MODELAGEM DE CULTIVO SUBMERSO PARA PRODUÇÃO DE ETANOL EM BIORREATOR BATELADA

J. G. Batista[1], A. B. Nascimento[2], A. L. Ferreira[3], G. F Silva[4]

[1,2,3,4]*Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil*
(Jadson.goncalves@academico.ufpb.br)

A produção do biodiesel deve levar em consideração a formação do subproduto glicerol, que representa cerca de 10% da massa total resultante do processo. O objetivo da pesquisa foi estudar a cinética da produção de etanol utilizando o glicerol como fonte de carbono. Contudo, determinou-se que o modelo cinético de Tosetto e Andrietta (2002) apresentou melhor correlação entre os valores experimentais e os estimados em simulação de reator batelada, e a produção máxima de etanol foi de 0,0654 g/L.

Palavras-chave: Biodiesel; Glicerol; Etanol; Levenberg-Marquardt

INTRODUÇÃO

O foco em energia renovável é crescente e de interesse mundial, visto que a queima de derivados de petróleo, tais como gás natural, gasolina, gás liquefeito de petróleo (GLP), querosene, óleo diesel, dentre outros, contribui para o aquecimento global por elevar os níveis de CO_2 na atmosfera (Biodieselbr, 2020). Devido a essa problemática, o biodiesel tem sido foco de muitas pesquisas desde a área agronômica até a industrial, pois além de ser uma fonte renovável de energia, é considerado um combustível ecológico, biodegradável, atóxico, livre de enxofre e compostos aromáticos. Desta forma, seu uso pode reduzir substancialmente as emissões de hidrocarbonetos e monóxidos de carbono, diminuindo a poluição ambiental (Pastori, 2010).

Todavia, a produção desse biocombustível deve levar em consideração a formação de glicerol, subproduto da reação, ele representa cerca de 10% da massa total resultante do processo e trata-se de um triol com alto ponto de ebulição e insolúvel em hidrocarbonetos (Mota et al., 2011). Segundo o Conselho Nacional de Política Energética (2019), em 2018 foram consumidos 5,9 bilhões de litros de biodiesel no Brasil, o que equivale a um excedente no mercado de 590 mil m^3/ano de glicerina. No mundo, a produção foi de 23,1 milhões de m^3, gerando uma produção de mais de 2 milhões de m^3 de glicerol (IGTPAN, 2020). No entanto, a glicerina de biodiesel apresenta restrições tecnológicas em decorrência da alta contaminação neste processo, e não pode ser repassada para setores como a indústria farmacêutica, alimentícias, entre outras (Pinheiro et al., 2010). Portanto, muitos pesquisadores vêm buscando alternativas para utilização deste resíduo, uma vez que o produto não pode ser descartado livremente ao meio ambiente.

Uma das principais alternativas para o aproveitamento da glicerina excedente do biodiesel é a sua transformação química em produtos de maior valor agregado e grande mercado consumidor, como o etanol, insumo utilizado em larga escala na indústria energética (Pinheiro et al., 2010). Utilizado mundialmente como combustível automotivo por possuir rápida e limpa combustão, quando comparado à gasolina (Silva, 2009).

A produção de etanol a partir da glicerina é feita via fermentação alcoólica, cujos parâmetros do modelo de crescimento celular podem ser estimados a partir de métodos numéricos e o sistema simulado através de softwares, visando sua utilização em escala industrial. A fermentação alcoólica compreende uma série de reações, nas quais são produzidos diferentes compostos através do consumo do substrato, além do crescimento celular. Assim, para que seja possível realizar um projeto de modelagem, é necessário determinar a forma como as concentrações destes componentes variam no tempo, como a taxa de produção de etanol e outros coprodutos, a taxa de consumo de substrato e a taxa de crescimento celular (Viegas, 2003). A modelagem da fermentação alcoólica descreve, a partir de equações matemáticas, a dinâmica do processo fermentativo. O uso de modelos permite, por meio de simulação, a análise das interações entre parâmetros e variáveis. Além disso, proporciona um melhor entendimento do processo, sendo útil para as etapas de otimização e controle da fermentação (Rivera et al., 2006). Neste contexto, o objetivo desta pesquisa foi estudar os fenômenos relacionados à produção de etanol usando glicerol como fonte de carbono em biorreator batelada.

MATERIAL E MÉTODOS

Determinação do modelo cinético de crescimento celular

Os dados experimentais utilizados nesse trabalho foram obtidos de pesquisas anteriores do grupo, a qual utilizou a bactéria gram-negativa *Escherichia coli* para realizar a fermentação alcoólica da glicerina sob as seguintes condições experimentais: 37°C, 200 rpm de agitação e concentração inicial de glicerina igual a 10,131 g/L.

Inicialmente, foi desenvolvido um algoritmo para determinar qual modelo cinético melhor se ajustaria aos dados experimentais. Para isto, foi utilizada a versão 9.9 (R2020b) do *software* iterativo MATLAB, termo derivado da abreviatura de *MATrix LABoratory* (Laboratório de Matrizes). Trata-se de um programa de computador especializado e otimizado para cálculos científicos e muito utilizado na engenharia, ele implementa a linguagem de programação de mesmo nome, juntamente com uma grande biblioteca de funções pré-definidas que tornam as tarefas de programação técnica mais fácil e eficientes (Farina; Posser, 1999).

O algoritmo foi desenvolvido em duas etapas, a primeira consistiu na validação de um modelo cinético a partir do método numérico de Levenberg-Marquardt, ele pertence ao grupo dos métodos Quasi-Newton e consiste em uma otimização de processo usando mínimos quadrados em sistemas não-lineares (Folch-Mallol et al., 2004). Esse método foi implementado ao algoritmo a partir da função pré-definida *lsqnonlin*, ela resolve problemas não lineares de mínimos quadrados com a seguinte forma:

$$\min\{\text{sum}[fun(X)^2]\} \quad \textbf{(1)}$$

Onde, X e os valores retornados pela função (fun podem ser vetores ou matrizes. A sintaxe geral é a seguinte:

$$X = \text{lsqnonlin}(fun, X_0, L_B, U_B, \text{options}, P_1, P_2) \quad \textbf{(2)}$$

Onde, X_0 é a matriz de inicialização, enquanto L_B e U_B são os limites inferiores e superiores, respectivamente, das variáveis desejadas.

Os modelos cinéticos analisados podem ser divididos em dois grupos: modelos livres de inibição e modelos que consideram inibição por substrato, células e/ou produto, eles foram apresentados a seguir (Badino e Cruz, 2012).

Modelos sem inibição

- **Modelo de Monod (1942):**

$$\mu = \mu_{máx} \frac{S}{S+Ks} \quad \textbf{(3)}$$

Onde, $\mu_{máx.}$ é a velocidade específica máxima de crescimento celular (h^{-1}), K_S é a constante de saturação (gL^{-1}) e S é a concentração de substrato.

O modelo de Monod serviu como base para outros modelos cinéticos de crescimento sem inibição, dentre os quais se destacam o de Moser (1958) e o de Contois (1959):

- **Modelo de Moser (1958):**

$$\mu = \mu_{máx} \left(\frac{s^n}{s^n+K}\right) \quad \textbf{(4)}$$

Onde, *n* é um parâmetro adimensional do modelo, o valor da potência determina o grau de inibição, no entanto, isso não indica concentração crítica de substrato ou constante de inibição (Dutta, 2015).

- **Modelo de Contois (1959):**

$$.\mu = \mu_{máx} \left(\frac{S}{SC_X+K}\right) \quad \textbf{(5)}$$

Onde, C_X é a concentração celular ($g.L^{-1}$).

Modelos com inibição

A velocidade específica de crescimento celular (μ) pode ser afetada por diversos fatores. Alguns modelos cinéticos consideram esses fatores como sendo a inibição pelo produto formado, pelo substrato limitante ou ainda a inibição celular, quando a concentração de células é elevada. Encontram-se ainda na literatura modelos de inibição mista que consideram dois ou mais inibidores (Veloso, 2019).

I. Inibição pelo substrato

- **Modelo de Andrews (1968):**

$$\mu = \mu_{máx} \left(\frac{S}{S+K_S+\left(\frac{S^2}{K_{IS}}\right)}\right) \quad \textbf{(6)}$$

Onde, K_{IS} trata-se da constante de inibição pelo substrato ($g.L^{-1}$).

Também chamado de "modelo de Monod com inibição pelo substrato", este é considerado o modelo mais aceito para descrever a inibição pelo substrato (Veloso, 2019).

II. Inibição pelo produto

- **Modelo de Aiba – Shoda – Nagatani (1968):**

$$\mu = \mu_{máx} \left(\frac{S}{S+K_S} * e^{(-K_P * C_P)}\right) \quad \textbf{(7)}$$

- **Modelo de Levenspiel (1980):**

$$\mu = \mu_{máx} \frac{S}{S+K_S} * \left(1 - \frac{C_P}{C_P^{máx}}\right)^n \quad \textbf{(8)}$$

Onde, n é um parâmetro adimensional do modelo e $C_P^{máx}$é a concentração crítica de produto a partir da qual cessa o crescimento celular (g.L^{-1}).

III. Inibição celular

- **Modelo de Lee – Pollard – Coulman (1983):**

$$\mu = \mu_{máx}\frac{S}{S+K_S} * \left(1-\frac{C_X}{C_X^{máx}}\right)^{m} \quad \textbf{(9)}$$

Onde, m é um parâmetro adimensional do modelo e $C_X^{máx}$é a concentração crítica de células a partir da qual cessa o crescimento celular (g.L^{-1}).

IV. Inibição mista

Conforme mencionado, alguns modelos consideram inibição mista envolvendo substrato/produto, produto/células, substrato/células e substrato/células/produto (Veloso, 2019). A seguir encontram-se exemplos os que foram utilizados nesse estudo.

Considera inibição pelo substrato e produto:

- **Andrews/Levenspiel (1980) :**

$$\mu = \mu_{máx}\frac{S}{S+K_S+\left(\frac{S^2}{K_{IS}}\right)} * \left(1-\frac{C_P}{C_P^{máx}}\right)^{n} \quad \textbf{(10)}$$

- **Ghose e Thyagi (1979):**

$$\mu = \mu_{máx}\frac{S}{S+K_S+\left(\frac{S^2}{K_I}\right)} * \left(1-\frac{C_P}{C_P^{máx}}\right) \quad \textbf{(11)}$$

- **Tosetto e Andrietta (2002):**

$$\mu = \mu_{máx}\frac{S}{S+K_S+\left(\frac{S^2}{K_I}\right)} * \left(1-\frac{C_P}{C_P^{máx}}\right)^{n} \quad \textbf{(12)}$$

Onde, K_S é a constante de saturação para o crescimento celular, K_I a constante de inibição do crescimento celular pelo substrato, $C_P^{máx}$ a concentração de produto onde cessa o crescimento do microrganismo e *n* a potência do temo de inibição pelo produto.

Considera inibição pelo produto e por células:

- **Levenspiel/Lee – Pollard – Coulman (1968):**

$$\mu = \mu máx\frac{S}{S+K_S} * \left(1-\frac{C_P}{C_P^{máx}}\right)^{n} * \left(1-\frac{C_X}{C_X^{máx}}\right)^{m} \quad \textbf{(13)}$$

Considera inibição pelo substrato, por células e pelo produto:

- **Andrews/LeePollard/Coulman/Levenspiel (1980):**

$$\mu = \mu máx\frac{S}{S+K_S+\left(\frac{S^2}{K_I}\right)} * \left(1-\frac{C_P}{C_P^{máx}}\right)^{n}\left(1-\frac{C_X}{C_X^{máx}}\right)^{m} \quad \textbf{(14)}$$

Contudo, para decidir qual modelo cinético melhor se ajusta aos dados experimentais da fermentação alcoólica da glicerina, foi realizada uma análise conforme a rotina computacional apresentada na Fig. 1. Onde, o algoritmo utilizou o método de Levenberg-Marquardt para estimar os valores ótimos dos parâmetros cinéticos e posteriormente plotar um gráfico de velocidade de biomassa *Vs*. Substrato contendo duas curvas, a primeira constituída pelos dados experimentais (*xdata* e *ydata*) e a segunda pelo modelo cinético.

```
clc; clear all
%% Dados Experimenais
xdata = [8.74 7.91 8.92 7.52 7.66...
8.02 7.36 7.62 6.51 6.25 7.17 7.02 2.70]; %S
ydata = [-0.83 0.09 -0.19 -0.63 0.25...
-0.15 -0.19 -0.42 -0.69 0.33 0.46 -0.09 -0.18]; %ΔS
zdata = [0 0 0 0 0.11 0.12 0.07 0.14...
0.09 0.13 0.13 0.78 0.88]; %P
tdata = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 24 48];
pdata = [xdata;zdata];
%% Função Objetivo (modelo cinético):

fun = @(x,pdata)(-0.05217.*(xdata./(x(1)+ xdata + ...
    ((xdata.^2)./x(2)))).*(1-(zdata./0.878339215)).^x(3))...
    - ydata; %modelo Tosseto e Andrieta

x0 = [0 0 0]; %Est. Inicial

%% Ajuste dos dados (LM):
options.Algorithm = 'levenberg-marquardt';
x = lsqnonlin(fun,x0,[],[],options)

%% Gráfico:
plot(xdata,ydata,'ko')
hold on
tlist = linspace(xdata(1),xdata(end));
plot(tlist,x(1)*exp(-x(3)*tlist),'b-')
xlabel Substrato
ylabel Vel.biomassa
title('Vel.biomassa X Substrato')
legend('Data','model')
hold off
```

Figura 1. Algoritmo utilizado para determinar o modelo cinético de crescimento celular que apresenta melhor ajuste aos dados experimentais.

Estimativa dos Parâmetros cinéticos e simulação do Biorreator

Após determinar o modelo cinético de crescimento celular que possui melhor ajuste aos dados experimentais, foi desenvolvido um algoritmo, onde os dados experimentais e o modelo escolhido foram utilizados para análise no biorreator. Ele é constituído por um programa principal, conforme visto na Fig. 2, contendo os dados experimentais e dois subprogramas, além do algoritmo para o plote do gráfico de conversão.

```
clc; clear all; close all; format long

%% Programa Principal

% Concentração de Glicerol:10.131 g/L

%% Dados Experimentais

xdata = [8.74 7.91 8.92 7.52 7.66...
8.02 7.36 7.62 6.51 6.25 7.17 7.02 2.70]; %S
ydata = [-0.83 0.09 -0.19 -0.63 0.25...
-0.15 -0.19 -0.42 -0.69 0.33 0.46 -0.09 -0.18]; %δS
zdata = [0 0 0 0 0.11 0.12 0.07 0.14...
0.09 0.13 0.13 0.78 0.88]; %P
tdata = [0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 24 48];
pdata = [xdata;zdata];
x0 = [0 0 0]; %Est. Inicial

%% Subprogama do Levenberg-Marquardt
par = Batelada(xdata,ydata,zdata,tdata,pdata,x0);

%% Subprograma do Biorreator
CO = conv(par,xdata,zdata);

%% Gráfico
plot(tdata,CO,'kO')
hold on
tlist = linspace(tdata(1),tdata(end));
plot(tdata,CO,'B-')
xlabel Tempo(h)
ylabel Conversão(g/L)
title('CONVERSÃO (g/L)  X  TEMPO (h)')
legend('pontos experimentais','Tossetto&Andrietta model')
hold off
```

Figura 2. Programa principal.

O primeiro subprograma desenvolvido, apresentado na Fig. 3, consiste na função batelada, a qual estimou os parâmetros cinéticos ótimos do modelo escolhido a partir do método numérico de Levenberg-Marquardt, ele foi adicionado ao algoritmo através da função pré-programada *lsqnonlin*.

```
function x = Batelada(xdata,ydata,zdata,tdata,pdata,x0)

%% Modelo cinético:

fun = @(x,pdata)0.46.*((xdata)./(x(1)+...
    xdata +((xdata.^2)./x(2)))).*(1-(zdata./0.88))...
    .^x(3)- ydata; % Modelo de Tosetto e Andrietta

%% Otimização do processo(Levenberg-Marquardt):
options.Algorithm = 'levenberg-marquardt';

x = lsqnonlin(fun,x0,[],[],options)
```

Figura 3. Primeiro subprograma, utilizado para estimar os valores ótimos do modelo cinético que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Este estudo considerou a configuração de reator em batelada para simular o crescimento do microrganismo. Nesse contexto, o segundo subprograma realizou o cálculo da lei de velocidade, utilizando os parâmetros estimados na otimização representada na Fig. 3 e em seguida, calculou a conversão a partir do balanço de massa no reator. Conforme o algoritmo apresentado na Fig. 4.

```
function dxdt = conv(x,xdata,zdata)

%% Cálculo da lei de velocidade
% (Usando parâmetros estimados na otimização)

Ra = 0.45802.*((xdata)./(x(1)+ xdata +...
    ((xdata.^2)./x(2)))).*(1-(zdata....
    /0.878339215)).^x(3); % Tosetto e Andrietta

fprintf('Valor de Ra: %f\n',Ra)

%% Cálculo da conversão

dxdt = -(Ra./xdata);

fprintf('Valor de X: %f\n',dxdt)
```

Figura 4. Subprograma usado para o cálculo das leis de velocidade, utilizando os parâmetros estimados na otimização e para o cálculo da conversão a partir do balanço de massa no biorreator em batelada.

A equação de projeto utilizada na simulação foi algebricamente manipulada para simplificar os cálculos e a escrita do subprograma do biorreator, ela está apresentada na Eq. (15).

$$dxdt = \frac{-Ra}{C_{a0}} \qquad \textbf{(15)}$$

Onde, Ra é a lei de velocidade e C_{a0} a concentração inicial de substrato.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Modelo cinético

Após a análise dos modelos cinéticas de crescimento celular apresentados no item 2.2, constatou-se que o de Tosetto e Andrietta (2002), representado na Eq. (12), teve melhor ajuste aos dados experimentais. Trata-se de um dos modelos mais utilizados na fermentação alcoólica, assim como o de Ghose e Thyagi (1979), pois consideram algumas características como o efeito do substrato limitante (Monod), inibição pelo substrato (exponencial) e inibição pelo produto (linear) (Guidini, 2013). A seguir, temos o plote do gráfico de Velocidade de Biomassa *Vs*. Substrato.

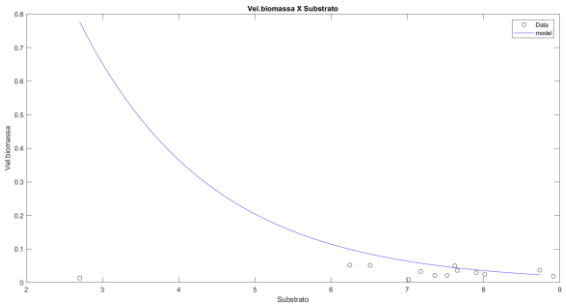


Figura 5. Ajuste dos dados experimentais ao Modelo cinético de Tosetto e Andrietta (2002).

Estimativa de Parâmetros Cinéticos

Os valores ótimos dos parâmetros cinéticos de Tosetto e Andrietta (2002), estimados a partir dos algoritmos apresentados nas Fig. 2 e 3, foram expostos na Tab. 2.

Tabela 2. Valores ótimos dos parâmetros cinéticos estimados a partir do método de Levenber-Marquardt.

Conc. Glicerol (g/L)	K_S (g/L)	k_I (g/L)	n
10,131	4.0211	3.0529	15.196

Cálculos da lei de velocidade

Utilizando os parâmetros estimados na otimização, a lei de velocidade de crescimento celular foi calculada através dos algoritmos apresentados nas Fig. 2, 3 e 4 para cada intervalo de tempo. Conforme apresentada na Tab. 3.

Tabela 3. Estimativa da Lei de velocidade de crescimento celular para cada intervalo de tempo.

Tempo (h)	μ (h^{-1})
0	0,326
1	0,424
2	0,311
3	0,492
4	0,063
5	0,043
6	0,138
7	0,035
8	0,150
9	0,090
10	0,052
24	0,000
48	0,000

Conversão

Posteriormente, calculou-se a conversão a partir do balanço de massa no reator em batelada, através dos algoritmos apresentados nas Fig. 2, 3 e 4. Os valores obtidos estão expostos graficamente abaixo.

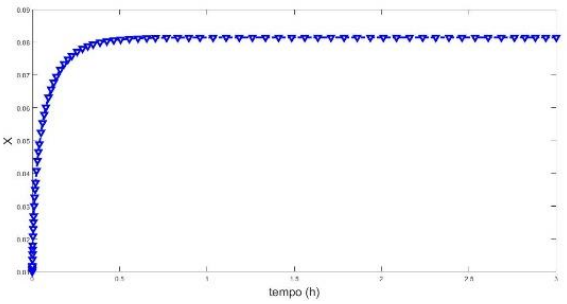


Figura 6. Conversão de biomassa ao longo do tempo para um reator em Batelada.

CONCLUSÃO

Contudo, sob 37°C e concentração inicial de glicerina igual a 10,131 g/L, pôde-se concluir através dos resultados obtidos que o modelo cinético de crescimento celular de Tosetto e Andrietta (2002) representou melhor o comportamento do microrganismo utilizado, *Escherichia coli*, uma vez que houve uma boa correlação entre os valores experimentais e os estimados através do software. Sobre os parâmetros cinéticos obtidos para esse modelo, foi observado que a constante de inibição pelo substrato (K_I), a constante de saturação para o crescimento celular (K_S) e a potência do temo de inibição pelo produto (n), foram 4,0211 g/L, 3,0529 g/L e 15,1965 respectivamente. Ademais, também é possível observar que a produção máxima de etanol foi de 0,065491 g/L para um reator batelada.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional do Petróleo, ANP. Gás Natural e Biocombustíveis, **Resolução n°45 de 25 de agosto de 2014 (seção II, artigo 2°)**. Rio de Janeiro: ANP, 2014. Disponível em: https://atosoficiais.com.br/anp/resolu cao-n-45-2014?origin=instituicao&q=45/2014. Acesso em: 05 fev. 2021;

Agência Nacional do Petróleo, ANP. **Gás Natural e Biocombustíveis**, Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Rio de Janeiro: ANP, 2019. Disponível em: http: //www.anp.gov.br/arquivos/central-conteudos/anuario-estatistico/2019/2019-anuario-versao-impressao.pdf. Acesso em: 5 fev. 2021.

BADINO, A. C.; CRUZ, A. J. G. **Reatores Químicos e Bioquímicos**. Coleção UAB-UFSCar, São Carlos, 2012.

BENATTI, A; RIBEIRO, M. **O Método de Levenberg-Marquardt para o Problema de Quadrados Mínimos não Linear**. 2017. 108 p. Dissertação (Mestrado em matemática) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba -PR, 2017.

BIODIESELBR **Glicerina, o tamanho do problema** – Ano 1, nº3 – Fev/Mar – 2008.

BRASIL. Conselho Nacional de Política Energética, CNPE. **Resolução n° 05, de 15 de março de 2018**. Estabelece as metas compulsórias anuais de redução de emissões de gases causadores do efeito estufa para a comercialização de combustíveis. Disponível em: https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=360873. Acesso em: 15 jan. 2021.

CARNEIRO, L; BOVOLINI, A. **Modelagem matemática do processo de fermentação alcoólica em batelada com alta densidade celular: Efeito da concentração de substrato, células e temperatura nos parâmetros cinéticos**. 2020. 50 f. trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Química) - Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

DUTTA, S. **Optimization in Chemical Engineering**. 1 ed. Índia: Cambridge University Press, 2016. p. 500-520.

FARINA M. A.; POSSER M. S. **MATLAB Ferramenta matemática para Engenharia**. [s.l.] , [s.d.]. Disponível em:

http://www2.peq.coppe.ufrj.br/Pessoal/Professores/Arge/COQ897/Matlab/apostila_curso_matlab.pdf. Acesso em: 26 ago. 2021.

FOLCH-MALLOL, J. *et al*. La respuesta an estrés en la levadura saccharomyces cerevisiae. **Revista Latinoamericana De Microbiología**, México, v. 46, p. 24–46, 2004. Disponível em: https: //www .medigraphic.com/pdfs/lamicro/mi-2004/mi04-1_2d .pdf. Acesso em: 20 mar. 2021.

GUIDINI, Carla Zanella. **Fermentação alcoólica em batelada alimenta empregando Saccharomyces cerevisiae de características floculantes**. 2013. 148 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - Mg, 2013. Cap. 3.

HIMMELBLAU, D. M; EDGAR, T. F. **Optimization of Chemical Process**. Pensilvânia, 2 ed. Editora McGraw-Hill chemical engineering series, 2001.

DUTTA, K.; MAHANTY, B.; DASU V. V.; PRABHU, A. **Substrate Inhibition Growth Kinetics for Cutinase Producing**, *Chem. Biochem. Eng. Q.*, 29 (3) 437–445 (2015).

MORCELLI, A.; RECH, R.; KLAFKE, A.; PELEGRINI, R.; AYUB, M. A. Z. Culturas exponenciais em lote alimentado de *Klebsiella pneumoniae* sob anaerobiose usando glicerol bruto como substrato para obter bioprodutos de valor agregado. **J. Braz. Chem. Soc.** Rio Grande do Sul, v. 29, n. 11, p. 2278-2286, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.21577/0103-5053.20180104. Acesso em: 1 mai. 2021.

MOTA, C. J. A. *et al*. Gliceroquímica: novos produtos e processos a partir da glicerina de produção de biodiesel. **Quim. Nova**. Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, p. 639-648, 2009. Disponível em: https://www.scielo .br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422009000300008. Acesso em: 29 maio 2021.

PASTORI, A. **Glicerina, resíduo da produção de biodiesel na terminação de novilhas da raça nelore**. [s.l.], 2010. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/95259/daurea_ap_me_jabo.pdf?sequence=1. Acesso em: 26 ago. 2021.

PIAZZI, A. **Construção de modelos matemáticos para processos fermentativos – avaliação de efeitos das condições de cultivo**. 2019. 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2019.

RIVERA, E. C.; YAMAKAWA, C. K.; SAAD, M. B. W.; et al. **Effect of temperature on sugarcane ethanol fermentation: Kinetic modeling and validation under very-high-gravity fermentation conditions**. Biochemical Engineering Journal, v. 119, p. 42–51, 2017.

Schimidell, W. **Biotecnologia industrial**. Editora Blucher, 2001. 9788521215189. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521215189/. Acesso em: 26 ago. 2021.

SCHMIDELL, W. *et al*. **Biotecnologia industrial**. v. 2 ed. 1 São Paulo – SP: Blucher, 2001. 2010 p. Disponível em: https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521215189/. Acesso em: 30 abr. 2021.

VELOSO I. I. K. **Modelagem e otimização da fermentação alcoólica em batelada alimentada a baixa temperatura**. Departamento de engenharia Química, dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de São Carlos – SP, 201.

VIEGAS, M. C. **Otimização de sistema de fermentação alcoólica contínua utilizando reatores tipo torre e leveduras com características floculantes**. 2003. 150 p. tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, 2003.

ZOREL, J. A. **Avaliação da fermentação de glicerol por enterobacter sp. para a produção de hidrogênio e etanol**. 2019. 139 p. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2019.