

ARTIGO REF: 6607

OPTIMIZAÇÃO ESTÁTICA E MODELAÇÃO DINÂMICA DA PRODUÇÃO DE MICROALGAS EM FOTOBIORREACTORES

João Thurler^{1,2}, Diana Fonseca², Edgar T. Santos², Luís Costa², Pedro J. Coelho^{1(*)}

¹IDMEC, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal

²A4F- Algae for Future, Lisboa, Portugal

(*)Email: pedro.coelho@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

As microalgas têm diversas aplicações que justificam a necessidade de incrementar e otimizar a sua produção, de tal forma que este trabalho propõe uma metodologia para tal finalidade. Estudaram-se os parâmetros operacionais que influenciam o crescimento da cultura (turbulência, concentração da cultura, uso de arejamento) e o projecto de fotobiorreactores tubulares e de painéis verticais. Posteriormente, aplicou-se um modelo adaptado da literatura para estimar o crescimento da cultura de *Nannochloropsis oceanica* cultivada em fotobiorreactores à escala piloto. Através da optimização estática, concluiu-se que para fotobiorreactores tubulares, com tubos horizontais, localizados numa latitude de 38°42'49.72"N (Lisboa, Portugal), a distância óptima entre tubos é 1.25 vezes o diâmetro na direcção horizontal e 1.75 vezes o diâmetro na direcção vertical. Para a mesma latitude, no caso de fotobiorreactores de painéis verticais, a redução em 32% da distância entre fotobiorreactores consecutivos permite aumentar em 50% a utilização da radiação solar quando comparada com a configuração proposta no projecto inicial da unidade. O modelo dinâmico, por sua vez, estimou o crescimento da biomassa com erros inferiores a 15% para uma metodologia de cultivo em turbidostato.

INTRODUÇÃO

O consumo total de energia cresceu nos últimos anos em todo o mundo. De acordo com o estudo publicado pela Agência Internacional de Energia (IEA - *International Energy Agency*) em 2015, o consumo de energia final aumentou 25% entre 2003 e 2013, sendo que esse mesmo crescimento foi observado no sector dos transportes. Entretanto, nesse mesmo período a produção de combustíveis derivados do petróleo (gasolina, gasóleo, gás natural, etc.) cresceu somente 13%, um indicativo de que, se tal padrão se mantiver, novas fontes energéticas deverão ser desenvolvidas com o intuito de satisfazer a procura a médio prazo [International Energy Agency, 2015].

Também na década entre 2003 e 2013, a concentração de CO₂ na atmosfera cresceu aproximadamente 30%. Essa variação é presumivelmente responsável pelo aumento da temperatura média da Terra devido à intensificação do efeito de estufa. De facto, a temperatura terrestre média aumentou 0.8°C entre 1880 e 2012, sendo que dois terços desse crescimento se deu a partir de 1975 [IPCC, 2007]. Deste panorama ressalta a necessidade da contabilização dos efeitos ambientais no desenvolvimento de novas tecnologias energéticas para satisfazer a crescente procura [International Energy Agency, 2015].

Este contexto ambiental e económico justifica a utilização de microalgas para a produção de biocombustíveis. A produção de microalgas resulta do processo de fotossíntese, um conjunto

de reacções bioquímicas que requerem uma fonte de carbono (CO₂) e energia luminosa para a produção de matéria orgânica e oxigénio [Tredici, 2010]. O processo é sustentável por ter como *input* recursos abundantes e facilmente obtidos – o dióxido de carbono e a luz solar, apesar de também ocorrer sob fontes artificiais de energia [Sandnes *et al.*, 2005]. A matéria orgânica resultante mantém o metabolismo das células, as quais sob diferentes condições podem ainda produzir lípidos (os quais podem ser retirados do meio intracelular e pós-processados para a obtenção de biocombustíveis) ou outros elementos de valor agregado (como lípidos, proteínas, pigmentos, etc.).

Além disso, no contexto da produção comercial de biocombustíveis, a produção de microalgas não compete com a indústria alimentar. Isso diferencia-a do uso da agricultura tradicional, a qual emprega maioritariamente cana-de-açúcar e milho para a produção do bioetanol. Existe, assim, uma competição entre dois sectores (alimentos e energia) pela mesma matéria-prima, o que é agravado pelo futuro crescimento da procura estimado para ambos [FAO, 2009]. Para além disso, a produção de microalgas permite uma maior produtividade areal (aumento de biomassa por dia e por área produtiva), pode ser realizada em regiões não aráveis por não necessitar de nutrientes no solo e possui uma maior flexibilidade metabólica, o que permite a utilização de melhoramento genético para maximizar a produção.

Contudo, para que a produção industrial de microalgas se torne uma realidade, o lucro associado à venda da biomassa produzida deve ser superior às despesas de capital e operacionais de todo o processo [Carvalho *et al.*, 2011], o que ainda não ocorreu devido ao pouco desenvolvimento tecnológico dos métodos de cultivo e processamento utilizados [Posten, 2009]. Quantitativamente, isso pode ser traduzido pela baixa eficiência na produção de microalgas. De facto, a comparação entre a energia requerida para o cultivo de microalgas em fotobiorreactores e o poder calorífico dos componentes finais produzidos indica uma eficiência máxima de 3% [Legrand, 2016], enquanto a eficiência máxima do processo de fotossíntese realizado pelas células é de 12.4% [Tredici, 2010].

Essa diferença sugere que as variáveis que afectam o processo de fotossíntese estão a limitar o crescimento da cultura de microalgas. Nomeadamente, tais variáveis são a iluminação disponível para as células e a temperatura da cultura, uma vez que outros parâmetros como nutrientes disponíveis no meio, pH e fontes de carbono para as células são mais facilmente controlados nos fotobiorreactores [Weissman *et al.*, 1988]. Factores biológicos, tais como a concentração de oxigénio produzido pela fotossíntese e dissolvido na cultura, e a presença de contaminantes que competem com as microalgas pelo mesmo meio, também devem ser considerados por afectarem directamente o crescimento da cultura [Raso e Van Genugten, 2012].

No presente trabalho são investigados os parâmetros que influenciam o crescimento da cultura de microalgas. A iluminação solar foi analisada com o objectivo de otimizar a sua utilização, tanto a nível do fotobiorreactor individual isolado como no contexto de uma unidade de produção industrial, na qual fotobiorreactores adjacentes fazem sombra uns aos outros e, como consequência, reduzem a iluminação disponível para as células. Essa metodologia foi denominada optimização estática, por idealmente se referir à fase de projecto.

Em seguida, os parâmetros operacionais que influenciam o crescimento da cultura foram analisados numa unidade de produção à escala piloto da A4F - Algae for Future. A microalga estudada foi a *Nannochloropsis oceanica*, cujo crescimento se deu num fotobiorreactor do tipo tubular, em Lisboa, nos meses de verão. A correlação entre esses parâmetros e o aumento da biomassa justifica a nomenclatura de análise dinâmica aqui utilizada, uma vez que, num contexto industrial de produção, os seus valores podem ser ajustados para otimizar o

crescimento em função das condições ambientais que o afectam, tais como a temperatura atmosférica e a radiação solar.

Por último, os dados obtidos do crescimento da *Nannochloropsis oceanica* foram utilizados para adaptar e validar um modelo matemático [Bernard e Rémond, 2012] que descreve a sua taxa de crescimento. Tal modelação permite a estimativa da produção de biomassa (variável dependente) associada aos recursos utilizados (variáveis independentes), de tal forma que a identificação dos custos associados a esses recursos seria o primeiro estágio de uma análise do ciclo de vida de todo o processo produtivo.

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Radiação visível

A energia luminosa é o requisito energético para a realização das reacções de fotossíntese e, conseqüentemente, da produção industrial de microalgas em fotobiorreactores. Neste contexto, cada célula da cultura deve ficar exposta à iluminação durante um tempo suficiente para receber a quantidade necessária de fotões utilizados na fotossíntese [Tredici, 2010].

A cultura de microalgas no interior dos fotobiorreactores é um meio participativo no que diz respeito à radiação visível. À medida que os raios solares se propagam no seu interior, a sua intensidade é reduzida devido à absorção das células (as quais a utilizam na fotossíntese) e à dispersão (*scattering*). Isso significa que há um gradiente de iluminação no interior do fotobiorreactor, de tal modo que as células mais próximas da superfície estão mais expostas à luz [Csgör *et al.*, 2001]. De forma oposta, as mais distantes da superfície têm menos energia disponível para a realização da fotossíntese. Esse fenómeno é denominado auto-sombreamento e significa que, após uma certa profundidade, podem existir zonas no interior do fotobiorreactor que não estão expostas à iluminação, as quais são conhecidas como volumes escuros [Cornet *et al.*, 1992].

A quantidade de energia luminosa disponível no interior da cultura é descrita pela equação da transferência de energia radiativa (RTE - *radiative transfer equation*) [Modest, 2013]:

$$\frac{dI_\lambda}{ds} = -\kappa_\lambda I_\lambda + \kappa_\lambda I_{b\lambda} - \sigma_{s\lambda} I_\lambda + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(\vec{s}_l) \Phi_\lambda(\vec{s}_l, \vec{s}) d\Omega_l \quad (1)$$

Esta equação descreve a variação da intensidade de radiação espectral (I_λ) ao longo de uma dada direcção (\vec{s}). O primeiro e o terceiro termos do lado direito da equação representam a redução da intensidade de radiação devido aos fenómenos de absorção e de dispersão dos fotões para direcções diferentes de \vec{s} (*outscattering*), respectivamente. O segundo e o quarto termos correspondem ao aumento da intensidade de radiação causado pela emissão e pela dispersão dos fotões que se propagam em direcções \vec{s}_l para a direcção \vec{s} considerada (*inscattering*). O coeficiente de absorção espectral (κ_λ) e o coeficiente de dispersão espectral ($\sigma_{s\lambda}$) representam o inverso da distância média percorrida pelos fotões antes de serem absorvidos e dispersos, respectivamente. Por último, $\Phi_\lambda(\vec{s}_l, \vec{s})$ é a função de fase que fisicamente quantifica a probabilidade de um fotão de comprimento de onda λ que se propaga na direcção \vec{s}_l ser disperso para a direcção \vec{s} .

No contexto de produção de microalgas em fotobiorreactores sujeitos à radiação solar como fonte de energia, a solução da equação (1) é geralmente muito complexa para ser utilizada [Pilon *et al.*, 2011]. Primeiro, a intensidade de radiação inicial é dependente de um grande conjunto de parâmetros, tais como o tempo, localização, orientação do fotobiorreactor e

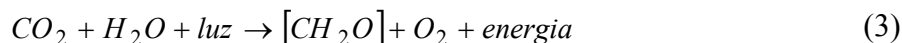
comprimento de onda. Segundo, a cultura de microalgas é dinâmica, o que significa que as suas propriedades ópticas variam com a quantidade de pigmentos no interior das células, a qual, por sua vez, é dependente da radiação disponível, da temperatura, da quantidade de nutrientes e carbono disponíveis, da movimentação da cultura, etc. [Gitelson *et al.*, 2000]. Dessa forma, com o objectivo de simplificar o cálculo da radiação disponível para o crescimento da cultura, é frequentemente utilizada a lei de Lambert-Beer:

$$I(z) = I_0 \exp(-K_a z m_s) \quad (2)$$

Esta equação é uma aproximação que resulta de assumir que a luz é monocromática, a emissão e a dispersão são desprezáveis em relação à absorção e a direcção de propagação dos fótons não varia (índice de refração do meio uniforme). De acordo com esta equação, a intensidade de radiação visível num determinado ponto no interior do fotobiorreactor, a uma distância z da superfície, depende da intensidade da radiação incidente na superfície do fotobiorreactor (I_0), do peso seco (ou concentração de biomassa em g/L) da cultura (m_s) e de uma constante de atenuação que descreve a interacção entre a microalga e a radiação visível (K_a) [Fernández *et al.*, 1997]. Apesar de simplificado face à complexidade da situação real, há evidências que suportam a utilização do modelo descrito para concentrações de biomassa inferiores a 3 g/L [Huesemann *et al.*, 2013].

Fotossíntese

As microalgas são seres unicelulares que utilizam a energia solar para manter o seu metabolismo através do processo da fotossíntese e da respiração celular [Tredici, 2010]. O primeiro utiliza uma fonte de carbono inorgânico (geralmente CO_2), água e energia luminosa para a produção de matéria orgânica ($[\text{CH}_2\text{O}]$), oxigénio e energia, a qual pode ser aproveitada pelas células ou perdida sob a forma de calor:



A respiração celular é o processo inverso, o qual é utilizado pelas células na ausência de uma fonte luminosa e, portanto, utiliza matéria orgânica, dióxido de carbono e água para a produção de energia [Tredici, 2010].

Dois fenómenos inerentes à fisiologia dos organismos fotossintetizantes são relevantes para a proposta de uma metodologia de optimização de produção de microalgas. Primeiro, o processo da fotossíntese tem o seu início nos pigmentos presentes no meio intracelular, os quais são moléculas cujos electrões são excitados em função do comprimento de onda da radiação incidente [Carvalho *et al.*, 2011]. No espectro electromagnético, por exemplo, a banda em que esse fenómeno ocorre é denominada PAR (*photosynthetically active radiation*) e coincide com a banda da luz visível (entre 300 nm e 700 nm), a que corresponde aproximadamente 45% da radiação solar [Tredici, 2010]. Contudo, os pigmentos possuem um limite definido de absorção da radiação. As clorofilas, por exemplo, são o grupo de pigmentos mais comum nos seres fotossintetizantes e são as responsáveis pela coloração verde, por não absorverem radiação nos comprimentos de onda correspondentes a essa cor. De facto, a sua absorção ocorre nas bandas entre 450 e 475 nm (interface vermelho e laranja) e entre 630 e 675 nm (interface azul e violeta) [Carvalho *et al.*, 2011]. Como tanto a quantidade de energia necessária para a fotossíntese quanto o limite de absorção dos pigmentos são fixos, as células são capazes de se fotoadaptar, isto é, produzir a quantidade necessária de pigmentos para absorver a quantidade necessária de radiação em função da intensidade de radiação disponível no meio [Simionato *et al.*, 2011].

Em segundo lugar, a fotossíntese compreende um conjunto de reacções que pode ser dividida entre as fases fotoquímica (clara) e química (escura), em que a primeira depende da luz e a segunda não. Isto significa que a célula não precisa de estar exposta à iluminação durante todo o processo. Para além disso, cada reacção tem uma cinética característica e, como consequência, requer um certo tempo para que ocorra. Logo, as células devem ser expostas à radiação solar durante tempo suficiente para que as reacções da fase fotoquímica ocorram, mas após isso o processo pode ocorrer sem a presença da luz [Molina *et al.*, 2001]. Tal facto sugere que, no contexto da produção de biomassa em fotobiorreactores, o gradiente de iluminação no interior da cultura não precisa limitar o seu crescimento, desde que a turbulência existente garanta que as células fiquem próximas da superfície durante o tempo suficiente para absorver os fotões. Essa movimentação radial das células, a qual as translada entre zonas mais e menos expostas à radiação luminosa, é denominada de ciclos de claro-escuro [Molina *et al.*, 2001].

Crescimento da cultura de microalgas

A Figura 1 representa as fases de vida da cultura de microalgas, a qual é modelada de forma semelhante ao crescimento de uma cultura bacteriana [Becker, 1994]. O seu crescimento é medido através da concentração celular (número de células por unidade de volume), que varia de modo exponencial quando a cultura cresce sem nada a limitá-la.

A fase inicial do crescimento da cultura, indicada por 1 na Figura 1, corresponde à fase de latência (*lag phase*). Nessa fase a cultura está muito diluída, de tal forma que a intensidade luminosa pode ser excessiva para as células e acaba por oxidar componentes intracelulares e reduzir o seu crescimento, fenómeno conhecido como fotoinibição [Tredici, 2010]. De facto, à medida que a concentração celular aumenta e as células se adaptam através da produção de pigmentos, a radiação é atenuada e, portanto, a quantidade de energia radiativa disponível por célula reduz-se. Atinge-se, portanto, uma situação na qual a intensidade luminosa não é suficientemente grande para inibir a cultura, nem suficientemente pequena para limitar o seu crescimento. Nesse estágio, a cultura cresce exponencialmente através da divisão celular, o

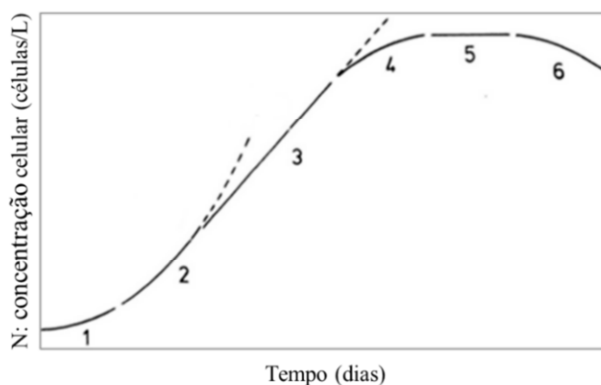


Fig. 1 - Fases de crescimento da cultura, nomeadamente: fase de latência (1), fase exponencial (2-3), fase estacionária (4-5) e morte da cultura (6)

que é representado pelas fases 2 (crescimento acelerado) e 3 (crescimento exponencial) na Figura 1 [Becker, 1994].

Para uma mesma intensidade luminosa, a quantidade de energia disponível por célula é inversamente proporcional à concentração da cultura. Sendo assim, a cultura pode atingir estágios em que a iluminação deixa de ser suficiente para todas as células e, como

consequência, o crescimento da cultura abranda. A sua redução pode inclusivamente atingir níveis nos quais a taxa de crescimento é igual à taxa de morte celular e, portanto, a variação do número de células é nula. Tais situações são indicadas pelas fases 4 (fase de crescimento decrescente) e 5 (fase estacionária) na Figura 1. Quando a taxa de mortalidade ultrapassa a de crescimento, a cultura entra em fase de morte (número 6) [Becker, 1994].

É importante ressaltar que a redução da taxa de crescimento da cultura não é somente função do aumento da sua concentração e consequente redução da intensidade luminosa por célula, mas também pode ter como causa o surgimento de outros microrganismos que competem com as microalgas pelo mesmo meio, a redução da quantidade de nutrientes disponíveis para todas as células, a acumulação de oxigénio resultante da fotossíntese no meio intercelular, etc. [Carvalho *et al.*, 2006].

Fotobiorreactores

A produção industrial de microalgas dá-se em fotobiorreactores, que consistem em reactores de diferentes configurações nos quais a cultura de microalgas circula enquanto é exposta à luz (natural ou artificial). Os fotobiorreactores podem classificar-se em abertos (e.g., lagoa – *raceways*) e fechados (e.g., painéis - *green walls*, tubulares, colunas, etc.) [Wolf *et al.*, 2016]. Em todos há uma tentativa de se controlar os parâmetros que afectam o crescimento da cultura, apesar das suas respectivas características apresentarem limitações para tal.

Normalmente, os fotobiorreactores fechados são mais complexos e caros, ao mesmo tempo que permitem um maior controlo das condições em que as microalgas são cultivadas, em especial um maior controlo da presença de contaminantes. Em contraste, os fotobiorreactores abertos mantêm a cultura em contacto directo com a atmosfera, o que não impede a proliferação de contaminantes no seu interior. Esse facto, por exemplo, limita a escolha da microalga a ser produzida, pois ela deve ser suficientemente resistente para competir com outros micro-organismos pelos recursos no meio de cultivo [Carvalho *et al.*, 2006].

Os fotobiorreactores abertos, contudo, têm as vantagens de serem mais baratos e de realizarem as trocas gasosas com a atmosfera, para além de possuírem uma incipiente regulação de temperatura através da evaporação. De facto, os reactores fechados necessitam de sistemas de desgaseificação para garantir que o oxigénio produzido na fotossíntese não se acumula no meio, podendo atingir níveis nocivos à cultura, bem como de sistemas de termorregulação para manter as microalgas na gama óptima de temperatura de crescimento [Carvalho *et al.*, 2006].

Ambos os tipos de fotobiorreactores devem maximizar a incidência luminosa na cultura, pois é comumente esse o parâmetro limitativo do seu crescimento, e também de mais difícil controlo quando comparado com os demais. Para além disso, sistemas de aquecimento e arrefecimento, de injeção de CO₂ (tanto para controlo de pH quanto para disponibilização de uma fonte de carbono para a fotossíntese) e de adição de nutrientes são utilizados para garantir condições não limitativas para o crescimento das células.

Nannochloropsis oceanica

A microalga utilizada no presente estudo foi a espécie *Nannochloropsis oceanica*, uma espécie de microalga verde, eucarionte e presente em *habitats* de água salgada [Suda, 2002]. Usualmente, essa espécie é utilizada como fonte de alimento na indústria de aquacultura, devido à sua elevada concentração de ácidos gordos poli-insaturados, em especial o ácido eicosapentaenóico [Sandnes *et al.*, 2005]. Este é um dos ácidos gordos classificados como

ómega-3, com grande importância na saúde humana pela sua acção no combate às doenças cardíacas associadas à elevada concentração de triglicéridos no sangue, ao aumento da pressão sanguínea e ao risco de inflamações [Swanson *et al.*, 2012]. Para além disso, os lípidos presentes no interior das células podem ser extraídos e processados para a produção de biodiesel.

Modelação da taxa de crescimento

Inúmeros estudos têm tentado modelar a taxa de crescimento da cultura de microalgas, com o objectivo de identificar os parâmetros que a afectam e a optimizam [Béchet *et al.*, 2013]. Em função das condições de operação em que os ensaios experimentais são conduzidos, os modelos apresentam um número limitado de variáveis independentes, correspondente ao mínimo necessário para estimar a taxa de crescimento de forma rápida e simples, sem comprometer a precisão do resultado final.

Costuma-se assumir que a iluminação e a temperatura são os únicos parâmetros limitativos do crescimento da cultura, já que os restantes são mais facilmente controlados no contexto da produção de microalgas em fotobiorreactores [Weissman *et al.*, 1988]. Esses dois parâmetros são abordados de forma diferente, apesar de serem acoplados na situação real de produção [Béchet *et al.*, 2013]. Contudo, tal abordagem possui uma complexidade matemática inerente, a qual não justifica o seu emprego na presente metodologia. Sendo assim, a energia luminosa disponível para a cultura pode ser considerada como a incidente na superfície do fotobiorreactor, a disponível para cada volume de controlo no interior da cultura (em função da atenuação sofrida quando a luz atravessa a cultura) ou como a disponível para cada célula, o que inclui não só a atenuação da radiação, mas também a turbulência do escoamento, considerando a movimentação celular para estimar os ciclos de claro-escuro [Béchet *et al.*, 2013].

METODOLOGIA

A metodologia utilizada para a optimização do cultivo de microalgas à escala piloto e industrial foi dividida em duas abordagens complementares. A primeira abordagem proposta pelo trabalho, denominada optimização estática, baseou-se em geometrias de fotobiorreactores comumente utilizadas na indústria (tubulares e painéis verticais) para estimar a quantidade de radiação incidente na sua superfície e perdida no solo, em função das características desses sistemas. No caso de fotobiorreactores tubulares, a energia luminosa perdida resulta da passagem de luz entre tubos vizinhos e incidente no solo, enquanto nos fotobiorreactores de painéis verticais (GW - *green walls*) a energia perdida corresponde à incidente no solo compreendido entre dois fotobiorreactores adjacentes.

A segunda abordagem proposta é fundamentada numa futura optimização dinâmica, a qual identificaria os valores óptimos dos parâmetros operacionais em função da sua influência no crescimento da cultura e no custo energético associado. Idealmente, o crescimento da cultura seria descrito por um conjunto de equações matemáticas com parâmetros sujeitos a restrições, cuja optimização resultaria em valores óptimos de factores tais como a velocidade de escoamento da cultura, o caudal de arejamento, o tempo de cultivo, etc. Porém, no contexto deste trabalho, a metodologia limita-se a identificar a influência de alguns parâmetros operacionais no crescimento da cultura e a adaptar à escala piloto um modelo já proposto na literatura para a *Nannochloropsis oceanica* produzida à escala piloto, sob iluminação constante [Bernard e Rémond, 2012].

Radiação solar incidente num fotobiorreactor

O *software* Ecotect foi utilizado com o objectivo de se calcular a quantidade de radiação solar incidente na superfície dos fotobiorreactores considerados. Desenvolvido pela Autodesk para a simulação do conforto ambiental de edifícios, o *software* permite a integração de uma geometria específica pré-definida com uma dada localização geográfica, de tal forma que emprega métodos computacionais para o cálculo da radiação directa em função da posição solar, bem como dados meteorológicos para a estimativa da parcela difusa.

O Ecotect foi, inicialmente, utilizado para o cálculo da radiação solar incidente na superfície dos fotobiorreactores de geometria tubular e da radiação perdida em função da distância entre tubos paralelos vizinhos (tanto na vertical como na horizontal), orientados na direcção Este-Oeste e localizados em Lisboa. A Figura 2 representa a geometria utilizada na simulação. Optou-se por calcular a radiação incidente no troço central do fotobiorreactor tubular para considerar de forma completa o sombreamento feito entre as colunas de tubos. Em cada instante, a intensidade de radiação solar incidente nos tubos varia ao longo da sua superfície e também de tubo para tubo, devido ao efeito de sombra que os tubos provocam entre si. A energia total recebida pelos tubos, por unidade de comprimento, num intervalo de tempo t , é dada pela seguinte equação:

$$E'_{inc} = \sum_{n=1}^{n_t} \int_0^t \int_0^{2\pi} q''_{inc}(\theta, t, n) \frac{D}{2} d\theta dt \quad (4)$$

em que D é o diâmetro exterior dos tubos, n_t o número total de tubos e q''_{inc} o fluxo radiativo na superfície dos tubos que, para um dado ponto na superfície de um tubo, é igual à intensidade de radiação solar projectada na direcção normal à superfície nesse ponto. Assim, q''_{inc} é integrado ao longo da superfície de cada tubo do fotobiorreactor e ao longo do tempo. O intervalo de tempo considerado foi um ano, de modo a ter em conta a variação da intensidade de radiação solar ao longo do ano.

De forma análoga, calculou-se a radiação solar que atravessa os tubos do fotobiorreactor sem incidir em nenhum deles e que, portanto, atinge o solo. Essa energia perdida é função da distância entre os tubos. A energia perdida por unidade de área e de tempo, representada por $q''_{perdida}$, é quantificada através da radiação solar incidente no plano atrás do fotobiorreactor tubular, tal como indicado na Figura 2. A energia total perdida, por unidade de comprimento, num intervalo de tempo t , é dada pela seguinte equação:

$$E'_{perdida} = \iint_{A_{plano}} q''_{perdida}(A, t, n) dA dt \quad (5)$$

Esta energia não é aproveitada pela cultura de microalgas que circula no fotobiorreactor, pelo que é desejável determinar o valor do espaçamento entre os tubos que a minimiza.

Para maximizar a energia total recebida pelos tubos durante um ano e minimizar a perda no solo, as distâncias horizontais (D_h) e verticais (D_v) entre os eixos de tubos adjacentes foram variadas de forma sistemática, conforme discutido na secção seguinte.

No caso de fotobiorreactores de painéis verticais, esquematizados na Figura 3, a energia solar perdida no solo é devida à distância entre dois fotobiorreactores adjacentes. Mais uma vez, a quantidade de energia incidente na superfície dos fotobiorreactores deve ser maximizada. Na

situação ideal, de máxima eficiência, a área da sombra do fotobiorreactor a montante coincide com a área do solo entre os dois painéis, de tal modo que não há energia solar incidente na região entre os dois fotobiorreactores adjacentes, nem sombra provocada pelo primeiro no segundo. De facto, nessa situação, toda a energia solar incidente na unidade de produção seria utilizada pela cultura de microalgas. É por esse motivo que a radiação solar perdida é denominada disponível, pois ela não é utilizada pelas células no processo de fotossíntese, mas está disponível na unidade de produção.

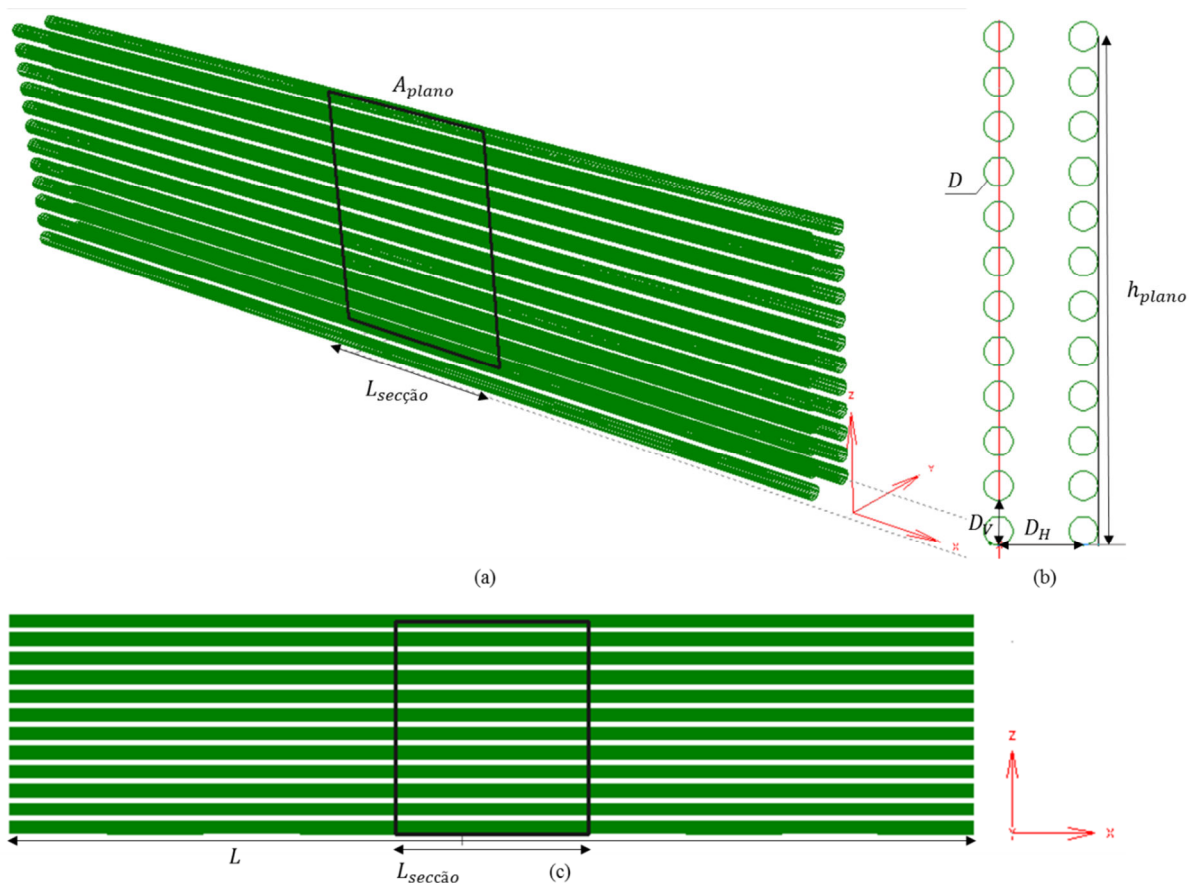


Fig. 2 - Geometria tubular simulada no Ecotect

Contudo, a situação em que a sombra do fotobiorreactor coincide com a área do solo entre dois painéis adjacentes não corresponde à realidade, pois a área da sombra varia ao longo do dia e do ano, enquanto a distância entre os dois fotobiorreactores (D_{GW}) é uma constante de projecto.

A energia total recebida pelos fotobiorreactores, num intervalo de tempo t , é dada pela seguinte equação:

$$E_{inc} = \sum_{n=1}^{n_f} \int_0^t \int_{A_f} q''_{inc}(t, n) dA_f dt \quad (6)$$

em que A_f é a área da superfície dos n_f fotobiorreactores. O intervalo de tempo considerado na equação 6 é, novamente, de um ano.

A distância óptima entre fotobiorreactores é a distância que maximiza a energia total por eles recebida durante um ano e minimiza a incidente no solo, por unidade de área de implantação. Esta área é definida pelo produto entre a largura dos painéis e a distância entre eles. De modo a determinar o valor óptimo, as sombras dos fotobiorreactores foram calculadas em função da geometria dos painéis e da posição do Sol ao longo de todo o ano, tendo em conta a radiação solar em Lisboa durante esse período de tempo. Em cada instante, a energia incidente no fotobiorreactor (E_{GW}) é igual ao produto da componente horizontal da intensidade de radiação solar pela área frontal dos painéis ou, de modo equivalente, pelo produto da componente vertical da intensidade de radiação solar pela área da sombra. Por sua vez, a energia disponível (E_{disp}), mas não aproveitada, é igual ao produto da referida componente vertical pela área iluminada entre dois fotobiorreactores (área de implantação menos a área de sombra).

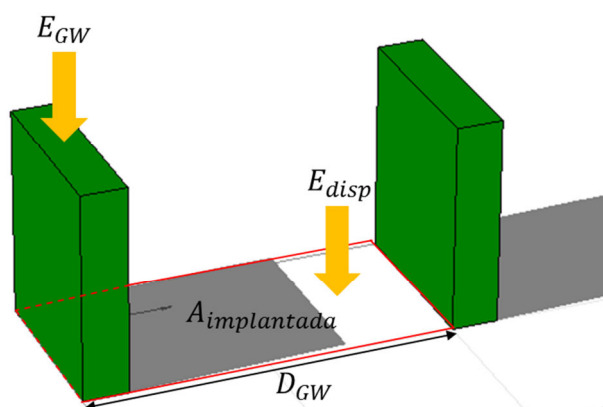


Fig. 3 - Otimização estática aplicada a uma unidade de produção de fotobiorreactores do tipo painéis verticais

Métodos de laboratório e cultivo à escala piloto

A microalga *Nannochloropsis oceanica* foi cultivada à escala piloto num fotobiorreactor tubular com orientação Este-Oeste (i.e., a direcção axial dos tubos era paralela ao eixo Este-Oeste), dentro de uma estufa em Lisboa na empresa A4F. O fotobiorreactor é constituído por duas colunas de tubos horizontais e transparentes à radiação PAR, nos quais se escoia a cultura de microalgas, e de configuração análoga à representada na Figura 2. Durante o período de cultivo, foram adicionados nutrientes, controlado o pH através da injeção de CO_2 no meio e arrefecido o fotobiorreactor, para evitar que tais parâmetros limitassem o crescimento das microalgas.

O cultivo iniciou-se no dia 23 de Julho de 2016 e terminou no dia 15 de Setembro do mesmo ano. Ao longo deste período, foram utilizadas três frequências de rotação da bomba para impor diferentes velocidades de escoamento e intensidades de turbulência à cultura. Além disso, foram feitas sete colheitas ao longo do ensaio, nas quais a cultura foi processada por microfiltração. Os produtos resultantes deste processo são um líquido concentrado em microalgas (retentado) e o meio de cultivo filtrado (permeado). Este meio de cultivo, rico em nutrientes, é depois reciclado ao fotobiorreactor, resultando na redução do consumo global de água e nutrientes. Consequentemente, elementos presentes no meio e que não foram retirados no processo, tais como componentes químicos dissolvidos, restos celulares e pequenos contaminantes, podem retornar à cultura, caso a filtração não seja 100% eficiente. Assume-se, assim, que a médio prazo os processos de recirculação podem reduzir o crescimento da cultura.

O estado da cultura foi acompanhado diariamente com medidas de peso seco (gramas de biomassa por litro de cultura) e com observações microscópicas. Estas observações foram realizadas com o objectivo de garantir que a cultura não atingia a fase estacionária de crescimento e que os contaminantes na cultura, se existentes, não estavam a limitar o seu crescimento.

As medições diárias de peso seco foram utilizadas para calcular a produtividade volumétrica da cultura, o que corresponde ao aumento de biomassa por unidade de volume e por unidade de tempo, determinado do seguinte modo:

$$P_{vol} = \frac{m_{s,i+1} - m_{s,i}}{t_{i+1} - t_i} \quad (7)$$

em que os índices i e $i+1$ representam dois instantes consecutivos em que foi medido o peso seco. A produtividade volumétrica foi utilizada para caracterizar o crescimento da cultura sob diferentes regimes de cultivo, nomeadamente sob diferentes velocidades de escoamento, influência do arejamento no interior do fotobiorreactor e após sucessivas renovações. A irradiação solar de cada dia de cultivo foi também medida, de modo a correlacioná-la com a concentração da cultura e determinar a energia disponível por célula.

O valor médio da intensidade de radiação no interior do fotobiorreactor foi calculado com base na lei de Lambert-Beer, aplicada à geometria circular da secção transversal dos tubos:

$$I_{média} = \frac{1}{D} \int_0^D I(z) dz = \frac{1}{D} \int_0^D I_o \exp(-K_a z m_s) dz = \frac{I_o}{K_a D m_s} \times (1 - \exp(-K_a D m_s)) \quad (8)$$

em que I_o é a intensidade de radiação incidente e medida na superfície do fotobiorreactor. A constante de atenuação da cultura foi obtida experimentalmente através do declive da recta que relaciona o logaritmo da razão entre as intensidades de radiação, I/I_o , para todos os comprimentos de onda do espectro visível e o peso seco, tal como definido pela lei de Lambert-Beer [Thurler, 2016].

Modelação da taxa de crescimento da cultura

O modelo utilizado para o cálculo da taxa de crescimento em biomassa da cultura de *Nannochloropsis oceanica* foi uma adaptação de uma versão mais simples proposta na literatura, a qual foi desenvolvida à escala piloto sob iluminação constante [Bernard e Rémond, 2012]. Assim, as condições de cultivo da microalga eram estritamente controladas se comparadas com as condições de cultivo utilizadas no presente trabalho. Nomeadamente, o fotobiorreactor à escala piloto e sob irradiação solar apresenta um fotoperíodo descontínuo, ou seja, durante o dia há luz solar para a realização da fotossíntese, enquanto à noite as células das microalgas recorrem a respiração celular para a realização das suas actividades metabólicas, o que tem como consequência um consumo de biomassa produzida no período de luz [Edmundson e Huesemann, 2015].

O modelo tem dois dados de entrada: a temperatura e a energia radiativa, os quais são assumidos como desacoplados para simplificação dos cálculos [Béchet *et al.*, 2013]. A temperatura da cultura de microalgas foi medida continuamente e foi utilizado um permutador de calor para impedir que o seu valor ultrapassasse 30°C. A radiação, por sua vez, foi medida por um luxímetro instalado no tubo superior mais a sul (i.e., o tubo mais exposto à radiação solar em Lisboa). Entretanto, devido à orientação Este-Oeste do fotobiorreactor, o valor máximo da irradiação incidente no referido sensor não corresponde ao máximo incidente em todo o sistema, mas sim à radiação incidente somente naquela posição. De facto, a radiação na

superfície apresenta uma distribuição angular e tal variação foi obtida da simulação no Ecotect. Sendo assim, o valor da simulação correspondente à posição do luxímetro foi corrigido com o valor experimental, e conseqüentemente, todos os demais valores também o foram em conformidade.

No cálculo do valor da energia solar média disponível para a cultura crescer, optou-se por incluir as horas em que não havia iluminação no valor da radiação incidente na superfície do fotobiorreactor (parâmetro I_0). Isso significa que a irradiação média diária considera 24h e não somente as horas de luz. Esta abordagem é a mais simples para se considerar o complexo fenómeno de perda de biomassa durante a noite [Edmundson e Huesemann, 2015]. Além disso, o modelo adaptado utilizou a quantidade de radiação disponível por célula, tal como indicado na Equação 8. Para as outras constantes do modelo, específicas para a espécie de microalga cultivada, foram usados os valores propostos na literatura [Bernard e Rémond, 2012].

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Optimização estática

A Tabela 1 indica a eficiência do fotobiorreactor tubular, com duas colunas de tubos horizontais, em função das distâncias entre os centros de tubos adjacentes, nas direcções horizontal e vertical, normalizadas pelo diâmetro exterior dos tubos. A eficiência é relativa à utilização da radiação pelas microalgas e é definida como o quociente entre a energia radiativa incidente nos tubos ao longo de um ano e a soma dessa energia radiativa com aquela que atravessa o fotobiorreactor através do espaço entre tubos, sem ser intersectada por estes, durante o mesmo período de tempo.

Os resultados obtidos mostram que a geometria mais eficiente, de acordo com o método utilizado, é aquela cujas distâncias entre eixos de tubos adjacentes, nas direcções horizontal e vertical, são iguais a $2.5 D$ e D , respectivamente. Contudo, a complexidade construtiva dessa configuração é elevada, pelo que a primeira linha e a primeira coluna de resultados da Tabela 1 não foram consideradas. Logo, a geometria óptima para a utilização da energia solar em Lisboa é aquela em que os tubos do fotobiorreactor satisfazem as relações: $D_h/D=1.75$ e $D_v/D=1.25$.

É importante ressaltar que a geometria óptima foi obtida de acordo com os critérios definidos pela metodologia adoptada, mas não corresponde necessariamente à melhor produtividade de microalgas à escala industrial. Isto porque fotobiorreactores tubulares com geometrias compactas, embora utilizem a radiação de forma mais eficiente, possuem um maior sombreamento entre tubos. Essa abordagem, contudo, não foi considerada neste trabalho.

No caso de fotobiorreactores de painéis verticais, considerou-se uma unidade de produção industrial com fotobiorreactores distanciados de 1 m ($D_{GW} = 1$ m, conforme indicado na Figura 3). A Tabela 2 mostra os resultados obtidos através da variação de D_{GW} e conseqüente variação do sombreamento feito entre dois painéis verticais. Verifica-se que, para a distância óptima, houve uma redução tanto da energia solar directa incidente na superfície dos fotobiorreactores como da área de implantação, ou seja, da distância entre os painéis. De facto, a configuração optimizada é mais compacta em relação à original e, portanto, a sombra causada por um painel no outro é maior. Contudo, e de acordo com a metodologia adoptada, a configuração óptima é aquela cujo *layout* maximiza a quantidade de energia solar directa recebida por unidade de área de implantação da unidade de produção. A Tabela 2 revela que, efectivamente, a radiação solar aproveitada aumenta aproximadamente 50% na configuração optimizada.

Mais uma vez, a optimização estática pode não resultar na melhor configuração para a produção de microalgas. Para uma unidade industrial, não só é relevante a análise da quantidade de energia necessária para a realização da fotossíntese e conseqüente crescimento da cultura, mas também o investimento em bens de capital para a construção da unidade. No caso optimizado, por exemplo, seria necessária uma maior quantidade de material para a mesma área de produção, o que requer um maior investimento inicial. Num contexto em que se torna necessário reduzir os custos de produção para tornar a indústria de biomassa de microalgas uma realidade, uma análise do ciclo de vida seria o próximo passo para definir o melhor cenário.

Tabela 1 - Eficiência dos fotobiorreatores tubulares analisados na utilização da radiação solar

D_v/D \ D_t/D	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25	2.50
1.00	0.9445	0.9553	0.9478	0.9314	0.8961	0.8669	0.8435
1.25	0.9648	0.9599	0.9511	0.9393	0.9126	0.8867	0.8637
1.50	0.9654	0.9609	0.9523	0.9397	0.9148	0.8895	0.8672
1.75	0.9656	0.9616	0.9497	0.9362	0.9110	0.8879	0.8663
2.00	0.9666	0.9615	0.9464	0.9315	0.9060	0.8839	0.8653
2.25	0.9670	0.9597	0.9412	0.9253	0.8984	0.8769	0.8621
2.50	0.9675	0.9595	0.9374	0.9198	0.8923	0.8694	0.8573

Tabela 2 - Resultado da optimização estática proposta para fotobiorreatores de painéis verticais

		$D_{GW} = 1m$	Optimizada
Energia solar directa incidente (kWh/ano)	Fotobiorreactor	725	597
	Área entre fotobiorreactores	266	82
Radiação solar aproveitada (kWh/m ² /ano)		368	555

Análise dinâmica

A Figura 4 ilustra o resultado do acompanhamento do crescimento da cultura (em produtividade volumétrica) ao longo do ensaio. As colunas a azul indicam o crescimento calculado para os períodos de cultivo abaixo especificados. Esses períodos são, no máximo, de uma semana, sendo a duração determinada por uma renovação da cultura ou pela mudança da frequência de rotação da bomba. Os dias em que tais procedimentos ocorreram não foram considerados no cálculo a fim de garantir que a cultura tem tempo suficiente para se adaptar às novas condições, tendo sido considerados os valores de peso seco nos dias imediatamente anterior e posterior. Para cada período, identificado no eixo horizontal pelas frequências relativas de rotação da bomba (e, para um deles, pela presença de arejamento no interior do

fotobiorreactor), também se calculou o valor médio da intensidade de radiação no interior do fotobiorreactor, de acordo com a Equação 8.

O ensaio iniciou-se em 23 de Junho de 2016 e foi mantido sob as mesmas condições operacionais até ao dia 5 de Julho. O fotobiorreactor não foi renovado e a movimentação da cultura foi efectuada com uma frequência de rotação da bomba mediana. Em média, a cultura cresceu aproximadamente 0.11 g/L por dia, até ao dia 28 de Junho, e recebeu 6.22 MJ PAR/m por dia na superfície do fotobiorreactor. Aplicando a Equação 8 com o valor médio do peso seco da cultura no período referido, obtém-se uma energia radiativa média atenuada e disponível para a cultura no interior do fotobiorreactor de 0.27 MJ PAR/m por dia. Após o dia 28 de Junho, os valores médios diários até ao dia 5 de Julho foram 0.15 g/L e 0,14 MJ PAR/m. Esta variação relativamente ao período anterior, sob as mesmas condições de operação, evidencia o comportamento da cultura, de acordo com a Figura 1. No início do cultivo (fase de latência) a quantidade de energia luminosa por célula era muito grande, provocando a fotoinibição. Isso significa que, possivelmente, a quantidade de células e de pigmentos no meio intracelular não era ainda adequada à radiação presente no interior do fotobiorreactor. À medida que a cultura se concentrou e se adaptou à radiação solar, a produtividade volumétrica foi superior, mesmo com uma menor quantidade de energia disponível por célula, o que corresponde ao segundo período da Figura 4, no qual o cultivo se deu sob a mesma frequência de rotação da bomba (e, conseqüentemente, sob a mesma velocidade de escoamento no interior dos tubos). Este resultado indica que, nesse período, as microalgas se encontravam na fase de crescimento exponencial, conforme indicado na Figura 1.

Se as condições de funcionamento fossem mantidas, esperar-se-ia que a cultura de microalgas atingisse o regime estacionário. Contudo, para impedir que isso ocorresse, o aumento da concentração de microalgas (e conseqüente redução da quantidade de energia disponível por célula) foi acompanhado do aumento da frequência de rotação da bomba. Dessa forma, no dia 6 de Julho, quando o peso seco da cultura era de 2.19 g/L, aumentou-se a frequência de rotação da bomba para o valor máximo. A velocidade do escoamento aumentou e, portanto, a turbulência no interior dos tubos também. É expectável que a maior turbulência confira às células uma maior movimentação no sentido radial da geometria cilíndrica dos tubos, evitando a limitação do crescimento devido à redução da quantidade de energia por célula [Molina *et al.*, 2001], desde que essa movimentação não seja prejudicial à estrutura celular. De facto, a terceira coluna da Figura 4 comprova que a maior turbulência garantiu a mesma produtividade volumétrica, mesmo com menor energia radiativa disponível.

A frequência de rotação da bomba foi mantida no valor máximo até ao dia 11 de Julho, tendo então sido novamente reduzida para o valor inicialmente utilizado. Neste período de operação não foi medida a irradiação solar, pelo que os resultados não foram incluídos na análise. Esta condição de funcionamento manteve-se até 21 de Julho, data em que a frequência de rotação da bomba foi reduzida para o seu valor mínimo. Entretanto, foram realizadas duas renovações com recirculação do meio, mas a análise limitou-se ao aspecto qualitativo do procedimento (i.e., não foram comparados de forma quantitativa os volumes renovados, recirculados e as suas possíveis influências na produtividade).

Dessa forma, a cultura cresceu até ao dia 4 de Agosto. Ao longo desse período foi observada uma acumulação de bolhas no interior dos tubos do fotobiorreactor, pois o tempo de residência das microalgas na zona fotossintética (i.e., zona do fotobiorreactor em que a cultura era exposta à radiação solar) era muito elevado. Nesta fase a velocidade do escoamento era

baixa e, nessas condições, o tempo de residência da cultura na zona fotossintética era o maior de todo o ensaio. Verificou-se, ainda, que a concentração de bolhas aumentava de montante para jusante e esta constatação foi uma prova de que as referidas bolhas eram de oxigénio produzido no processo de fotossíntese.

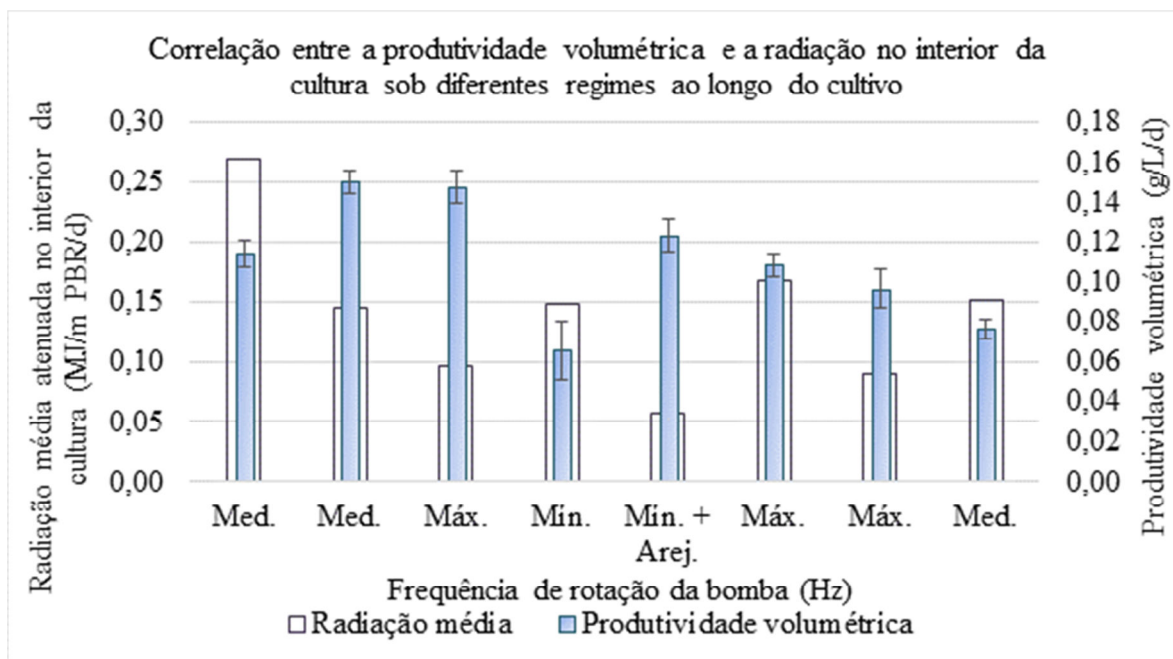


Fig. 4 - Análise dos parâmetros operacionais do cultivo de *N. oceanica* em um fotobiorreactor tubular em Lisboa

A concentração elevada de oxigénio é prejudicial ao crescimento da cultura, devido aos fenómenos de foto-oxidação dos componentes celulares e foto-respiração, a qual é realizada em detrimento da fotossíntese, para manter o metabolismo celular [Carvalho *et al.*, 2011]. Assim, no dia 1 de Agosto, ligou-se o arejamento no interior do tanque do fotobiorreactor para arrastar o oxigénio dissolvido no meio. Portanto, para a menor frequência de rotação da bomba empregada, há dois valores de produtividade volumétrica e de energia radiativa média atenuada nos tubos, os quais confirmam o efeito do arejamento no crescimento da cultura. De acordo com a Figura 4, a redução da energia radiativa disponível associada à introdução do arejamento, quando comparada com a situação sem arejamento e sob mesma velocidade de escoamento, não foi acompanhada da redução da produtividade volumétrica. Mais do que isso, o crescimento da cultura para a menor frequência com o arejamento ligado não foi muito inferior ao observado anteriormente para frequências mediana e máxima (com excepção da situação em que as microalgas estavam na fase de latência), o que sugere que a influência negativa do oxigénio dissolvido também pode estar presente com maiores velocidades de escoamento e menores tempos de residência.

Entre os dias 4 e 25 de Agosto não houve acompanhamento diário do crescimento da cultura. Contudo, realizaram-se quatro operações de renovação com recirculação do meio e, portanto, a análise iniciada no dia 25 de Agosto com a frequência de rotação da bomba máxima foi posterior a seis recirculações. Para evidenciar a sua influência na produtividade volumétrica,

as condições de operação com frequências de rotação mediana e máxima foram repetidas, tal como indicado nas últimas três colunas da Figura 4. De facto, as produtividades volumétricas foram inferiores (se comparadas com as respectivas condições de funcionamento no começo do ensaio), mesmo com maior quantidade de energia radiativa disponível, de acordo com a Equação 8. Além disso, tanto a redução da radiação disponível, para a mesma frequência de rotação da bomba, como a redução da velocidade do escoamento foram acompanhadas da redução da produtividade volumétrica.

Modelação do crescimento

A Figura 5 representa o crescimento da cultura de *Nannochloropsis oceanica* entre os dias 23 de Agosto e 15 de Setembro de 2016, o qual foi calculado através do modelo proposto em [Bernard e Rémond, 2012], adaptado com a radiação disponível por célula, a distribuição da radiação solar ao longo do fotobiorreactor tubular e a utilização do valor médio em 24h para calcular a perda de biomassa à noite. Os valores de peso seco e da radiação incidente são experimentais, tal como descrito na secção 3. Já o peso seco calculado, representada pela linha a verde claro na Figura 5, foi obtida através da Equação 9, a qual considera a taxa de crescimento diária calculada (μ) e o peso seco do dia anterior.

$$m_{s,i+1} = m_{s,i} \exp(\mu \Delta t) \quad (9)$$

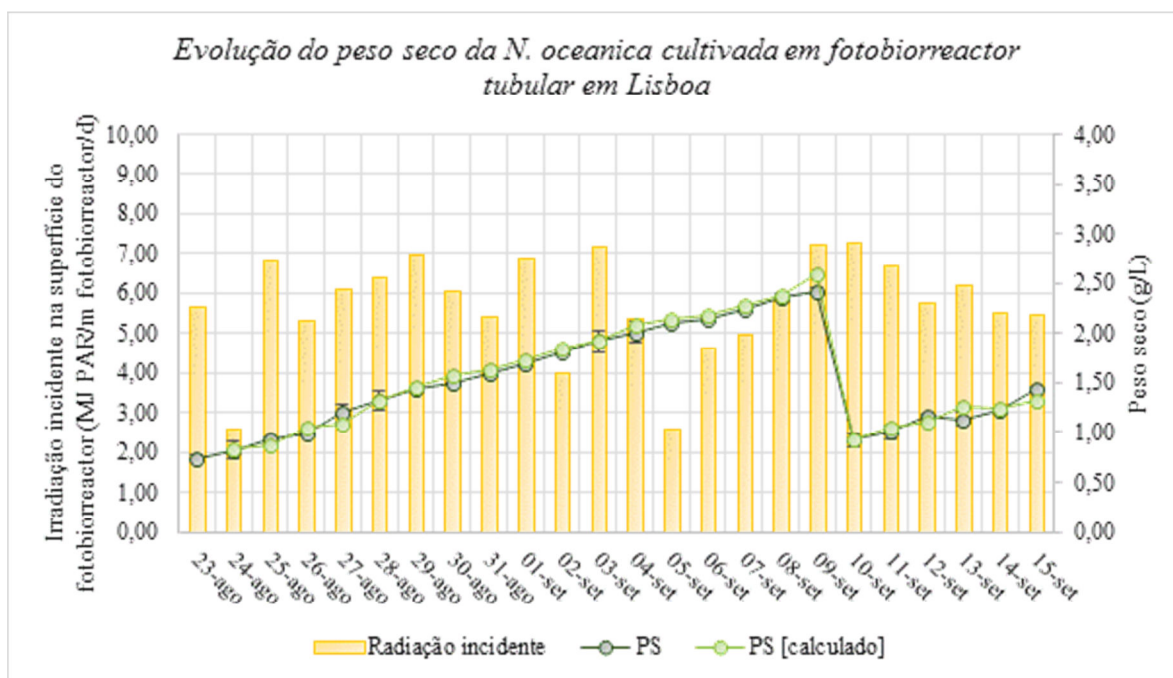


Fig. 5 - Crescimento calculado da cultura de N. oceanica

Ao longo de todo o ensaio, o maior erro obtido foi 15% (no dia 25 de Junho). Dos 52 dias analisados, os erros foram inferiores a 10% em 49 dias e inferiores a 5% em 37 dias. Estes resultados indicam que, apesar de factores importantes no crescimento da cultura não terem sido considerados na modelação matemática (ver secção 4.2), a adaptação de um modelo

presente na literatura às condições de cultivo conduziu a previsões do crescimento da *Nannochloropsis oceânica* com razoável precisão.

É importante mencionar que o modelo empregado utilizou o peso seco do dia anterior para prever valor do dia seguinte, pelo que o seu alcance e utilidade são limitados para prever o crescimento da cultura a médio e longo prazo.

Entretanto, para condições de cultivo em turbidostado, em que a cultura é colhida diariamente com o objectivo de mantê-la numa concentração celular constante, o modelo utilizado é suficiente para prever o crescimento e, portanto, planear com antecedência o volume a ser processado. Espera-se, entretanto, que trabalhos futuros introduzam no modelo mais parâmetros que influenciam o crescimento da cultura, permitindo previsões fidedignas a curto ou médio prazo.

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objectivo aproximar a actual metodologia de produção de microalgas à realidade de produção à escala industrial. Para tal, foram propostas metodologias de projecto de fotobiorreactores tubulares e unidades de produção mais eficientes em relação à utilização da iluminação solar, comprovaram-se os impactos de determinados parâmetros operacionais no crescimento da cultura e adaptou-se um modelo matemático da literatura para prever a taxa de crescimento da cultura de *Nannochloropsis oceanica* em fotobiorreactores tubulares à escala piloto, para a latitude de Lisboa.

Dentro das limitações de cada abordagem, a metodologia proposta atendeu aos seus objectivos, fornecendo mais ferramentas de projecto, análise e gestão dos processos produtivos de microalgas, com o intuito de torná-la cada vez mais uma realidade. Contudo, todo o trabalho deve ainda ser refinado para que isso aconteça. Nomeadamente, uma análise dos custos de investimento e operacionais deve ser associada às análises e propostas resultantes, pois só é justificável a aplicação de determinada metodologia se a variação na biomassa produzida, e conseqüente lucro obtido através da sua venda, compensar.

No contexto do trabalho, por exemplo, não são justificáveis a utilização de uma unidade de produção mais compacta ou de uma maior frequência de rotação da bomba se os custos de material e de energia, respectivamente, forem superiores às melhorias conseguidas.

AGRADECIMENTOS

O trabalho do Professor Pedro Coelho foi financiado pela FCT, através da unidade de investigação IDMEC e laboratório associado LAETA, no âmbito do projecto UID/EMS/50022/2013.

REFERÊNCIAS

- [1]-Béchet, Q., Shilton, A., Guieysse, B., Modeling the effects of light and temperature on algae growth: State of the art and critical assessment for productivity prediction during outdoor cultivation, *Biotechnology Advances*, Vol. 31, pp. 1648-1663, 2013.
- [2]-Becker, E.W., *Microalgae: Biotechnology and Microbiology*. Cambridge University Press, 1994.
- [3]-Bernard, O., Rémond, B., Validation of a simple model accounting for light and temperature effect on microalgal growth, *Bioresource Technology*, Vol. 123, pp. 520-527, 2012.
- [4]-Carvalho, A.P., Meireles, L.A., Malcata, F.X., Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances, *Biotechnology Progress*, Vol. 22, pp. 1490-1506, 2006.
- [5]-Carvalho, A.P., Silva, S.O., Baptista, J.M., Malcata, F.X., Light requirements in microalgal photobioreactors: an overview of biophotonic aspects, *Applied Microbiology Biotechnology*, Vol. 89, pp. 1275-1288, 2011.
- [6]-Cornet, J., Dussap, C., Dubertret, G., A structured model for simulation of cultures of the cyanobacterium *Spirulina platensis* in photobioreactors: I. Coupling between light transfer and growth kinetics, *Biotechnology*, Vol. 40, pp. 817-825, 1992.
- [7]-Csgör, Z., Herrenbauer, M., Schmidt, K., Posten, C., Light distribution in a novel photobioreactor - modelling and optimization, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 13, pp. 325-333, 2001.
- [8]-Edmundson, S.J., Huesemann, M.H., The dark side of algae cultivation: Characterizing night biomass loss in three photosynthetic algae, *Chlorella sorokiniana*, *Nannochloropsis salina* and *Picochlorum* sp., *Algal Research*, Vol. 12, pp. 470-476, 2016.
- [9]-FAO, How to feed the World in 2050?, 2009 (disponível em <http://www.fao.org/wsfs/forum2050/wsfs-background-documents/hlef-issues-briefs/en/>, acesso em 15/10/2016).
- [10]-Fernández, G.G.A., Gamacho, F.G., Pérez, J.A.S., Sevilla, J.M.F., Grima, E.M., A model for light distribution and average solar irradiance inside outdoor tubular photobioreactors for the microalgal mass culture, *Biotechnology Bioengineering*, Vol. 55, pp. 701-714, 1997.
- [11]-Gitelson, A.A., Grits, Y.A., Etzion, D., Ning, Z., Richmond, A., Optical properties of *Nannochloropsis* sp and their application to remote estimation of cell mass, *Biotechnology Bioengineering*, Vol. 69, pp. 516-525, 2000.

[12]-Huesemann, M.H., Van Wagenen, J., Miller, T., Chavis, A., Hobbs, S., Crowe, B., A screening model to predict microalgae biomass growth in photobioreactors and raceway ponds, *Biotechnology Bioengineering*, Vol. 110, pp. 1583-1594, 2013.

[13]-International Energy Agency, *Headline Energy Data*, 2015 (disponível em <https://www.iea.org/>, acesso em 15/10/2016).

[14]-IPCC, *Climate changes - Impacts, adaptation and vulnerability*, Cambridge University Press, 2007.

[15]-Legrand, J., *Advances in Chemical Engineering*, Vol. 48: Photobioreaction Engineering. Elsevier, 2016.

[16]-Modest, M.F., *Radiative Heat Transfer*, Elsevier, 2013.

[17]-Molina, E., Ferna, J., Acie, F.G., Chisti, Y., Tubular photobioreactor design for algal cultures, *Journal of Biotechnology*, Vol. 92, pp. 113-131, 2001.

[18]-Montheith, J., *Principles of Environmental Physics*, Vol. 4. Academic Press, 1994.

[19]-Pilon, L., Berberoglu, H., Kandilian, R., Radiation transfer in photobiological carbon dioxide fixation and fuel production by microalgae, *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, Vol. 112, pp. 2639-2660, 2011.

[20]-Posten, C., *Design principles of photobioreactors for cultivation of microalgae*, *Engineering in Life Sciences*, Vol. 9, pp. 165-177, 2009.

[21]-Raso, S., Van Genugten, B., Effect of oxygen concentration on the growth of *Nannochloropsis* sp at low light intensity, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 24, pp. 863-871, 2012.

[22]-Sandnes, J.M., Källqvist, T., Wenner, D., Gislerød, H.R., Combined influence of light and temperature on growth rates of *Nannochloropsis oceanica*: linking cellular responses to large-scale biomass production, *Journal of Applied Phycology*, Vol. 17, pp. 515-525, 2005.

[23]-Simionato, D., Sforza, E., Carpinelli, E.C., Bertuccio, A., Giacometti, G.M., Morosinotto, T., Acclimation of *Nannochloropsis gaditana* to different illumination regimes: effects on lipids accumulation, *Bioresource Technology*, Vol.102, pp. 6026-6032, 2011.

[24]-Suda, S., Taxonomic characterization of a marine *Nannochloropsis species*, *Phycologia*, Vol. 41, pp. 273-279, 2002.

[25]-Swanson, D., Block, R., Mousa, S.A., Omega-3 fatty acids EPA and DHA: health benefits throughout life, *Advances in Nutrition*, Vol. 3, pp. 1-7, 2012.

[26]-Thurler, J.H.F., Static optimization and dynamic modeling of microalgae production in photobioreactors, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico da Universidade de Lisboa, 2016.

[27]-Tredici, M.R., Photobiology of microalgae mass cultures: understanding the tools for the next green revolution, *Biofuels*, Vol. 1, pp. 143-162, 2010.

[28]-Weissman, J.C., Goebel, R.P., Benemann, J.R., Photobioreactor design: mixing, carbon utilization and oxygen accumulation, *Biotechnology Bioengineering*, Vol. 31, pp. 336-344, 1988.

[29]-Wolf, J., Stephens, E., Steinbusch, S., Yarnold, J., Ross, I.L., Steinweg, C., Doebbe, A., Krolovitsch, C., Müller, S., Jakob, G., Kruse, O., Posten, C., Hankamer, B., Multifactorial comparison of photobioreactor geometries in parallel microalgae cultivations, *Algal Research*, Vol. 15, pp. 187-201, 2016.