))/length(tt)*24;
Qftot = trapz(Q(Q>0))/length(tt)*24;
dTmlr = ((Tsp(2)+max(dT)-Tar(2))-(Tsp(2)-Tar(1)))/log((Tsp(2)+max(dT)-Tar(2))/(Tsp(2)-Tar(1))); % dTml de remoção de calor [°C]
dTmlf = ((Taf(1)-Tsp(1))-(Taf(2)-Tsp(1)-max(dT)))/log((Taf(1)-Tsp(1))/(Taf(2)-Tsp(1)-max(dT))); % dTml de fornecimento de calor com água quente [°C]
dTmlf2 = ((Tarf(1)-Taf(1))-(Tarf(2)-Taf(2)))/log((Tarf(1)-Taf(1))/(Tarf(2)-Taf(2))); % dTml de aquecimento da água quente com ar quente [°C]
Aminr = Qremove/(U*dTmlr); % área mínima necessária à remoção de calor [m2]
Aminf = Qfornecer/(U*dTmlf); % área mínima necessária ao fornecimento de calor [m2]
Aminf2 = Qfornecer/(U2*dTmlf2); % área mínima necessária ao fornecimento de calor à água de aquecimento [m2]
Qaguar = Qremove/(cp*(Tar(2)-Tar(1))); % [kg/s] é necessário o total?
Qaguaf = Qfornecer/(cp*(Taf(1)-Taf(2))); % [kg/s]
Qar = Qfornecer/(cpar*(Tarf(1)-Tarf(2))); % [kg/s]

tabela = [Qremove/1000 Qrtot/1000 Aminr Qfornecer/1000 Qftot/1000 Aminf Aminf2];
disp('Variáveis de trocas de calor para manter a temperatura de set point')
disp('
_____')
disp('          Calor a remover          Área mínima (m2)          Calor a fornecer
Áreas mínimas (m2)')
disp(' máximo (kW) total (kWh)          água-cultura          máximo (kW) total
(kWh) água-cultura ar-água')

```

```

disp('
_____')
fprintf(' %6.1f %6.1f %6.1f %6.1f %6.1f
%6.1f %6.1f\n', tabela')
disp('
_____')
fprintf('\n')
end

%% Balanço Energético sem termoregulação
if strcmp(balsemtermo,'sim')==1
    [t,T] = ode45(@balanco,[t0 tf],Tamb(1));
    figure(f)
    plot(t,T,'r',tt,Tamb,'b');
    xlim([t(1) t(end)])
    xlabel('t/h'); ylabel('T/°C');
    legend('Tsimulada','Tambiente','location','northeast')
    title('Temperatura do PBR sem controlo de temperatura')
    f = f+1;
end

%% Balanço Energético com controlo de temperatura
if strcmp(baltermo,'sim')==1
    if strcmp(data,'02D15D')==1 || strcmp(data,'26A02S')==1
        dadosH = strcat('Dados\dataH',data);
    else
        disp('A humidade do ar foi estimada')
        dadosH=0;
    end
    Ta = Tamb(1); % estimativa da temperatura inicial da água de controlo
    de temperatura por aspersão [°C]
    [t,T] = ode45(@balancotr,[t0 tf],[Tamb(1) Ta(1) Ta(1)]);
    figure(f)
    plot(t,T(:,1),t,T(:,2),t,T(:,3),tt,Tamb)
    legend('T','Treservatório','Tagua','Tamb','location','northeast')
    xlim([t(1) t(end)])
    xlabel('t/h'); ylabel('T/°C');
    title('Temperatura do PBR com controlo de temperatura')
    f = f+1;
end

%% Guardar os dados obtidos
if strcmp(guardar,'sim')==1
    for l=1:length(t)
        SM(2*l-1) = t(l);
        SM(2*l) = T(l);
    end
    fid = fopen(strcat('Resultados/result',data,'.txt'),'w');
    fprintf(fid,'data: ');
    fprintf(fid,'%s\n',data);
    fprintf(fid,'vento (m/s): ');
    fprintf(fid,'%2.2f\n',vento);
    fprintf(fid,'tempo (h) temperatura (°C)');
    fprintf(fid,'\n');
    fprintf(fid,'%f %f\n',SM);
    fclose(fid);
end

```

```

function [dTdt] = balanco(t,T)
%BALANCO Balanço energético sem termoregulação
% Análise das entradas e saídas do processo assumindo-o como homogéneo,
% com variação no tempo
global dados sizePBR volume vento

load(dados)
GS = feval(cR,t); % [W/(m2.°C)]
Tamb = feval(cTamb,t); % [°C]
[ Do,Di,nl,nh,lt,L,Vt ] = pbr( sizePBR,volume );

%% Radiação
Arad = lt*L; % área de radiação [m2]
e = **; % coeficiente de emissão/absorção do plástico
Qrad = e*GS*Arad; % calor relativo à radiação [W]

%% Convecção
At = nl*nh*L*pi*Do; % área de transferência de calor [m2]
kacril = **; % condutividade térmica do acrílico [W/(m.°C)]
rho = **; % massa volúmica da mistura [kg/m3]
v = **; % velocidade da mistura [m/s]
miu = **; % viscosidade da mistura [Pa.s]
cp = **; % capacidade calorífica da mistura [J/(kg.°C)]
k = **; % condutividade térmica da mistura [W/(m.°C)]
Re = rho*Di*v/miu; % nº de Reynolds
Pr = miu*cp/k; % nº de Prandtl
n = 0.3; % expoente da correlação de Dittus-Boelter para arrefecimento
Nu = 0.023*(Re^0.8)*(Pr^n); % correlação de Dittus-Boelter
hi = Nu*k/Di; % coeficiente de transferência de calor interno [W/(m2.°C)]
var = vento; % velocidade do ar [m/s] %ou 2.5
niudar = 1.51*(10^(-5)); % viscosidade dinâmica do ar [m2/s]
miuar = 1.82*(10^(-5)); %viscosidade do ar [Pa.s]
cpar = 1.01*1000; % cp do ar [J/(kg.°C)]
kar = 0.026; % condutividade térmica do ar [W/(m.°C)]
Rear = Do*var/niudar; % Re do ar
Prar = miuar*cpar/kar; % Pr do ar
Nuar =
0.3+0.62*(Rear^(1/2))*(Prar^(1/3))*((1+(Rear/282000)^(5/8))^(4/5))/((1+((0.4/Prar)^(2/3))^(1/4)));
ho = Nuar*kar/Do; % coeficiente de transferência de calor externo
[W/(m2.°C)]
U = 1/(1/ho + Do*log(Do/Di)/(2*kacril) + Do/(hi*Di)); % coeficiente global
de transferência de calor [W/(m2.°C)]
Qconv = U.*At.*(T-Tamb); % calor de convecção [W]

%% Renovação da cultura
mren = **; % caudal de renovação [kg/s]
Tsaida = Tamb+(T-Tamb)/4;
if t>=7.5 && t<=19.5
    Qren = mren*cp*(Tsaida-T);
else
    Qren = 0;
end

%% Modelo das Necessidades Energéticas
% m.cp.dT/dt = Qrad(t) -Qr -Q(t)
dTdt = (Qrad-Qconv-Qren).*3600./(rho.*Vt.*cp); % [W]

end

```

Função balancoctr.m

```

function [dTdt] = balancoctr(t,T)
%BALANCO Balanço energético com termoregulação
% Análise das entradas e saídas do processo assumindo-o como homogéneo,
% com variação no tempo
global dados sizePBR volume vento dadosH Tsetpoint

dTdt=zeros(3,1);
load(dados)
GS = feval(cR,t); % [W/(m2.°C)]
Tamb = feval(cTamb,t); % [°C]
[ Do,Di,nl,nh,lt,L,Vt ] = pbr( sizePBR,volume );
nPBR = **;
if dadosH==0
    Hum = (95-GS/20)/100 ; % estimativa da humidade do ar [fração]
else
    load(dadosH)
    Hum = feval(cHum,t)/100; % humidade do ar [fração]
end
var = vento; % velocidade do ar [m/s]
if vento>=1
    Taguarenov = 15;
else Taguarenov = 8;
end

%% Radiação nos PBRs
Arad = lt*L; % área de radiação [m2]
e = **; % coeficiente de emissão/absorção do plástico

%% Convecção
kacril = **; % condutividade térmica do acrílico [W/(m.°C)]
rho = **; % massa volúmica da mistura [kg/m3]
v = **; % velocidade da mistura [m/s]
miu = **; % viscosidade da mistura [Pa.s]
cp = **; % capacidade calorífica da mistura [J/(kg.°C)]
k = **; % condutividade térmica da mistura [W/(m.°C)]
Re = rho*Di*v/miu; % n° de Reynolds
Pr = miu*cp/k; % n° de Prandtl
n = 0.3; % expoente da correlação de Dittus-Boelter para arrefecimento
Nu = 0.023*(Re^0.8)*(Pr^n); % correlação de Dittus-Boelter
hi = Nu*k/Di; % coeficiente de transferência de calor interno [W/(m2.°C)]
niudar = 1.51*(10^(-5)); % viscosidade dinâmica do ar [m2/s]
miuar = 1.82*(10^(-5)); % viscosidade do ar [Pa.s]
cpar = 1.01*1000; % cp do ar [J/(kg.°C)]
kar = 0.026; % condutividade térmica do ar [W/(m.°C)]
Rear = Do*var/niudar; % Re do ar
Prar = miuar*cpar/kar; % Pr do ar
Nuar =
0.3+0.62*(Rear^(1/2))*(Prar^(1/3))*((1+(Rear/282000)^(5/8))^(4/5))/((1+((0.4/Prar)^(2/3))^(1/4)));
ho = Nuar*kar/Do; % coeficiente de transferência de calor externo
[W/(m2.°C)]
U = 1/(1/ho + Do*log(Do/Di)/(2*kacril) + Do/(hi*Di)); % coeficiente global
de transferência de calor [W/(m2.°C)]

%% verificação da existência de controlo de temperatura
if T(1)>=Tsetpoint
    % Dados para a convecção e radiação
    ea = 0.2; % coeficiente de absorvidade da água
    At = **; % área de transferência de calor [m2]
    Atagua = **; % área de transf. da água [m2]

```

```

Va = **; % volume de água de controlo de temperatura nos PBRs [m3]
va = **; % velocidade média de queda da água [m/s]
miua = 0.001; % viscosidade da água [Pa.s]
cpa = 4.18*1000; % capacidade calorífica da água [J/(kg.°C)]
ka = 0.6; % condutividade térmica da água [W/(m.°C)]
Rea = rho*Do*va/miua; % n° de Reynolds para a aspersão
Pra = miua*cpa/ka; % n° de Prandtl da água
Nua =
0.3+0.62*(Rea^(1/2))*(Pra^(1/3))*((1+(Rea/282000)^(5/8))^(4/5))/((1+((0.4/P
ra)^(2/3))^(1/4))); % correlação de Churchill e Bernstein
hia = Nua*ka/Do; % coef. de transf. interna para a aspersão
[W/(m2.°C)]
niudar = 1.51*(10^(-5)); % viscosidade cinemática do ar [m2/s]
miuar = 1.82*(10^(-5)); %viscosidade do ar [Pa.s]
cpar = 1.01*1000; % cp do ar [J/(kg.°C)]
U2 = 1/(Do*log(Do/Di)/(2*kacril) + Do/(hi*Di)); % coef. global de
transf. de calor mistura-água [W/(m2.°C)]
Ua = 1/(1/ho + 1/hia); % coef. global de transf. água-ar para a
aspersão [W/(m2.°C)]

% Convecção natural da água no reservatório
c=**; l=**; a=**; % dimensões do reservatório [m]
Ata = c*l; % área de transferência de calor [m2]
P = c*2+l*2; % perímetro [m]
Vta = Ata*a; % volume do reservatório [m3]
L = Ata/P; % dimensão característica [m]
rhoa = 1000; % massa volúmica da água [kg/m3]
cpa = 4.18*1000; % capacidade calorífica da água [J/(kg.°C)]
kar = 0.024; % condutividade térmica do ar [W/(m.°C)]
Da = 2.6*(10^(-5)); % difusividade da água @25°C [m2/s]
beta = 1./(273.15+(T(2)+Tamb)/2); % parametro beta [K-1]
g = 9.8; % aceleração da gravidade [m/s2]
Gr = beta.*g.*(L^3).*abs(T(2)-Tamb)./(niudar^2); % n° de Graschof
Ra = Gr*Prar; % n° de Rayleigh
if T(2)>=Tamb
    Nu = 0.15*(Ra.^(1/3));
elseif T(2)<Tamb
    Nu = 0.27*(Ra.^(1/4));
end
ha = Nu*kar/L;
Qnat = ha.*Ata.*(T(2)-Tamb); % calor de convecção natural [W]

% Evaporação no reservatório
Ma = 0.018; % massa molar da água [kg/mol]
dHv = (3169.2-2.4387*(273.15+(T(2)+Tamb)/2))*1000; % entalpia de
evaporação da água [J/kg]
R = 8.314; % constante dos gases perfeitos [J/(K.mol)]
Pas = 100000*exp(11.793-3887.1/(273.15+T(2)-43.172)); % pressão de
saturação da água [Pa]
Paamb = 0.8*100000*exp(11.793-3887.1/(273.15+Tamb-43.172)); % humidade
no ar ambiente [Pa]
Sc = niudar/Da; % n° de Schmidt
kg = niudar*ha*((Prar/Sc)^(2/3))/(miuar*cpar); % coeficiente de
transferência de massa, pela analogia de chilton colburn [m/s]
NA = kg*Ata*((Pas./(R*(T(2)+273.15)))-(Paamb./(R*(Tamb+273.15)))); %
velocidade de transf. de massa [mol/s]
Qevap = NA.*Ma.*dHv; % calor de evaporação [W]

% Calor de controlo de temperatura, convecção, radiação
Qrad = (1-ea)*e*GS*Arad; % radiação para os tubos [W]
Qtr = U2*Atagua*(T(1)-T(3)); % Calor de controlo de temperatura [W]
Qconv = U.*At.*(T(1)-Tamb); % calor de convecção dos PBRs para o ar [W]

```

```

Qconv2 = Ua*Atagua*(T(3)-Tamb); % calor de convecção da água para o ar
[W]
Qrad2=ea*GS*Arad; % Radiação para a água [W]
% Evaporação da água nos tubos
Pas = 100000*exp(11.793-3887.1/(273.15+Tamb-43.172)); % pressão de
saturação da água [Pa]
Paamb = Hum*Pas; % pressão parcial de água no ar ambiente [Pa]
dHv = (3169.2-2.4387*(273.15+T(3)))*1000; % entalpia de evaporação da
água [J/kg]
kg = niudar*ho*((Prar/Sc)^(2/3))/(miuar*cpar)*0.25; % coeficiente de
transferência de massa, pela analogia de chilton colburn [m/s];
NA = kg*Atagua*((Pas./(R*(T(3)+273.15)))-(Paamb./(R*(Tamb+273.15)))); %
difusão molar [mol/s]
Qevap2 = NA.*Ma.*dHv; % calor de evaporação [W]

% Correntes de saída e entrada do reservatório de água
m = **; % caudal total de água utilizado [kg/s]
c1 = m*cpa*T(2); % corrente de saída do reservatório/entrada da
termorreg. [W]
c2 = m*cpa*T(3); % corrente de entrada do reservatório/saída da
termorreg. [W]

% Modelo das Necessidades Energéticas
dTdt(1) = (Qrad-Qtr-Qconv).*3600./(rho.*Vt.*cp); % balanço ao PBR
dTdt(2) = (-Qevap-Qnat+0.8*c2+0.2*m*cpa*Taguarenov-
c1).*3600./(rhoa.*Vta.*cpa); % balanço ao reservatório de água
dTdt(3) = (Qtr-Qconv2+Qrad2-Qevap2+(c1-
c2)/nPBR).*3600./(rhoa.*Va.*cpa); % balanço à água no controlo de
temperatura nos PBRs (existem 5 PBRs)
else
At = nl*nh*L*pi*Do; % área de transferência de calor [m2]
Qconv = U.*At.*(T(1)-Tamb); % calor de convecção [W]
Qrad = e*GS*Arad; % calor relativo à radiação [W]

% Modelo das Necessidades Energéticas
dTdt(1) = (Qrad-Qconv).*3600./(rho.*Vt.*cp);
dTdt(2) = 0;
dTdt(3) = 0;
end
end

```

Função Calort.m

```

function [Qrad,Qconv,Q,Qtr] = Calort(t,T)
%CALOR Cálculo do calor a retirar do processo de produção de microalgas
% Análise das entradas e saídas do processo assumindo-o como homogéneo,
% com variação no tempo
global dados sizePBR volume vento

load(dados)
GS = (feval(cR,t))'; % [W/(m2.°C)]
Tamb = (feval(cTamb,t))'; % [°C]
[ Do,Di,nl,nh,lt,L,Vt ] = pbr( sizePBR,volume );

%% Radiação
Arad = lt*L; % área de radiação [m2]
e = **; % coeficiente de eficiência de radiação recebida
Qrad = e*GS*Arad; % calor relativo à radiação [W]

```

```

%% Convecção
At = nl*nh*L*pi*Do; % área de transferência de calor [m2]
kacril = **; % condutividade térmica do acrílico [W/(m.°C)]
rho = **; % massa volúmica da mistura [kg/m3]
v = **; % velocidade da mistura [m/s]
miu = **; % viscosidade da mistura [Pa.s]
cp = **; % capacidade calorífica da mistura [J/(kg.°C)]
k = **; % condutividade térmica da mistura [W/(m.°C)]
Re = rho*Di*v/miu; % nº de Reynolds
Pr = miu*cp/k; % nº de Prandtl
n = 0.3; % expoente da correlação de Dittus-Boelter para arrefecimento
Nu = 0.023*(Re^0.8)*(Pr^n); % correlação de Dittus-Boelter
hi = Nu*k/Di; % coeficiente de transferência de calor interno [W/(m2.°C)]
var = vento; % velocidade do ar [m/s]
niudar = 1.51*(10^(-5)); % viscosidade dinâmica do ar [m2/s]
miuar = 1.82*(10^(-5)); % viscosidade do ar [Pa.s]
cpar = 1.01*1000; % cp do ar [J/(kg.°C)]
kar = 0.026; % condutividade térmica do ar [W/(m.°C)]
Rear = Do*var/niudar; % Re do ar
Prar = miuar*cpar/kar; % Pr do ar
Nuar =
0.3+0.62*(Rear^(1/2))*(Prar^(1/3))*((1+(Rear/282000)^(5/8))^(4/5))/((1+((0.4/Prar)^(2/3))^(1/4)));
ho = Nuar*kar/Do; % coeficiente de transferência de calor externo
[W/(m2.°C)]
U = 1/(1/ho + Do*log(Do/Di)/(2*kacril) + Do/(hi*Di)); % coeficiente global
de transferência de calor [W/(m2.°C)]
Qconv = U*At*(T-Tamb); % calor de convecção [W]

%% Renovação da cultura
mren = **; % caudal de renovação [kg/s]
Tsaida = Tamb+(T-Tamb)/4;
for i=1:length(t)
    if t(i)>=7.5 && t(i)<=19.5
        Qren(i) = mren*cp*(Tsaida(i)-T);
    else
        Qren(i) = 0;
    end
end

%% Calor que é necessário retirar
Q=-Qrad+Qconv+Qren;

end

```

Função previsao.m

```

function [t,T,ttr,Ttr,tt,Tamb] = previsao( Tmax,Tmin,t0,GSmax,coefH )
%PREVISAO Previsão do perfil de temperatura dos PBRs de Pataias
% Tmax,Tmin-temperaturas máxima e mínima ambiente previstas (°C),
% t0-início do fotoperíodo (h)
global dados dadosH

%% search for input errors
if nargin~=5
    disp('not enough inputs')
    return
end
if Tmax<Tmin
    disp('input is not correct')
    return

```

```

end

%% estimate the input profiles
tt = 0:0.1:24;
tmed = **; % hora de maior calor (h)
% radiação solar
k = GSmax/((tmed-t0)^2);
GS = (-k.*(tt-t0).*(tt-(2*tmed-t0))); % radiação solar [W/m2]
for i=1:length(GS)
    if GS(i)<1
        GS(i) = 0;
    end
end
end
% Tamb
if (tmed-t0)<5.5
    t02 = 8;
elseif (tmed-t0)>6.5
    t02 = 4;
else
    t02 = 6;
end
k = GSmax/((tmed-t02)^2);
pseudoGS = (-k.*(tt-t02).*(tt-(2*tmed-t02)));
for i=1:length(pseudoGS)
    if pseudoGS(i)<1
        pseudoGS(i) = 0;
    end
end
end
a = Tmax-Tmin;
for i=1:length(tt)
    if tt(i)<tmed
        Tamb(i) = GS(i)/(GSmax/a)+Tmin; % temperatura ambiente (°C)
    else
        Tamb(i) = pseudoGS(i)/(GSmax/a)+Tmin; % temperatura ambiente (°C)
    end
end
end
% humidade
Hum = (95-GS/coefH);

%% interpolate and save the data (1)
dados = 'Dados\previsao';
f = fittype('nearestinterp');
[cR] = fit(tt',GS',f);
[cTamb] = fit(tt',Tamb',f);
save(dados,'cR','cTamb')
dadosH = 'Dados\previsaoH';
[cHum] = fit(tt',Hum',f);
save(dadosH,'cHum')

%% functions (1)
[t,T] = ode45(@balanco,[0 24],Tmin);
[ttr,Ttr] = ode45(@balancotr,[0 24],[Tamb(1) Tamb(1) Tamb(1)]);

end

```

Função auxiliar pbr.m

```

function [ Do,Di,nl,nh,lt,L,Vt ] = pbr( size,volume )
%PBR Summary of this function goes here
% Detailed explanation goes here
if size=='xl'

```

```

Do = **; % diâmetro externo [m]
Di = **; % diâmetro interno [m]
nl = **; % nº de tubos em largura
nh = **; % nº de tubos em altura
lt = **; % largura da zona dos tubos [m]
L = **; % comprimento de cada volta do PBR [m]
Vt = **; % volume total [m3]
elseif size=='l'
Do = **; % diâmetro externo [m]
Di = **; % diâmetro interno [m]
nl = **; % nº de tubos em largura
nh = **; % nº de tubos em altura
lt = **; % largura da zona dos tubos [m]
L = **; % comprimento de cada volta do PBR [m]
Vt = **; % volume total [m3]
elseif size=='m'
Do = **; % diâmetro externo [m]
Di = **; % diâmetro interno [m]
nl = **; % nº de tubos em largura
nh = **; % nº de tubos em altura
lt = **; % largura da zona dos tubos [m]
L = **; % comprimento de cada volta do PBR [m]
Vt = **; % volume total [m3]
elseif size=='s'
Do = **; % diâmetro externo [m]
Di = **; % diâmetro interno [m]
nl = **; % nº de tubos em largura
nh = **; % nº de tubos em altura
lt = **; % largura da zona dos tubos [m]
L = **; % comprimento de cada volta do PBR [m]
Vt = **; % volume total [m3]
elseif size=='xs' % PBRs actuais
Do = **; % diâmetro externo [m]
Di = **; % diâmetro interno [m]
nl = **; % nº de tubos em largura
nh = **; % nº de tubos em altura
lt = **; % largura da zona dos tubos [m]
L = **; % comprimento de cada volta do PBR [m]
Vt = **; % volume total [m3]
elseif size=='x' % PBR actual X
Do = **; % diâmetro externo [m]
Di = **; % diâmetro interno [m]
nl = **; % nº de tubos em largura
nh = **; % nº de tubos em altura
lt = **; % largura da zona dos tubos [m]
L = **; % comprimento de cada volta do PBR [m]
Vt = volume; % volume total [m3]
else
disp('tamanho de PBR não válido')
end
end
end

```

Função auxiliar fitdata.m

```

function [ ] = fitdata( M1,M2,data )
%FITDATA Ajusta dados de temperatura ambiente e radiação solar
% Detailed explanation goes here
%% checking input
if nargin==1
if max(M1(:,2))>60

```

```

        mtemp = M1(:,2);
        M1(:,2) = M1(:,3);
        M1(:,3) = mtemp;
        clear mtemp
    end
    hR = M1(:,1);
    R = M1(:,3);
    hTamb = hR;
    Tamb = M1(:,2);
    data = 'Dados\data_desconhecida';
elseif nargin==2
    if size(M2,1)==1
        if max(M1(:,2))>60
            mtemp = M1(:,2);
            M1(:,2) = M1(:,3);
            M1(:,3) = mtemp;
            clear mtemp
        end
        hR = M1(:,1);
        R = M1(:,3);
        hTamb = hR;
        Tamb = M1(:,2);
        data = strcat('Dados\',M2);
    elseif size(M2,1)>1
        if max(M1(:,2))>60
            mtemp = M1;
            M1 = M2;
            M2 = mtemp;
            clear mtemp
        end
        hR = M2(:,1);
        R = M2(:,2);
        hTamb = M1(:,1);
        Tamb = M1(:,2);
        data = 'Dados\data_desconhecida';
    end
    clear M1 M2
elseif nargin==3
    if max(M1(:,2))>60
        mtemp = M1;
        M1 = M2;
        M2 = mtemp;
        clear mtemp
    end
    hR = M2(:,1);
    R = M2(:,2);
    hTamb = M1(:,1);
    Tamb = M1(:,2);
    data = strcat('Dados\',data);
    clear M1 M2
else
    disp('Erro no input')
    return
end
%% changing time
for i=2:length(hTamb)
    if hTamb(i)<hTamb(i-1)
        hTamb(i:end)=hTamb(i:end)+24;
    end
end
for i=2:length(hR)
    if hR(i)<hR(i-1)
        hR(i:end)=hR(i:end)+24;
    end
end

```

```
    end
end
%% fitting the data
f = fittype('nearestinterp');
[cTamb,gofTamb] = fit(hTamb,Tamb,f);
[cR,gofR] = fit(hR,R,f);
%% saving the data
save(data,'hTamb','Tamb','cTamb','gofTamb','hR','R','cR','gofR')
%% representing fit vs data
t=hTamb(1):1:hTamb(end);
Tambsim = feval(cTamb,t);
Rsim = feval(cR,t);
figure
subplot(2,1,1)
plot(hTamb,Tamb,'o',t,Tambsim,'r')
legend('Tamb','Tambsim')
xlabel('t/h'); ylabel('T/°C');
subplot(2,1,2)
plot(hR,R,'o',t,Rsim)
legend('Rad','Radsim')
xlabel('t/h'); ylabel('GS/(W.m-2)');
end
```

Anexo III – Perfis de Temperatura Simulados

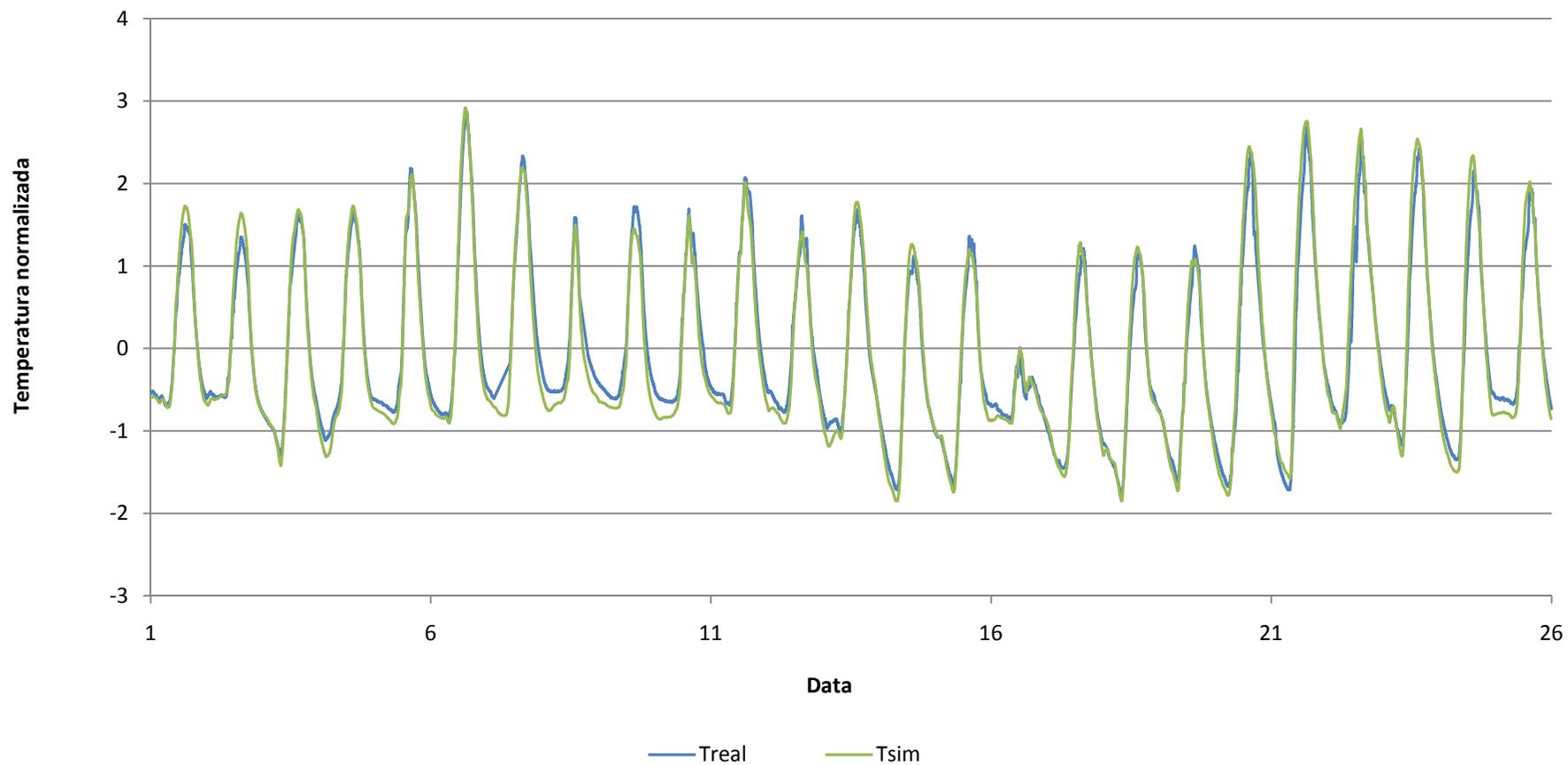


Figura 14 – Comparação de dados reais (Treal) com os resultados das simulações (Tsim), para a temperatura do meio de cultura no período considerado (um mês de Setembro).

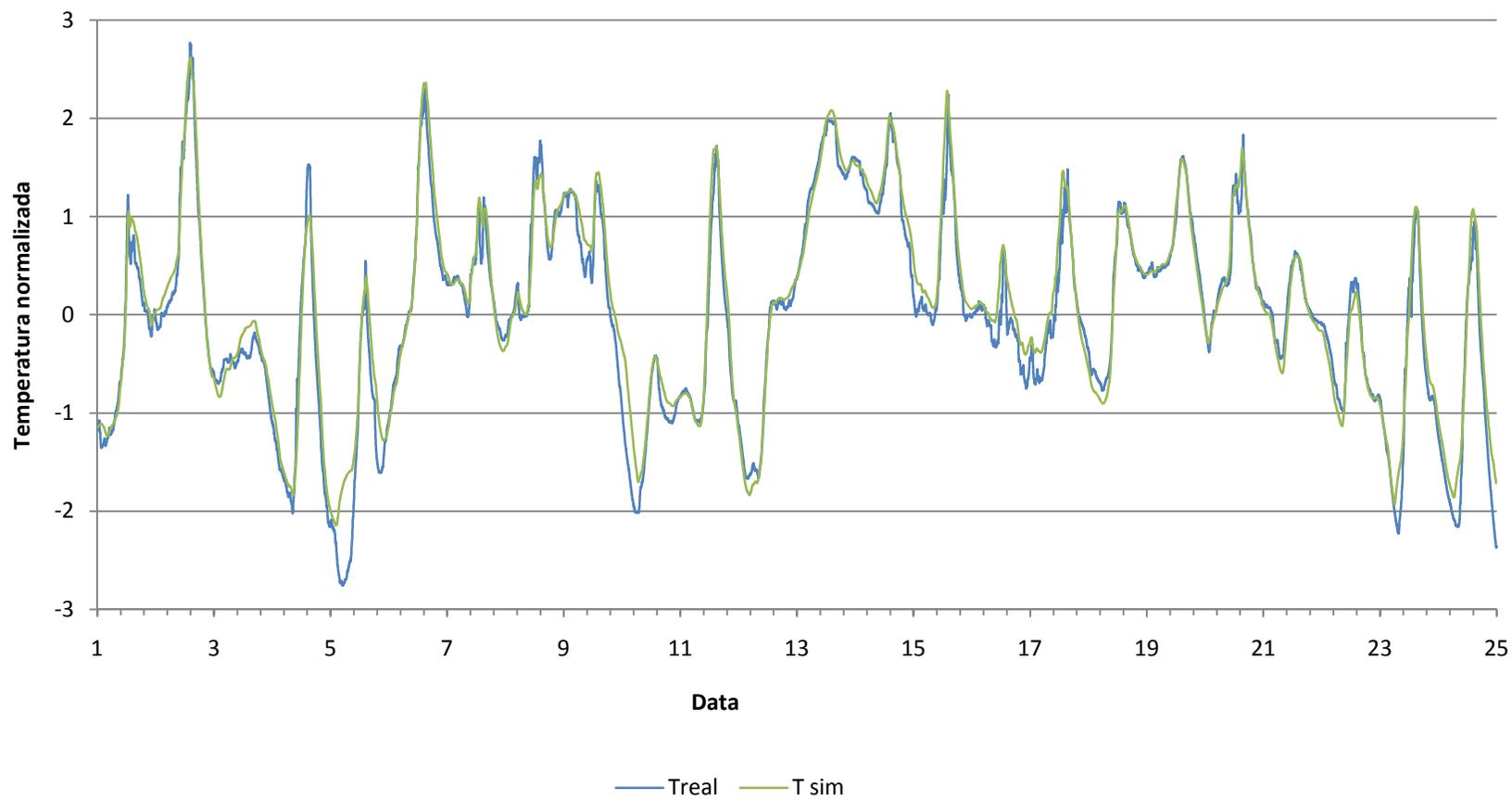


Figura 15 – Temperatura real (Treal) e Simulada (Tsim) do meio de cultura num período de Inverno.

