

## SOFTWARE PARA ANÁLISE DO CULTIVO DE MICROALGAS PARA FINS DE ACÚMULO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Ítalo Fernando dos Santos Araujo<sup>1</sup>, Cristina Ferraz Silva<sup>1</sup>, Antônio Santos Silva<sup>2</sup>, Rogério Luz Pagano<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Química, São Cristóvão, Brasil (italoequ@gmail.com, ferrazcristina@academico.ufs.br)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, São Cristóvão, Brasil (ass@academico.ufs.br, rpagano@academico.ufs.br)

**Resumo:** O aquecimento global é um fenômeno amplamente estudado devido aos malefícios causados ao planeta. Nesse contexto, as microalgas têm ganhado repercussão no mundo científico devido ao fato que durante o seu crescimento ocorre a captura de dióxido de carbono, um dos principais gases poluentes, além de produzir diversos produtos com valor agregado. O estudo da cinética de crescimento delas tem sido a chave para a compreensão do funcionamento desse processo. Neste trabalho, utilizou-se do modelo de Bernard para avaliar a cinética de crescimento de microalgas.

**Palavras-chave:** Cinética de crescimento; Modelagem matemática; Simulação; FORTRAN.

### INTRODUÇÃO

O aquecimento global é um fenômeno amplamente debatido e estudado por causa das mudanças climáticas e ônus ao equilíbrio ecológico e social da Terra. Esse pode ser definido como sendo o aumento da temperatura média do planeta Terra por meio do acúmulo de gases poluentes na atmosfera. No entanto, para compreendê-lo faz-se necessário apresentar o efeito estufa, que é um fenômeno natural em que o planeta regula sua temperatura visando um equilíbrio. Este efeito pode ser potencializado devido ao aumento das emissões de poluentes na atmosfera, principalmente devido a queima de combustíveis fósseis em indústrias e cidades, desmatamento de florestas, e resíduos sólidos (DALAZEN et al., 2022). Portanto, com a aceleração dos gases de efeito estufa devido principalmente ao dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) têm-se estudado novas formas de energia como a eólica, solar, nuclear, biomassa e entre outras (YUAN et al., 2020).

Tendo em vista, esse panorama, nota-se a urgência em minimizar e mitigar a emissão de poluentes no meio ambiente. Para isso, foram realizadas inúmeras pesquisas para encontrar técnicas e mecanismo alternativos aos poluentes. Segundo Duarte et al. (2017) dentre as técnicas empregadas visando a redução de CO<sub>2</sub>, diversos métodos biológicos, químicos e físicos foram testados, no entanto dentre esses a biofixação através de

microalgas e cianobactérias é considerado um método adequado e efetivo para a mitigação de CO<sub>2</sub>. As microalgas são seres unicelulares que possuem ampla aplicação biotecnológica. Estas, crescem naturalmente em corpos aquáticos e possuem a capacidade de utilizar a radiação solar no processo de fotossíntese, além de absorver nutrientes da água, realizar biofixação de compostos carbônicos e serem uma matéria prima valiosa (ALMOMANI, 2020). De acordo com Daneshvar et al. (2022), a evolução dos cloroplastos permitiu que as microalgas se tornassem fábricas biológicas, as quais consomem CO<sub>2</sub> para a geração de uma variedade de substâncias.

Para a produção de compostos economicamente viáveis a partir de microalgas, vários pesquisadores tem buscado formas de integrar a produção de algas com o tratamento de águas residuárias e a captura de dióxido de carbono. Contudo, a aplicação dessas estratégias em larga escala tem sido difícil, principalmente devido as variações ambientais e até a atividade da microalga como um todo. Por conseguinte, para compreender a cinética de crescimento destes entes, faz-se necessário o uso de modelos matemáticos para auxiliar na otimização e melhora no cultivo de algas (WANG et al., 2019). A modelagem matemática pode ser um método efetivo para ajudar pesquisadores a analisar o crescimento de microalgas em um biorreator. Por isso, diversos modelos foram propostos ao longo do tempo, que vão desde modelos para crescimento populacional



como o proposto por Malthus, a modelos mais sofisticadas que analisam até mesmo o metabolismo celular. Droop propôs um modelo dinâmico, o qual considera a taxa de diluição e a quantia de nitrogênio inorgânico influente para descrever o crescimento de microalgas (YUAN et al., 2020). Posteriormente, surgiram diversos modelos baseados no modelo de Droop, dentre essas cita-se o proposto por Bernard (2011), o qual será utilizado neste trabalho.

Em paralelo as investigações de técnicas e métodos para a redução de poluentes, os líderes mundiais tem promovido políticas e mecanismos de conscientização para reduzir as emissões dos mesmos. Pode-se citar como exemplo o protocolo de Kyoto, o Acordo de Paris e até a recente Conferência das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (COP26). Os créditos de carbono ou Redução Certificada de Emissões (RCE) são certificações emitidas para indivíduos ou empresas que reduziram suas emissões de gases do efeito estufa. A convenção utilizada é que 1 crédito de carbono equivale a 1 tonelada de dióxido de carbono. De acordo com Moreira et al. (2020) projetos associados permitem países em desenvolvimento adquirirem RCE de países desenvolvidos.

Tendo em vista o contexto acima, para que se torne possível a análise do modelo matemático proposto por Bernard (2011) faz-se necessário a utilização de métodos numéricos e uma linguagem de programação. Neste caso utilizou-se da linguagem de programação FORTRAN a qual já amplamente conhecida por possuir diversas bibliotecas e sub-rotinas que fornecem as ferramentas necessárias para a utilização de diversos métodos numéricos. Estes são algoritmos os quais visam a obtenção de soluções a partir de um conjunto de operações. Para isso, utilizou-se a DASSL(Petzold, 1982), que é um solver que visa solucionar um sistema de equações algébrico-diferenciais de até índice 1. Antes de utiliza-la, para a solução do modelo, adicionou-se uma equação algébrica referente à quantificação dos créditos de carbono. No entanto, para que esse processo ocorra é necessário conhecimento em alguma linguagem de programação e pretendendo facilitar a divulgação de conhecimento criou-se um ambiente visual. A partir deste, torna-se possível que qualquer pessoa avalie a cinética de crescimento de microalgas, desde que conheça alguns parâmetros do seu sistema e condições iniciais do cultivo destes.

## MATERIAL E MÉTODOS

A metodologia utilizada no trabalho desde as equações utilizados na modelagem matemática, bem com a proposta de solução, está detalhada a seguir. Bernard (2011) propôs um modelo matemático, o qual foi adotado no presente trabalho, composto por um

sistema com quatro equações diferenciais, as quais seguem apresentadas abaixo:

$$\dot{s} = D \cdot s_{in} - \bar{\rho} \cdot \left( \frac{s}{s+K_s} \right) \cdot \left( 1 - \frac{q}{Q_1} \right) \cdot x - D \cdot s \quad (1)$$

$$\dot{q} = \bar{\rho} \cdot \left( \frac{s}{s+K_s} \right) \cdot \left( 1 - \frac{q}{Q_1} \right) - \bar{\mu} \cdot (q - Q_0) \quad (2)$$

$$\dot{x} = \bar{\mu} \cdot \left( 1 - \frac{Q_0}{q} \right) \cdot x - D \cdot x - R \cdot x \quad (3)$$

$$\dot{I}^* = \bar{\mu} \cdot \left( 1 - \frac{Q_0}{q} \right) \cdot (\bar{I} - I^*) \quad (4)$$

em que  $s(t)$ , é a concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido em solução,  $q(t)$  é a concentração de nitrogênio interno da célula,  $x(t)$  é a concentração de biomassa de alga e  $I^*(t)$  é uma variável conceitual que denota a radiação solar. A unidade desta última, é  $mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ . Além destas funções, há alguns parâmetros que serão apresentados a seguir,  $D$  é a taxa de diluição,  $\bar{\rho}$  denota a taxa máxima de absorção de nitrogênio,  $R$  é a taxa de respiração,  $\bar{I}$  é a radiação média em torno do volume da cultura,  $Q_0$  é a quota mínima de nitrogênio,  $Q_1$  é a quota máxima de nitrogênio,  $\bar{\mu}$  é taxa média de crescimento e é dada pela Equação 5, que está abaixo.

$$\bar{\mu} = \tilde{\mu} \cdot \frac{2K_{IL}}{\lambda\sqrt{\Delta}} \cdot \arctan \left( \frac{I_0(1-e^{-\lambda}) \cdot \sqrt{\Delta}}{2I_0^2 \cdot e^{-\lambda} + I_0(1+e^{-\lambda}) \cdot K_{IL} + 2I_{opt}^2(\theta_0^C)} \right) \quad (5)$$

sendo que  $I_0$  é a intensidade luminosa na superfície do biorreator.  $\bar{I}$  pode ser mensurada através do uso da Equação 6, a qual segue apresentada abaixo.

$$\bar{I} = \frac{I_0}{\lambda} (1 - e^{-\lambda}) \quad (6)$$

A profundidade ótica ( $\lambda$ ) pode ser descrita através da Equação 7 a qual segue abaixo.

$$\lambda = \xi \cdot L \quad (7)$$

em que  $L$  é a profundidade do volume de cultura, e  $\xi$  é a taxa de atenuação luminosa, a qual é descrita matematicamente por meio da Equação 8:

$$\xi = a \cdot Chl + b \cdot x + c \quad (8)$$

em que,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são constantes,  $Chl$  representa a concentração de clorofila que é descrita pela Equação 9.

$$Chl = \gamma \cdot x \cdot q \quad (9)$$



A proporção de clorofila em relação a concentração de nitrogênio, que é representada por  $\gamma$ , está contida na Equação 10.

$$\gamma = \gamma_{max} \cdot \frac{k_I^*}{I^* + k_I^*} \quad (10)$$

onde,  $\gamma_{max}$  é o valor máximo que  $\gamma$  pode atingir. Os parâmetros  $\Delta$  e  $I_{opt}$ , que representam a radiação proveniente da taxa máxima de fotossíntese, são calculados pelas Equações 11 e 12, respectivamente.

$$\Delta = 4I_{opt}^2(\theta_0^C) - K_{il}^2 \quad (11)$$

$$I_{opt} = \sqrt{K_{sl} \cdot K_{il}} \quad (12)$$

onde,  $K_{sl}$  é dado pela Equação 13.

$$K_{sl} = \frac{K_{sl}^*}{\theta_0^C} \quad (13)$$

A razão entre os valores da concentração de clorofila inicial e a concentração de biomassa é dada pela Equação 14.

$$\theta_0^C = \frac{Chl_0}{x_0} \quad (14)$$

Frise-se que as Equações 1 até a 14 são provenientes de Bernard (2011). Além das equações apresentadas, adicionou-se mais uma, a qual refere-se aos créditos de carbono. A Equação 15, descreve o cálculo de créditos de carbono a partir da concentração de biomassa de microalgas.

$$C = (2,92 \times 10^{-3} \cdot x - 2,34 \times 10^{-4}) \cdot \eta_{CO_2} \quad (15)$$

sendo que esta é uma equação de origem empírica que foi adicionada ao sistema de equações do modelo de Bernard, sendo que  $C$  é a quantidade de créditos de carbono e  $\eta_{CO_2}$  é a razão entre a quantia de  $CO_2$  e de biomassa (0,1 nesse trabalho). A partir das equações aqui descritas, e utilizando os dados experimentais de Flynn et al. (1994), pode-se realizar simulações utilizando o solver DASSL (Petzold, 1982). Com isto, tornou-se possível a construção do ambiente visual do software em linguagem de programação FORTRAN. Portanto, o programa permite que o usuário analise a cinética de crescimento de microalgas, além de possuir uso simples e fácil.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir dos dados de Flynn et al. (1994) pode-se realizar a modelagem matemática do fenômeno da cinética de crescimento de microalgas, sendo que este estudou a *Isochrysis galbana*.

No entanto, para que a simulação fosse feita faz-se necessário a obtenção de alguns parâmetros, os quais foram obtidos na literatura através dos trabalhos de Bernard (2011) e Zhou et al. (2014). Estes dados foram agrupados nas Tabela 1 e 2, as quais encontram-se abaixo.

Tabela 1. Condições iniciais usadas para a simulação.

Condições iniciais	Valor	Unidade
$s(0)$	1,411	$g N m^{-3}$
$q(0)$	0,600	$g N \cdot (g C)^{-1}$
$x(0)$	0,030	$g C m^{-3}$
$I^*(0)$	100	$mol m^{-2} s^{-1}$
$C(0)$	0,0	-

Tabela 2. Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor	Unidade
$\tilde{\mu}$	1,7	$d^{-1}$
$Q_0$	0,050	$gN \cdot gC^{-1}$
$Q_1$	0,25	$gN \cdot gC^{-1}$
$K_{sl}^*$	1,4	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$K_{il}$	295	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$\bar{\rho}$	0,073	$gN \cdot gC^{-1} \cdot d^{-1}$
$K_s$	0,0012	$gN \cdot m^{-3}$
$R$	0,0081	$d^{-1}$
$\gamma_{max}$	0,68	$gChl \cdot gN^{-1}$
$K_I^*$	63	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$I_0$	100	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$a$	16,2	$m^2 \cdot gChl^{-1}$
$b$	0,087	$m^{-1}$

Com esses dados e as equações que regem o modelo de Bernard, Equações de 1 a 14, pode-se iniciar a programação do software. Cita-se, que as equações serão solucionadas através da DASSL que é um solver numérico, que visa a solução de um sistema de equações algébrico-diferenciais. Além disso, a taxa de diluição ( $D$ ) e a concentração de nitrogênio influente ( $s_{in}$ ) utilizadas na simulação foram consideradas nulas. A Figura 1, apresenta a tela inicial do software, que se encontra abaixo.



Figura 1. Tela inicial do software.

Nota-se que há um menu superior com 3 opções, Arquivo, Introdução e Cinética. Ao clicar em arquivo, há opção de sair do programa. Caso o usuário clique em Introdução, este será redirecionado a um arquivo de texto, o qual contém um pequeno tutorial, e as condições operacionais usadas nesse trabalho. A Figura 2, apresenta este arquivo de texto.

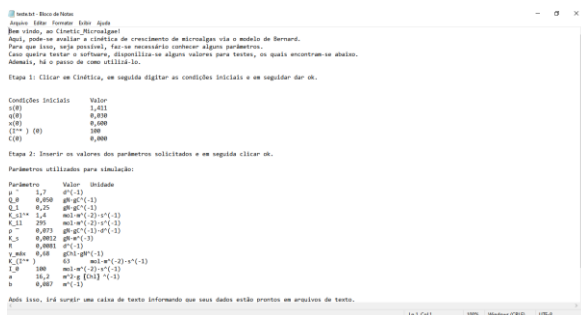


Figura 2. Arquivo de texto introdutório ao software.

Ao clicar em Cinética, o usuário irá avaliar o fenômeno aqui estudado através do software. Em seguida, irá surgir uma caixa de diálogo solicitando as condições iniciais do processo estudado. A Figura 3, apresenta a caixa de diálogo citada.

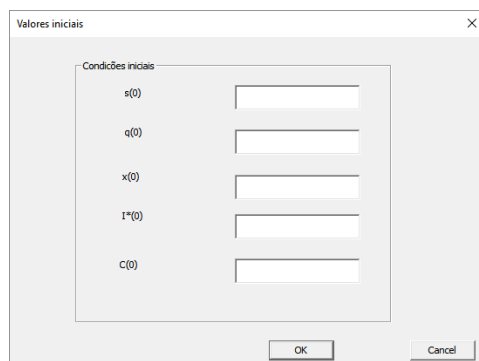


Figura 3. Caixa de diálogo de condições iniciais.

Após o usuário inserir as informações pertinentes, o software irá solicitar alguns parâmetros, os quais depois de serem digitados e clicar em ok, irá gerar arquivos contendo a resolução numérica de cada equação diferencial em função do tempo, exceto a Equação 15 que é uma equação algébrica que possui dependência da concentração de biomassa de alga. A Figura 4, apresenta, a caixa de diálogo solicitando os valores dos parâmetros.

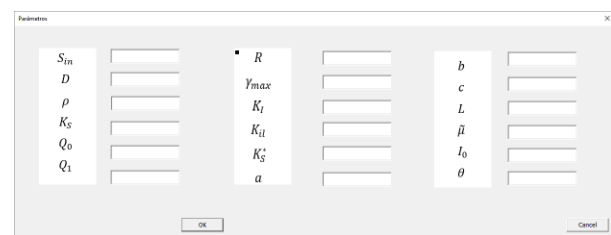


Figura 4. Caixa de diálogo dos parâmetros.

Assim, que o programa processar os dados, irá surgir uma caixa de diálogo informando que os dados foram gerados e estão contidos na pasta do mesmo. Isto, está contido na Figura 5, a qual se encontra abaixo.

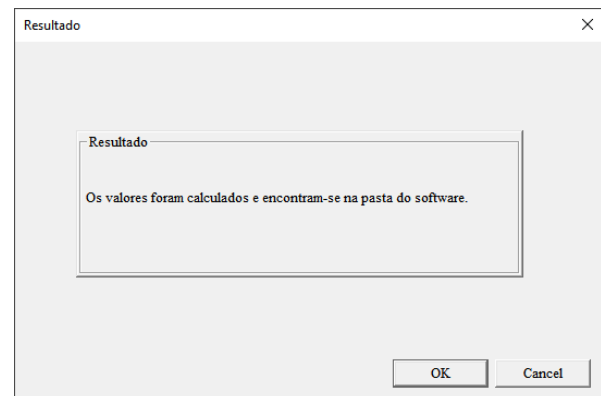


Figura 5. Caixa de diálogo informando que o software calculou os valores.

Tendo em vista a análise do software desenvolvido, necessita-se analisar o fenômeno o qual ele visa estudar, a cinética de crescimento de microalgas. A Figura 6, apresenta uma representação gráfica dos resultados obtidos.

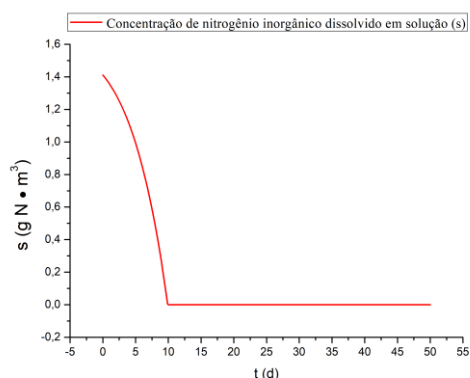


Figura 6. Valores obtidos da concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido em solução em função do tempo.

A Figura 6, apresenta que o comportamento da concentração de nitrogênio inorgânico em solução tende a decrescer com o passar do tempo, visto que o mesmo está sendo consumido durante o crescimento da microalga. Sendo que a partir de um dado instante de tempo, a concentração chega a um patamar o qual tende a zero. Este comportamento está de acordo com os dados experimentais de Flynn et al. (1994) e com o trabalho de Zhou et al. (2014), que partindo da concentração inicial tende a decrescer, até atingir uma região com comportamento constante e próximo de zero.

A concentração de nitrogênio no interior da célula em função do tempo está contida na Figura 7, a qual é uma representação gráfica.

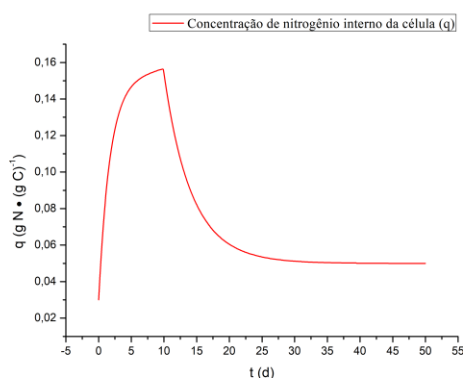


Figura 7. Valores obtidos para a concentração de nitrogênio intracelular em função do tempo.

A Figura 7, descreve o comportamento das microalgas em função do nitrogênio no interior das células destas, partindo de uma concentração inicial esta cresce até atingir um máximo e posteriormente decresce, esse comportamento é explicado pelo processo de crescimento das microalgas, as quais absorvem mais nutrientes para que possam reproduzir-

se e aumentar o seu quantitativo. Sendo que a partir de um dado instante de tempo, algumas tendem a morrer, processo que justifica a etapa de decrescimento no gráfico. Segundo Almomani (2020), nitrogênio é um dos nutrientes essenciais ao desenvolvimento de uma cultura de microalgas, além disso uma oferta baixa de N faz com que estas percam sua capacidade de realizar fotossíntese e conseqüentemente afeta o crescimento celular. O comportamento aqui descrito está condizente com os dados experimentais de Flynn et al. (1994). A Figura 8, apresenta a concentração de biomassa de microalga.

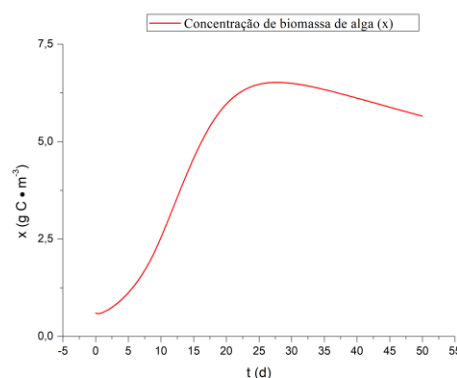


Figura 8. Valores obtidos para a concentração de biomassa de alga em função do tempo.

A Figura 8 mostra que a concentração de biomassa de microalga possui um ponto próximo do início em que há um pequeno atraso, o que caracteriza o período de adaptação da microalga à cultura, para que assim ela possa crescer em um momento posterior, conhecida como fase lag. Em seguida, a curva mostrou-se crescente, período conhecido como fase exponencial, em que houve o crescimento dos microrganismos. Em seguida, houve um decrescimento, o que se refere a fase de morte da alga, em que existe uma redução no número de indivíduos. Isto está condizente com os dados experimentais oriundos de Flynn et al. (1994).

A Equação 4, que apresenta a radiação conceitual, demonstrou que há uma relação inversa entre concentração de biomassa de alga e radiação, à medida que a radiação reduziu seus valores, notou-se que a concentração de biomassa apresentou um crescimento. De acordo com Wang et al. (2019), o crescimento de microalgas em condições com menor taxa de incidência luminosa tem uma maior taxa fotossintética em relação a condições com maior incidência de luz.

Ao analisar a Equação 15, a qual fornece a quantidade de créditos de carbono, pode-se observar que esse valor é proporcional à quantidade de biomassa produzida, apresentada na Figura 8. Isso nos leva a esperar que a curva que representa os créditos



de carbono tenha comportamento similar, conforme nota-se na Figura 9. À medida que a quantidade de biomassa aumentou, a quantidade acumulada de créditos de carbono apresentou um crescimento. Após um período de 25 dias, houve um acúmulo de 0,0017 créditos de carbono, este valor relativamente baixo se deve as dimensões reduzidas do experimento, além do mesmo ter sido conduzido em escala laboratorial.

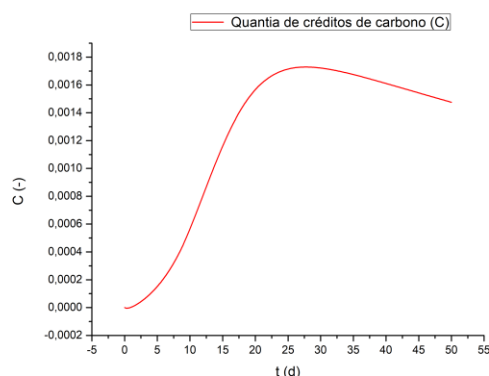


Figura 9. Valores obtidos para o acúmulo de créditos de carbono em função do tempo.

### CONCLUSÃO

O modelo de Bernard (2011) apresentou uma boa descrição do fenômeno da cinética de crescimento de microalgas. Com resultados semelhantes aos dados experimentais de Flynn et al. (1994) e aos descritos na literatura pelos trabalhos de Almomani (2020), Wang et al. (2019), Yuan et al. (2020).

O software construído com base na linguagem de programação FORTRAN, possui uso simples, fácil e com ambiente visual amigável. Além disso, o software gera dados que poderiam ser usados para a geração de gráficos ou eventuais análises estatísticas.

Em suma, o modelo apresentou uma boa descrição e resultados confiáveis, que avaliam o fenômeno da cinética de crescimento de microalgas de forma eficaz a partir de condições iniciais e parâmetros. Ademais, o programa desenvolvido se mostrou, ser simples e efetivo.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Sergipe e ao Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI) pelo incentivo e pela concessão da bolsa.

### NOMENCLATURA

Símbolo	Nomenclatura	Unidade
C	Quantia de créditos de carbono	-
Chl	Concentração de clorofila	$g\ Chl \cdot (g\ dw)^{-1}$
D	Taxa de diluição	$dia^{-1}$
$I_0$	Intensidade luminosa na superfície do reator	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$I_{opt}$	Taxa máxima de radiação proveniente da fotossíntese	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$I^*$	Radiação conceitual	$mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$
$K_{il}$	Coefficiente de inibição	$mol\ m^{-2} s^{-1}$
$K_s$	Constante de meia saturação	$gN \cdot m^{-3}$
L	Profundidade da cultura	m
q	Concentração de nitrogênio interno da célula	$g\ N \cdot (g\ C)^{-1}$
$Q_0$	Quota mínima de nitrogênio	$g\ N \cdot (g\ C)^{-1}$
$Q_1$	Quota máxima de nitrogênio	$g\ N \cdot (g\ C)^{-1}$
R	Taxa de respiração	$dia^{-1}$
s	Concentração de nitrogênio inorgânico dissolvido em solução	$g\ N \cdot m^{-3}$
$s_{in}$	Concentração de nitrogênio influente	$g\ N \cdot m^{-3}$
t	Tempo	dia
x	Concentração de biomassa de alga	$g\ C \cdot m^{-3}$
$\gamma$	Proporção de clorofila em relação a concentração de nitrogênio	$g\ Chl \cdot (g\ N)^{-1}$
$\theta_0^C$	Razão entre os valores da concentração de clorofila inicial e a	$g\ Chl \cdot (g\ C)^{-1}$



$\eta_{CO_2}$	concentração de biomassa Razão entre os valores da concentração de $CO_2$ e a concentração de biomassa	-
$\lambda$	Profundidade ótica	-
$\bar{\mu}$	Taxa média de crescimento	$dia^{-1}$
$\tilde{\mu}$	Taxa máxima de crescimento	$dia^{-1}$
$\xi$	Taxa de atenuação luminosa	$m^{-1}$
$\bar{\rho}$	Taxa máxima de absorção de nitrogênio	$g\ N \cdot (g\ C)^{-1}$

## REFERÊNCIAS

- Almomani, F. (2020). Kinetic modeling of microalgae growth and CO<sub>2</sub> bio-fixation using central composite design statistical approach. *Science of the Total Environment*, 720, 137594. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137594>
- Bernard, O. (2011). Hurdles and challenges for modelling and control of microalgae for CO<sub>2</sub> mitigation and biofuel production. *Journal of Process Control*, 21(10), 1378–1389. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2011.07.012>
- Dalazen, L. L., Silva, R. de F., Kaczam, F., Da Silva, L. S. C. V., Dos Santos, R. V., Silva, B. N., & Junior, J. P. M. (2022). As práticas sustentáveis para a mitigação dos gases de efeito estufa: uma revisão sistemática de literatura / Sustainable practices for greenhouse gas mitigation: a systematic literature review. *Brazilian Journal of Development*, 8(5), 37685–37708. <https://doi.org/10.34117/bjdv8n5-323>
- Daneshvar, E., Wicker, R. J., Show, P. L., & Bhatnagar, A. (2022). Biologically-mediated carbon capture and utilization by microalgae towards sustainable CO<sub>2</sub> biofixation and biomass valorization – A review. *Chemical Engineering Journal*, 427(April 2021), 130884. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130884>
- Duarte, J. H., de Moraes, E. G., Radmann, E. M., & Costa, J. A. V. (2017). Biological CO<sub>2</sub> mitigation from coal power plant by *Chlorella fusca* and *Spirulina* sp. *Bioresource Technology*, 234, 472–475. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.03.066>
- Flynn, K. J., Davidson, K., & Leftley, J. W. (1994). Carbon-nitrogen relations at whole-cell and free-amino-acid levels during batch growth of *Isochrysis galbana* (Prymnesiophyceae) under conditions of alternating light and dark. *Marine Biology*, 118(2), 229–237. <https://doi.org/10.1007/BF00349789>
- Hossain, S. M. Z., Sultana, N., Razzak, S. A., & Hossain, M. M. (2022). Modeling and multi-objective optimization of microalgae biomass production and CO<sub>2</sub> biofixation using hybrid intelligence approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 157(December 2021), 112016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112016>
- Kassim, M. A., & Meng, T. K. (2017). Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) biofixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production. *Science of the Total Environment*, 584–585, 1121–1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.172>
- Moreira, S. L. S., Imbuzeiro, H. M. A., Silvert, C., Dietrich, O. H. S., Pimentel, L. D., & Fernandes, R. B. A. (2020). Above- and below-ground carbon accumulation in cultivated macauba palm and potential to generate carbon credits. *Journal of Cleaner Production*, 265, 121628. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121628>
- Petzold, L. R. (1982). A description of DASSL: A differential/algebraic system solver, Report No. SAND82-8637. October.
- Wang, D., Lai, Y. C., Karam, A. L., De Los Reyes, F. L., & Ducoste, J. J. (2019). Dynamic Modeling of Microalgae Growth and Lipid Production under Transient Light and Nitrogen Conditions. *Environmental Science and Technology*, 53(19), 11560–11568. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02908>
- Yuan, S., Hu, J., Liu, Z., Hong, Y., & Wang, X. (2020). Modeling microalgae growth in continuous culture: Parameters analysis and temperature dependence. *Energy*, 195, 116961. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.116961>
- Zhou, X., Yuan, S., Chen, R., & Song, B. (2014). Modelling microalgae growth in nitrogen-limited continuous culture. *Energy*, 73, 575–580. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.058>