SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL PARA ESTIMAR A PRODUÇÃO DE BIODIESEL DE MICROALGAS EM FOTOBIORREATORES TUBULARES

Robert Luis Lara Ribeiro – robertlarabr@gmail.com Universidade do Estado do Amazonas André Bellin Mariano – andrebmariano@gmail.com Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Auto-Sustentável – (NPDEAS/UFPR) José Viriato Coelho Vargas – vargasjvcv@gmail.com Universidade Federal de Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. Microalgas são apresentadas como fonte de energia alterativa ao petróleo, sendo capaz de transformar a energia solar e dos nutrientes em biodiesel. Desta forma, o Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Auto-Sustentável (NPDEAS/UFPR) está construindo fotobiorreatores tubulares para cultivar estes microorganismos. Juntamente com a construção, experimentos e manutenção dos fotobiorreatores, um software esta sendo desenvolvido para simular e estimar a quantidade de biodiesel que estes fotobiorreatores são capazes de produzir. O modelo utiliza os princípios físicos presentes em Dinâmica Populacional, Cinética Química, Termodinâmica clássica e correlações empíricas de Mecânica dos Fluídos, Transferência de Calor e Massa e também Óptica. A simulação computacional mostra que os fotobiorreatores tubulares construídos no NPDEAS podem ser utilizados como uma alternativa futura para a produção de biodiesel, pois sua produtividade pode chegar até 50% a mais que as produtividades citada na literatura.

Palavras-chave: Energia Solar, Biodiesel, Fotobiorreatores, Microalgas, Simulação Computacional.

1. INTRODUÇÃO

As microalgas são apresentadas como fonte de energia alternativa ao petróleo, com capacidade de produção de energia através da forma de biocombustível. Assim diversas Universidades e Institutos de pesquisa estão investindo cada vez mais tempo de pesquisa e recursos para que os pesquisadores possam extrair o máximo de biodiesel possível a partir destes microorganismos. Em comparação com a produção de sementes oleaginosas que diz respeito à produção de biodiesel, algumas culturas de microalgas têm inúmeras vantagens devido a sua diversidade biológica, tais como, podem dobrar sua biomassa em pequeno espaço de tempo, em fotobiorreatores bem estruturados podem absorver grande quantidade de energia solar, têm lipídeos de alta densidade (Xu, Miao e Wu, 2006), fornecem uma produtividade (litros de óleo produzido por hectare por ano) de até dez vezes maior do que as plantas oleaginosas podendo ser cultivadas em áreas não apropriadas para a agricultura e geram menos resíduos (Chisti, 2007).

As microalgas podem ser cultivadas em fotobiorreatores (FBR) fechados e abertos. A produção de biomassa algal em fotobiorreatores abertos tem seu custo de construção e manutenção menor que os fotobiorreatores fechados, no entanto, tem produtividade volumétrica menor. Segundo Chisti (2007), fotobiorreatores fechados podem chegar a ter produtividades volumétricas de até 30 vezes mais que nos fotobiorreatores fechados. A vantagem do cultivo de microalgas em fotobiorreatores fechados é que eles têm maior área de contato com a energia solar, menor contaminação, controle de alguns parâmetros físico-químicos, como evaporação, pH e nutrientes (Ugwu, Aoyagi e Uchiyama, 2008; Mata, Caetano e Martins, 2010; Kunjapur e Eldridge, 2010; Morweiser, Kruse e Posten, 2010).

Fatores como radiação solar incidente nos tubos, pH, nutrientes e temperatura do meio de cultivo comprometem fortemente o cultivo das microalgas, pois influenciam diretamente na composição celular do microorganismo (Kitaya, Azuma e Kiyota, 2005). Ter um fotobiorreator que seja capaz de controlar estes fatores é de suma importância para obter maiores rendimentos de biomassa microalgal. O pH e a composição de nutrientes no meio de cultivo pode ser controlado facilmente por dispositivos instalados no fotobiorreator, no entanto, a radiação solar incidente e a temperatura no meio de cultivo são mais difíceis de controlar, quando trabalhamos com fotobiorreatores construídos ao ar livre, pois estes fatores dependem de condições ambientais diversas como velocidade dos ventos, ângulo solar, umidade do ar, temperatura local, etc. (Bereguel, Rodriguez e Garcia, 2012).

Estre trabalho busca através de experimentos e simulação computacional estimar a produção de biodiesel a partir de microalgas nos fotobiorreatores tubulares (FBRT) construídos no NPDEAS. Tais fotobiorreatores são mostrados na Fig. 1.



Figura 1 - a) FBRT do NPDEAS. b) Protótipo do FBRT do NPDEAS.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 FBRT construídos no NPDEAS

O NPDEAS, localizado na Universidade Federal do Paraná, está construindo FBRT para cultivar microalgas, com o objetivo de obter biodiesel a partir da estrutura lipídica destes microorganismos (Satyanarayanal, Mariano e Vargas, 2011).

A estrutura dos FBRT é composta de 3.710 m de tubos transparentes de PVC cristal, estes tubos estão distribuídos em uma geometria compacta arranjada em uma matriz de 14 colunas por 53 linhas de tubos (total de 742 tubos), onde cada tubo tem 5 m de comprimento, com um raio de 0,03 m, conforme Fig. 1.a. Este fotobiorreator é considerado compacto por ter uma capacidade de aproximadamente 12.600 litros de meio de cultivo microalgal, usando apenas 10 m² de área construída. Outra característica importante destes fotobiorreatores é ter uma área lateral de 122 m² de exposição à radiação solar incidente (parâmetro de suma importância, responsável pela realização da fotossíntese).

Foi construído também um FBRT em escala menor, ou seja, um protótipo do fotobiorreator tubular grande. Este fotobiorreator menor tem a vantagem de ser mais estável que os fotobiorreatores maiores, no entanto, por ser menor têm produtividades menores em relação à área utilizada para a sua construção. Sua estrutura é composta por 30 tubos de 1 m de comprimento, sendo distribuídos em 5 colunas e 6 linhas. Sua capacidade é de 105 litros de meio de cultivo microalgal, tendo como área de construção 1,5 m², conforme Fig. 1.b.

Além da estrutura em si, os FBRT são compostos por bombas hidráulicas que são responsáveis pela circulação do meio de cultivo microalgal em seu interior, e por um sistema de aeração que fornece ar atmosférico enviado por compressores.

2.2 Modelo matemático

Para estimar a produção de biodiesel que um FBRT é necessário inicialmente calcular a concentração de biomassa microalgal. Desta forma, divide-se o FBRT em cinco diferentes tipos de componentes físicos, conforme a Fig. 2:

- Tipo 1 Tubos transparentes
- Tipo 2 Reservatório
- Tipo 3 Bomba
- Tipo 4 Tubos opacos
- Tipo 5 Coluna de Gaseificação

Em cada um dos cinco tipos de componentes físicos irá ocorrer crescimento microalgal, no entanto, em alguns podem existir limitações no crescimento. Assim, cada componente físico é subdividido em Elementos de Volume (EV), sendo que o domínio a ser analisado é transformado em células de volume centradas que estabelece uma única equação diferencial ordinária para cada célula através da Lei de Conservação de Espécies entre os EV.

Todos os componentes físicos são divididos em foi EV (um para a parede dos componentes físicos o qual é chamado de EV_w e outro para o fluido que é chamado de EV_f). Na Fig. 3 é mostrado como é feita a divisão no componente físico dos tubos transparentes.



Figura 2 - Sistema físico simplificado do fotobiorreator.



Figura 3 - Divisão em n EV para os tubos transparentes: a) EV_w dos tubos transparentes. b) EV_f que escoa dentro do tubo transparente.

Cada EV_f do FBRT comporta-se como um pequeno reservatório, sendo que o conteúdo é considerado totalmente homogêneo, ou seja, o fluxo de entrada mistura-se perfeitamente ao conteúdo. Desta forma, aplica-se a Lei de Conservação das Espécies nos EV_f , este princípio permite quantificar o consumo ou perda de massa da espécie i = 1 (microalgas); i = 2 (CO₂); i = 3 (O₂); i = 4 (nutrientes).

Considerando a espécie 1 (microalga), o balanço de massa resulta na Eq. (1), que incorpora junto o modelo logístico.

$$\frac{dY_1^{(j)}}{dt} = \frac{\dot{m}}{V_f^{(j)}\rho_f} \left(Y_1^{(j-1)} - Y_1^{(j)}\right) + \mu_{O2}^{(j)} \left(\mu_{nutri}^{(j)} + \mu_{CO2}^{(j)} \mu_{T,I}^{(j)} - m\right) Y_1^{(j)} \left(1 - \frac{Y_1^{(j)}}{c_{\sup}}\right)$$
(1)

onde *j* indica a posição do EV_w , que V_f é o volume do EV_f , Y_I é a concentração da microalga, *t* é o tempo de simulação, m é a vazão mássica, ρ_f é a massa específica, c_{sup} é a capacidade suporte do ambiente, $\mu_{T,I}$ é a taxa de crescimento específica em relação a temperatura e radiação solar, μ_{nutri} é a taxa de crescimento específica em relação a concentração dos nutrientes, μ_{CO2} é a taxa de crescimento específica em relação a concentração de CO₂, μ_{O2} é a taxa de inibição específica causado pelo excesso de concentração de O₂ e *m* é a taxa de mortalidade da microalga.

O crescimento microalgal em relação aos nutrientes que são colocados no meio de cultivo para servir como alimento para as microalgas é representado pela Eq. (2), esta equação foi apresentada por Jacques Monod em 1942.

$$\mu_{nutri} = \frac{c_{\max,nut}Y_4}{c_{sat,nut} + Y_4} \tag{2}$$

onde $c_{max,nut}$ é a taxa de consumo máxima de nutrientes e $c_{sat,nut}$ é a constante de saturação.

A equação para a taxa de crescimento específica em relação ao CO_2 no meio microalgal é dada pela Eq.(3), que foi desenvolvida por Andrews (1968):

$$\mu_{CO2} = \frac{Y_2}{c_{1,CO2} + Y_2 + \frac{Y_2^2}{c_{2,CO2}}}$$
(3)

onde $c_{1,CO2}$ e $c_{2,CO2}$ é a constante de inibição.

A concentração de O_2 no meio de cultivo microalgal é outro fator que deve ser considerado, pois segundo Oswald (1988), níveis extremos de O_2 dissolvido pode gerar danos foto-oxidativos nas células com redução paralela da eficiência de tratamento. Desta forma, neste trabalho é incorporado o modelo de Ricker segundo a Eq. (4), este é um modelo de denso-dependência não linear que irá inibir o crescimento da cultura de microalgas quando a concentração de O_2 aumentar demasiadamente (Costa e Godoy (2010), Gotelli (2009)).

$$\mu_{O2} = e^{-c_{O2}Y_3} \tag{4}$$

onde c_{O2} é a constante de inibição.

A equação que representa $\mu_{T,I}$ é composta por três variáveis de suma importância para o crescimento microalgal: temperatura no meio microalgal (*T*), radiação solar incidente na superfície do tubo (*I*₀) e radiação solar média no meio microalgal (*I*_{av}). Para calcular $\mu_{T,I}$ foi utilizada a Eq.(5) dada por Sánchez *et al.* (2008).

$$\mu_{T,I} = \frac{\left(A_1 \exp\left(\frac{E_a}{RT}\right) - A_2 \exp\left(\frac{E_b}{RT}\right)\right) I_{av}^{b+\frac{c}{I_0}}}{I_{av}^{b+\frac{c}{I_0}} + \left(I_K \left(1 + \left(\frac{I_0}{K_i}\right)^a\right)\right)^{b+\frac{c}{I_0}}}$$
(5)

onde I_k parâmetro de afinidade da microalga com a radiação solar, K_i é um parâmetro de fotoinibição, A_1 e A_2 são fatores de frequência ou pré-exponencial, E_a e E_b representa a energia de ativação, R é a constante geral dos gases e a, b e c são parâmetros determinados por experimentos.

A equação diferencial que representa o transporte do CO_2 e o seu consumo pelas microalgas nos EV_f é dada pela Eq. (6). A variação de concentração de CO_2 é inversamente proporcional à variação de concentração da biomassa. Por isso observa-se o sinal negativo. A equação que calcula a quantidade de CO_2 no meio microalgal é dada por:

$$\frac{dY_2^{(j)}}{dt} = \frac{\dot{m}}{V_f^{(j)}\rho_f} \left(Y_2^{(j-1)} - Y_2^{(j)}\right) - \mu_{CO2}^{(j)}\mu_{T,I}^{(j)}Y_2^{(j)}Y_1^{(j)} + c_{CO2,in}Y_{2,in}$$
(6)

sendo $\mu_{CO2}\mu_{T,I}Y_2$ a quantidade de CO₂ consumido por uma microalga, $c_{CO2,in} = 1$ quando existir entrada de CO₂ no EV_f.e $c_{CO2,in} = 0$ quando não existir entrada de CO₂ no EV_f e $Y_{2,in}$ é a concentração de CO₂ que esta entrando no EV_f por hora, causado pela inserção de ar no sistema.

Durante o processo de fotossíntese, o CO_2 é consumido, e é gerado O_2 . Vale observar que a geração de O_2 é diretamente proporcional à produção de biomassa, por isso o sinal de soma entre o termo de transporte e o termo de geração. A equação de conservação da espécie O_2 é, portanto:

$$\frac{dY_3^{(j)}}{dt} = \frac{\dot{m}}{V_f^{(j)}\rho_f} \left(Y_3^{(j-1)} - Y_3^{(j)} \right) + \mu_{O2}^{(j)} \mu_{CO2}^{(j)} \mu_{T,I}^{(j)} Y_3^{(j)} Y_1^{(j)} + c_{O2,in} Y_{3,in}$$
(7)

sendo $\mu_{O2}\mu_{CO2}\mu_{T,I}Y_3$ a quantidade de O₂ produzido por uma microalga, $c_{O2,in} = 1$ quando existir entrada de O₂ no EV_f e $c_{O2,in} = 0$ quando não existir entrada de O₂ no EV_f e $Y_{3,in}$ é a concentração de O₂ que esta entrando no EV_f por hora, causado pela inserção de ar no sistema.

A equação que quantifica o consumo de nutrientes existentes no meio microalgal é dada pela Eq. (8).

$$\frac{dY_4^{(j)}}{dt} = \frac{\dot{m}}{V_f^{(j)}\rho_f} \left(Y_4^{(j-1)} - Y_4^{(j)}\right) - \mu_{nutri}^{(j)}Y_4^{(j)}Y_1^{(j)} + c_{nutri,in}Y_{4,in}$$
(8)

sendo $\mu_{nutri}Y_4$ a quantidade de nutrientes consumidos por uma microalga, $c_{nutri,in} = 1$ quando existir entrada de nutrientes no EV_f e $c_{nutri,in} = 0$ quando não existir entrada de nutrientes no EV_f e $Y_{4,in}$ é a concentração de nutrientes que esta entrando no EV_f por hora, esta entrada de nutrientes acontece quando o cultivo é realizado de forma contínua.

Pode-se observar que para resolver este sistema de equações diferenciais é necessário ter o valor das temperaturas na parede dos tubos e também no meio de cultivo. Outra variável que deve ser calculada é a radiação solar incidente na parede dos tubos e a radiação solar média no meio de cultivo. Desta forma, foram feitos balanços de energia nos EV_w e EV_f para o cálculo das temperaturas. Para o cálculo da radiação solar utilizou-se um modelo matemático que segue os procedimentos apresentados por Frank Kreith (1969) em seu livro "Princípios da Transmissão de Calor".

O balanço de energia na parede dos tubos transparentes através dos elementos de volume pode ser observado na Eq. (9).

$$m_{w}^{(j)}c_{w}\frac{dT_{w}^{(j)}}{dt} = k_{w}A_{s,w}\left(T_{w}^{(j-1)} - T_{w}^{(j)}\right) + \dot{Q}_{rad}^{(j)} - \dot{Q}_{ar}^{(j)} - \dot{Q}_{ar}^{(j)}$$
(9)

onde c_w é o calor específico da parede, m_w é a massa da parede, k_w é a condutividade térmica, $A_{s,w}$ é a área da secção do EV_w , T_w é a temperatura na parede do EV_w , \dot{Q}_{rad} é a taxa de transferência de calor por radiação solar nas paredes dos tubos do fotobiorreator, \dot{Q}_{ar} é a transferência de calor por convecção entre o ar ambiente e a parede do tubo e \dot{Q} é a transferência de calor por convecção da parede com o meio fluido.

$$\dot{Q}_{rad} = A_{e,w} \left(\alpha I_0 - \varepsilon \sigma \left(\left(T_w^{(j)} \right)^4 - T_\infty^4 \right) \right)$$
⁽¹⁰⁾

onde a primeira parcela que esta dentro do parêntese maior, representa a porção da radiação solar absorvida pela parede do tubo, a segunda parcela que é subtraída da primeira, representa a radiação difusa. Onde α é a porcentagem de radiação solar que é absorvida pelo tubo, ε é a emissividade da face, σ é a constante de Stefan-Boltzma, $A_{e,w}$ é a área da externa do tubo e T_{∞} é a temperatura do ambiente (Duffie; Beckman, 1974).

A taxa de transferência de calor por convecção entre temperatura do ambiente com a parede dos tubos é consequentemente calculada pela Eq. (11).

$$\dot{Q}_{ar}^{(j)} = U_e A_{e,w} \left(T_w^{(j)} - T_\infty \right)$$
(11)

onde U_e é o coeficiente global de transferência de calor por convecção entre a parede externa do tubo e a temperatura do ambiente.

A radiação solar máxima que atinge a orla externa da atmosfera terrestre é aproximadamente 1393 W/m², sendo este valor também chamado de constante solar (G_0), entretanto, a radiação solar que se choca com a superfície da terra é substancialmente menor do que G_0 , porque parte da radiação é absorvida e dispersada durante os 144.833,89 metros de espessura de ar, vapor d'água, gás carbônico, e poeira que envolve a terra.

A diminuição da radiação solar pela atmosfera terrestre depende da extensão do caminho que, por sua vez, depende da posição do sol. A radiação solar incidente sobre uma superfície na terra G_n , devido aos raios solares, pode ser dada pela Eq.(12).

$$G_n = G_0 \tau_a^{m_a} \tag{12}$$

onde τ_a é o coeficiente de transmissão para massa de ar unitária e m_a é a massa relativa de ar, definida como a razão da extensão do caminho atual para o menor caminho possível. O valor de τ_a varia com a condição do céu, variando de 0,81 para um dia claro, a 0,62 em um dia nublado. O valor de m_a depende da posição do sol, dada pela *distância zenital z*, ou seja, o ângulo entre o zênite e a direção do sol (*z*)

Se a superfície receptora não é normal à direção do sol, a radiação incidente por unidade de área (G_i) será reduzida pelo cos(z), o ângulo entre a direção do sol e a normal à superfície, ou seja:

$$G_i = G_n \cos(z) \tag{13}$$

Quando o sol é visto da terra o ângulo de zênite varia com a latitude do local (ϕ), a hora do dia em termos do ângulo hora (h_z) e a declinação do sol (δ_s). Logo para o cosseno de *z* tem-se:

$$\cos z = sen(\phi) sen(\delta_s) + \cos(\phi) \cos(\delta_s) \cos(h_z)$$
(14)

Combinando as equações Eq.(13) e Eq.(14) obtém-se:

$$G_{i} = G_{n} \left(sen(\phi) sen(\delta_{s}) + \cos(\phi) \cos(\delta_{s}) \cos(h_{z}) \right)$$
(15)

Portanto, calcula-se I_0 por:

$$I_0 = G_i - G_i (0.9neb + 0.1)$$
⁽¹⁶⁾

onde *neb* é quanto tem de nebulosidade no céu e o desconto de 10% referente a $-0.1G_i$ que é a perda da radiação causado pelos 144.833,89 metros de espessura de ar.

A energia transportada pelo fluído através dos EV_f é calculada através de um balanço de energia entre os EV_f , este balanço pode ser visto pela Eq. (17).

$$m_f^{(j)}c_f \frac{dT_f^{(j)}}{dt} = \dot{Q}_{\tau,rad}^{(j)} + \dot{Q}^{(j)} + \dot{m}c_f \left(T_f^{(j-1)} - T_f^{(j)}\right)$$
(17)

onde c_f é calor específico do fluido, m_f é a massa do meio líquido de cultivo, T_f é a temperatura do fluido, $\dot{Q}_{r,rad}$ é a taxa de transferência de calor causada pela radiação solar que atravessa os tubos transparentes, calculada pela Eq. (18).

$$\dot{Q}_{\tau,rad} = I_{av} \left(\tau - \alpha_{alg} \right) \tag{18}$$

onde τ é transmisividade e α_{alg} é a absorção de radiação solar pela microalga para realizar o processo de fotossíntese.

A variável I_{av} é calculada segundo a lei de Lambert-Beer, pois a concentração de microalgas impede a penetração dos da radiação solar no meio. Assim, I_{av} depende da concentração microalgal e do caminho que a radiação solar faz dentro do tubo, este efeito pode é dado pela Eq. (19).

$$I_{av} = \frac{I_0^{(j)}}{r\pi} \int_0^r \int_0^\pi e^{-Y_1^{(j)} K_a \left((r-S)\cos(\varphi) + \sqrt{r^2 - (r-S)^2 \sin^2(\varphi)} \right)} d\varphi dS$$
(19)

onde r é o raio do tubo, S é a distância de um ponto interno até a superfície interna do tubo, φ é o ângulo do raio solar, K_a é o coeficiente de absorção de radiação solar.

2.3 Experimento de Cultivo de Microalgas

No experimento utilizou-se uma espécie de microalga do gênero *Scenedesmus*, ainda não identificada. Esta microalga foi isolada pela equipe do NPDEAS da rede de abastecimento de água de Curitiba e, portanto, apresenta como vantagem a pré-adaptação às condições de cultivo em ambiente externo, aliada ao baixo risco na geração de impacto ambiental em caso de vazamento, uma vez que se trata de uma espécie natural da região.

Necessitou-se crescer de uma pré-cultura de microalgas para servir de inoculo para o experimento principal. A produção do inoculo consiste de duas etapas preliminares, na primeira realizou-se o crescimento da cultura em frascos Erlenmeyer de 2 L, logo após, na segunda etapa o cultivo é transferido para galões de 20 L para em seguida realizar a inoculação no protótipo do FBR.

Todas as etapas de cultivo constantes no experimento foram desenvolvidas pela equipe do NPDEAS utilizando o meio CHU, que é composto pelos macro e micronutrientes necessários para o crescimento das microalgas. Na Tab. 1 pode-se observar a concentração dos macronutrientes utilizados.

Tabela 1. Nutrientes para iniciar o cultivo de microalgas.

NUTRIENTES	FÓRMULA	CONCENTRAÇÃO
Nitrato de sódio	NaNO ₃	0,25 gL ⁻¹
Cloreto de cálcio di-hidratado	CaCl ₃	0,025 gL ⁻¹
Sulfato de magnésio hepta-hidratado	MgSO ₄ 7H ₂ O	0,075 gL ⁻¹
Fosfato de potássio dibásico	K ₂ HPO ₄	0,075 gL ⁻¹
Fosfato de potássio monobásico	KH ₂ PO ₄	0,175 gL ⁻¹
Cloreto de sódio	NaCl	0,025 gL ⁻¹
Concentração total de nutrientes		0,625 gL ⁻¹

Utilizando o procedimento de batelada, ou seja, após inocular o protótipo do FBR o cultivo de microalgas crescerem durante alguns dias sem que seja feita diluições e sem acrescentar nutrientes. O experimento iniciou-se no dia 20 de março de 2012 às 11 horas e finalizou-se no dia 26 de março de 2012 as 11 horas.

Na Fig. 4.a pode-se ver a imagem do protótipo antes de ser inoculado e na Fig. 4.b a imagem do protótipo após 144 horas de cultivo.



Figura 4 - a) Protótipo do FBR antes de ser inoculado. b) Protótipo do FBR após 144 horas de cultivo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após realizar alguns ajustes de parâmetros no modelo matemático, e resolver pelo método de Runge Kutta de quarta ordem o sistema de equações diferenciais ordinárias transientes, composto pelas Eq. (1), Eq. (6), Eq. (7), Eq. (8), Eq. (9) e Eq. (17), tem-se uma comparação entre o resultado numérico e o resultado coletado pelo experimento mostrado na Fig. 5.



Figura 5 - Dados experimentais e numéricos de biomassa, após ajuste de parâmetros.

É fácil observar que os resultados numéricos do segundo e quarto dia de cultivo ficaram fora da barra de erro do resultado experimental. Uma das causas dessa diferença pode ter sido o fato de ter sido utilizado no modelo computacional neb = 0, ou seja, não se considerou a existência de nuvens no céu durante o cultivo. Desta forma, foi comparado o gráfico com os dados simulados da radiação solar na Fig. 6 com o gráfico que contém os resultados recebidos pelo sensor de radiação, pode-se notar que realmente existe uma grande diferença de radiação nestes dois dias.



Figura 6 - a) Dados numéricos de radiação solar. b) Dados do sensor de radiação solar.

É através da radiação solar é que as microalgas fazem fotossíntese, processo físico-químico onde é utilizado dióxido de carbono e água para obter glicose e assim acumulando energia a partir da radiação solar. Os gráficos da Fig. 7 são referentes à radiação incidente e radiação média nos 30 tubos durante as 144 horas de simulação do cultivo.



Figura 7 - Gráficos transientes da: a) Radiação solar na superfície dos tubos, b) Radiação solar média dentro dos tubos.

Na Fig. 7.a pode-se observar que a radiação na superfície dos tubos (I_0) é diferente em cada tubo, isto ocorre pelo fato de alguns tubos impedirem que outros recebam radiação solar direta. Este efeito de sombreamento causado pela geometria dos tubos tem seu lado positivo, pois ameniza a elevação da temperatura e tem seu lado negativo, pois fornece pouca radiação solar para as microalgas se reproduzirem. Na Fig. 7.b pode-se observar dependência que a radiação solar média no meio microalgal (I_{av}) tem com o nível de concentração de biomassa, conforme esta concentração aumenta dentro dos tubos, diminui o valor de I_{av} , pois quanto mais concentrado estiver o meio microalgal, maior será a dificuldade de a radiação penetrar até o centro dos tubos.



Figura 8 - Gráficos transientes da: a) Temperatura do fluido e b) Temperatura na parede dos tubos.

Perfis transientes de temperatura nos 30 tubos do protótipo durante as 144 horas de cultivo foram obtidos através da simulação numérica. Estes perfis podem ser vistos na Fig. 8, onde Fig. 8.a mostra a temperatura no fluído e a Fig. 8.b mostra a temperatura na parede dos tubos.

Manter a temperatura no intervalo ideal (17 °C até 32 °C) para o crescimento de microalgas não é uma tarefa fácil, no entanto, conforme as simulações computacionais feitas no protótipo do fotobiorreatores nota-se que o sistema mantêm a temperatura do fluido no intervalo de 18 °C até 24 °C. Esta grande inércia térmica é obtida por causa da geometria compacta e matricial dos fotobiorreatores do NPDEAS.

Com os resultados de concentração da simulação pode-se analisar a produtividade anual que o protótipo do fotobiorreator poderá desenvolver em um ano de cultivo. A produtividade máxima em apenas uma semana de cultivo foi de 1.494,7 L/(ha.ano). Este dado mostra-se inferior aos valores encontrados na literatura por Chist (2007) que obteve de 50mil L/(ha.ano) até 135mil L/(ha.ano) de óleo de microalgas.

Como os dados obtidos na simulação numérica estão próximos dos dados experimentais, simulou-se então um cultivo de 14 dias para o fotobiorreator maior (Figura 1.a), com objetivo de calcular sua produtividade anual. Após a realização da simulação o modelo computacional encontrou como produtividade máxima 138.944 L/(ha.ano), aproximadamente quase cem vezes mais que no protótipo do fotobiorreator.

Na Tab. 2 observam-se as produtividades referentes aos fotobiorreator do NPDEAS (protótipo do fotobiorreator e fotobiorreator) e os dados encontrados na literatura. Nota-se que a microalga^b com 70% de óleo em sua biomassa tem produtividade inferior à encontrada na simulação do fotobiorreator com uma microalga de apenas 11,25% de óleo em sua biomassa. Isto porque o fotobiorreator foi projetado para obter a máxima eficiência em obter a luz solar sem que o sistema todo superaqueça, mantendo sempre a microalga no seu intervalo de temperatura ótimo.

Tabela 2. Dados de produtividade de óleo.

Cultivo	Óleo [L/(ha.ano)]
Soja ^a	446
Palma ^a	5.950
Microalga ^b	136.900
Microalga ^c	58.700
Microalga - Protótipo do FTC ^d	1.494,7
Microalga - FTC ^d	138.944

^a Dados da literatura² Chist (2007).

^b Dados da literatura², 70% de óleo na biomassa Chist (2007).

^c Dados da literatura², 30% de óleo na biomassa Chist (2007).

^d Dados do NPDEAS, 11,25% de óleo na biomassa

4. CONCLUSÃO

Pode-se concluir que o modelo matemático e computacional apresenta resultados de perfis de concentrações, temperatura e radiação solar qualitativamente satisfatório para cultivos realizado no protótipo do fotobiorreator, mesmo com todas as simplificações realizadas no modelo. Desta forma, a estimativa da produção de biodiesel é feita para que se tenha uma ideia da quantidade de biodiesel um cultivo pode ter anualmente.

REFERÊNCIAS

Costa, M. I. S., Godoy, W. A. C., 2010. Fundamentos da Ecologia Teórica, Barueri, SP, Minha Editora.

Gotelli, N. J., 2009. Ecologia, Londrina, PR, Quarta Edição, Editora Planta.

Monod, J., 1942. Recherches sur la croissance des cultures bacteriennes. 2nd ed., Hermann, Paris.

- Xu, H., Miao, X. and Wu, Q. 2006., High quality biodiesel production from a microalga Chlorella protothecoides by heterotrophic growth in fermenters. Journal of Biotechnology. Vol.126, p.499–507.
- Chisti Y., 2007. Biodiesel from microalgae. Biotechnol Adv; Vol.25, p.294-306.
- Lourenço, S.O., 2006. Cultivo de microalgas marinhas princípios e aplicações. São Carlo. Ed. Rima.
- Satyanarayana1, K.G, Mariano, A.B. and Vargas, J.V.C., 2011. A review on microalgae, a versatile source for sustainable energy and materials. Int. J. Energy Res. Vol.35, p.291–311.
- Kitaya, Y., Azuma, H. and Kiyota, M., 2005. Effects of temperature, CO2/O2 concentrations and light intensity on cellular multiplication of microalgae, Euglena gracilis. Advances in Space Research. Vol.35, p.1584-1588.
- Bereguel, M., Rodriguez, F. and Garcia, J.L., 2014. Model predictive control of pH in tubular potobioreactors. Journal of Process Control. Vol.14, p.377-387.
- Kunjapur, A. and Eldridge, R., 2010. Photobioreactor design for commercial biofuel production from microalgae. Ind. Eng. Chem. Res. Vol.49, p.3516–3526.
- Morweiser, M., Kruse, O. and Posten, C. 2010. "Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production". Appl. Microbiol. Biotechnol. Vol.87, p.1291–1301.
- Ugwu, C., Aoyagi, H. and Uchiyama, H., 2008. Photobioreactors for mass cultivation of algae. Bioresour. Technol. Vol.99, p.4021–4028.
- Mata, T., Martins, A. and Caetano, N., 2010. Microalgae for biodiesel production and other applications: a review. Renew. Sust. Energ. Rev. Vol.14, p.217–232.
- Duffie, J. A.; Beckman, A. A., 1974. Solar energy thermal processes. New York: Wiley: p. 34-37.
- Kreith, F., 1969. Princípios da transmissão de calor. Editora da Universidade de São Paulo, SP.
- Sánchez, J.F., Fernández-Sevilla, J.M., Acién, F.G., Cerón, M.C., Pérez-Parra, J. and Molina Grima, E., 2008. Biomass and lutein productivity of Scenedesmus almeriensis: influence of irradiance, dilution rate and temperature. Biotechnological Products and Process Engineering. Appl Mcrobiol Biotechnol, vol.79, p.719-729.
- Oswald, W.J., 1988. Micro-algae and wastewater treatment. In: BOROWITZKA, M. and BOROWITZKA, L. (eds). Micro-algal Biotechnology, 2th Ed., Sydney, p.477.
- Andrews, J. F., 1968. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. Biotechnol. Bioeng., vol.10, p.707–723.

COMPUTER SIMULATION TO ESTIMATE THE PRODUCTION OF BIODIESEL MICROALGAE IN TUBE PHOTOBIOREACTORS

Abstract. Microalgae are presented as alterative source of energy to oil, being able to transform solar energy and nutrients into biodiesel. Thus, the Núcleo de Pesquisa e Desenvolvimento em Energia Auto-Sustentável (NPDEAS/UFPR) is constructing tubular photobioreactors to cultivate these microorganisms. Along with the construction, experiments and maintenance of photobioreactors, one software is being developed to simulate and estimate the amount of biodiesel that these photobioreactors are capable of producing. The model uses the physical principles present in Population Dynamics, Chemical Kinetics, Classical Thermodynamics and empirical correlations of Fluid Mechanics, Heat Transfer and Mass Transfer and also Optics. The computer simulation shows that the tubular photobioreactor built in NPDEAS can be used as an alternative future for biodiesel production because productivity can reach up to 50% more than the yield reported in the literature.

Key words: Solar Energy, Biodiesel, Photobioreactors, Microalgae, Computational Simulation.