

Eixo Temático ET 06-003 - Poluição Ambiental

REATOR BIOLÓGICO CONTÍNUO COM RECICLO INTERNO DE BIOMASSAAna Alice Quintans de Araujo¹, Augusto Ponciano Barbosa da Silva²,
Laís Montenegro Teixeira², Lucas dos Santos Sousa², Fernando Fernandes Vieira³,
Rui de Oliveira³¹Engenheira Civil, Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental - UEPB.²Engenheiro Sanitarista e Ambiental - UEPB.³Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - UEPB.**RESUMO**

O processo biológico tem como características: forma de operação (batelada, contínuo, batelada alimentada e semi-contínuo), tipo de cultivo (submerso e semi-sólido) e forma de cultivo (em suspensão, imobilizado, com reciclo celular) que interferem na relação população microbiana e tipo de processo. O estudo destes reatores envolve o balanço de massa das diferentes espécies químicas e biológicas presentes e a observação de aspectos importantes como a transferência de oxigênio, agitação e mistura, manutenção das condições de esterilidade e a manutenção da produtividade adequada. Os reatores contínuos, foco deste trabalho, funcionam com adição do meio de cultura e remoção do caldo fermentado a vazões constantes, mantendo constante o volume de fermentação. A modelagem matemática de processos biológicos é a tentativa de representar, através de equações matemáticas, os balanços de massa para cada componente no biorreator, associados às complexas transformações bioquímicas que ocorrem no processo e às velocidades com que essas transformações se processam. Diante do exposto, o presente trabalho objetiva reproduzir as condições analisadas por Rodrigues *et al.*, (2006) na observação de um biorreator com reciclo interno de biomassa, para análise dos perfis das concentrações de células, substrato, da conversão de substrato, das velocidades de crescimento não-específica e específica, e da produtividade celular, produtividade do produto e velocidades de produção não específica e específica.

Palavras-chave: Biorreatores; Modelagem matemática; Biorreator contínuo.**INTRODUÇÃO**

A degradação dos poluentes presentes nos reatores é realizada por processos biológicos, que somente são possíveis a partir do seu consumo como substratos pelos microrganismos, a fim de produzir novas células e energia. Logo, reações químicas são promovidas por células vivas, ou seja, microbianas, animais ou vegetais, nos reatores, que por este motivo são denominados de biorreatores, reatores bioquímicos, reatores biológicos, ou fermentadores. Segundo Schmidell et al. (2001), os biorreatores podem ser classificados de acordo com sua operação em: descontínuo, descontínuo alimentado, semi-contínuo ou contínuo.

Os reatores contínuos funcionam com a adição do meio de cultura no fluxo contínuo de líquido que entra no biorreator e remoção de caldo fermentado a vazões constantes, mantendo constante o volume de fermentação, seja por remoção do líquido por transbordamento ou através de bombas de alta vazão, tendo como digestores mais comuns os que funcionam por pistão ou por fluxo horizontal. Esse processo é amplamente utilizado em processos que envolvem baixa assepsia, como fermentação alcoólica e tratamento de resíduos. A fim de iniciar um novo período de alimentação e aumentar a eficiência deste processo é possível realizar, em reatores deste tipo, a reinserção de biomassa tornando o reator em um biorreator contínuo com reciclo interno.

O modo de funcionamento de um biorreator é bastante flexível objetivando a otimização da operação de um dado sistema biológico. Entretanto, o projeto e a análise de biorreatores estão limitados à disponibilidade de informações dos fenômenos de transporte e cinéticos, e a possibilidade de resolução do modelo resultante. Desta forma, mesmo com todo o desenvolvimento atualmente existente nesta área, sistemas muito complexos devem ser simplificados através de hipóteses coerentes com a realidade para, então, serem resolvidos e aplicados na construção e/ou otimização de sistemas biológicos.

OBJETIVO

Reproduzir as condições analisadas por Rodrigues et al. (2006) na observação de um biorreator com reciclo interno de biomassa, para análise dos perfis das concentrações de células, substrato, da conversão de substrato, das velocidades de crescimento não-específica e específica, e da produtividade celular, produtividade do produto e velocidades de produção não específica e específica. Além de ratificar a importância da modelagem como ferramenta de desenvolvimento tecnológico para processos biológicos, bem como prever o comportamento dinâmico e estacionário do processo para biorreatores contínuos com reciclo interno de biomassa.

METODOLOGIA

Rodrigues et al (2016), apresentam o esquema de um biorreator operando de modo contínuo com o reciclo interno de biomassa, admitindo que o biorreator possua volume constante e seja isotérmico com vazão de alimentação constante (Figura 2). A retenção interna da biomassa pode ocorrer devido à presença de um elemento filtrante, sendo neste caso o biorreator perfeitamente agitado, ou seja, a composição interna é homogênea. Caso a retenção ocorra por sedimentação da biomassa na parte superior do biorreator deve-se considerar nas equações de balanço apenas o volume da zona de reação.

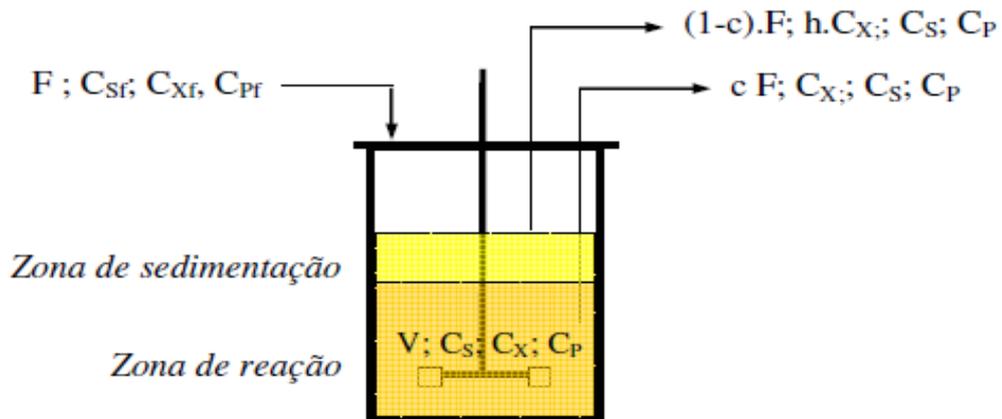


Figura 2. Biorreator contínuo com reciclo interno de biomassa através de filtro de sedimentação. Fonte: Rodrigues *et al.* (2016) (F : vazão volumétrica de alimentação (L/h), V : volume de meio no biorreator (L), t : tempo do processo (h), C_x : concentração de biomassa (g-X/L), C_{xf} : concentração de biomassa na vazão de alimentação (g-X/L), C_s : concentração de substrato limitante (g-S/L), C_{sf} : concentração de substrato limitante na vazão de alimentação (g-S/L), C_p : concentração de produto genérico (g-P/L), C_{pf} : concentração de produto genérico na

vazão de alimentação (g-P/L), c : fração do líquido efluente removida diretamente do biorreator
h: fator de diluição da concentração celular obtido no líquido filtrado).

Encontrando os balanços materiais de biomassa, substrato e produto sem levar em conta a taxa de manutenção celular

Para a realização do estudo do biorreator contínuo com reciclo interno de biomassa, inicialmente foram obtidos os balanços materiais de biomassa, substrato e produto para o reator. De modo geral, um balanço material é dado por:

$$\text{Acúmulo} = (\text{Entrada} + \text{Formação}) - (\text{Saída} + \text{Consumo})$$

- **Balanço material para a biomassa:**

Seguindo o entendimento do balanço material, considerando o consumo igual a zero, obtemos a seguinte equação:

$$\frac{d(C_x \cdot V)}{dt} = (F \cdot C_{xf} + v_x \cdot V) - [(1 - c) \cdot F \cdot h \cdot C_x + c \cdot F \cdot C_x] \quad (1)$$

Admitindo a concentração de biomassa na vazão de alimentação desprezível ($C_{xf} = 0$) em relação à biomassa que entra no biorreator devido à recirculação, sabendo que v_x (velocidade de crescimento de biomassa) pode ser expresso por $\mu_x \cdot C_x$ (velocidade específica * concentração de biomassa) e que $\frac{F}{V} = D$, tem-se:

$$\frac{d(C_x)}{dt} = \{\mu - D \cdot [c + h \cdot (1 - c)]\} \cdot C_x \quad (2)$$

Sabendo que $A = (1 - c) \cdot h + c$, obtém a seguinte equação:

$$\frac{d(C_x)}{dt} = (\mu - D \cdot A) C_x \quad (3)$$

Para estado estacionário, onde $\frac{d(C_x)}{dt} = 0$, temos:

$$\mu = \mu_x = A \cdot D \quad (4)$$

- **Balanço material para o substrato:**

Sabendo que no balanço material para substrato a formação é zero, então, podemos expressá-lo da seguinte forma:

$$\frac{d(C_s \cdot V)}{dt} = F \cdot C_{sf} - [(1 - c) \cdot F \cdot C_s + c \cdot F \cdot C_s + v_s \cdot V] \quad (5)$$

Sabendo que $v_s = \mu_s \cdot C_x$, que $\mu_s = \frac{\mu_x}{Y_{x/s}}$, onde $Y_{x/s}$ é o fator de conversão de substrato a biomassa, e admitindo o estado estacionário onde $\frac{d(C_s \cdot V)}{dt} = 0$, tem-se:

$$C_x = \frac{(C_{sf} - C_s) \cdot Y_{x/s}}{A} \quad (6)$$

Admitimos como válido o modelo cinético proposto por Monod cuja expressão é dada por:

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{C_s}{k_s + C_s} \quad (7)$$

A partir do balanço para biomassa (Equação 4) e da equação do modelo de crescimento celular (Equação 7), pode-se igualar ambas as equações, a fim de obter-se a concentração do substrato, dado pela Eq. 9:

$$\mu = A.D = \mu_{max} \cdot \frac{C_s}{K_s + C_s} \quad (8)$$

$$C_s = \left(\frac{k_s \cdot A \cdot D}{\mu_{max} - A \cdot D} \right) \quad (9)$$

- **Balanço material para o produto:**

Para o produto, não se tem o consumo, logo, tem-se o seguinte balanço:

$$\frac{d(C_p \cdot V)}{dt} = F \cdot C_{pf} + V \cdot \mu_p \cdot C_x - [(1 - c) \cdot F \cdot C_p + c \cdot F \cdot C_s] \quad (10)$$

Analogamente aos outros balanços, admitindo-se regime estacionário, tem-se:

$$C_p = C_{pf} + \frac{\mu_p \cdot C_x}{D} \quad (11)$$

- **Produção:**

A partir das equações da produtividade e produção (Equações 12 e 13) e utilizando o balanço da biomassa, temos:

$$Pr_p = D \cdot (C_p - C_{pf}) = \mu_p \cdot C_x = A \cdot D \cdot C_x \quad (12)$$

$$Prod_p = Pr_p \cdot V = F(C_p - C_{pf}) = A \cdot F \cdot C_x \quad (13)$$

Partindo dos modelos cinéticos de formação de produto associado ao crescimento (Eq. 14), não associado ao crescimento (Eq. 15) e associado parcialmente ao crescimento (Eq. 16):

$$\mu_p = \alpha \cdot \mu \quad (14)$$

$$\mu_p = \beta \quad (15)$$

$$\mu_p = \alpha \cdot \mu + \beta \quad (16)$$

E admitindo $C_{pf} = 0$, obtém-se as cinéticas de produção para cada caso particular associando cada modelo as Equações (11) e (12):

- **Cinética de produção associada ao crescimento:**

$$C_p = \alpha \cdot A \cdot D \cdot C_x \quad (17)$$

$$Pr_p = \alpha \cdot A \cdot D \cdot C_x \quad (18)$$

- **Cinética de produção não associada ao crescimento:**

$$C_p = \frac{\beta \cdot C_x}{D} \quad (19)$$

$$Pr_p = \beta \cdot C_x \quad (20)$$

- **Cinética de produção parcialmente associada ao crescimento:**

$$C_p = \frac{(\alpha.A.D + \beta).C_x}{D} \quad (21)$$

$$Pr_p = (\alpha.A.D + \beta).C_x \quad (22)$$

Balancos materiais de biomassa, substrato e produto admitindo como válido o modelo de crescimento celular proposto por Monod com consumo de substrato devido à manutenção das células e decaimento da biomassa

Quando há a consideração do consumo do substrato devido à manutenção das células com o decaimento da biomassa celular devido ao metabolismo endógeno ou lise celular, o modelo proposto por Monod, agora, leva em consideração a constante de decaimento. Partindo do balanço material para biomassa com a existência de decaimento, onde agora o $\mu_x = \mu - k_d$ e admitindo $C_{xf} = 0$, tem-se:

$$\frac{d(C_x)}{dt} = C_x \cdot [\mu_x - D.A] \quad (23)$$

Onde Kd representa a existência de decaimento. Para regime permanente, tem-se:

$$\mu = A.D + Kd \quad (24)$$

Partindo da Equação (24) e do modelo proposto por Monod para obtenção da concentração do substrato, tem-se:

$$C_s = \frac{K_s.(A.D + Kd)}{\mu_{\max} - (A.D + Kd)} \quad (25)$$

O balanço material para substrato com a existência de manutenção das células (m_s) pode ser expresso pela equação:

$$\frac{DC_s}{dt} = D.(C_{sf} - C_s) - \mu_x.C_x \cdot \frac{1}{Y_{X/S}} - m_s.C_x \quad (26)$$

Para regime estacionário:

$$D.(C_{sf} - C_s) = \mu_x.C_x \cdot \frac{1}{Y_{X/S}} + m_s.C_x \quad (27)$$

Considerando $Y_{X/S} = Y_G$, onde Y_G é o fator de conversão específico, temos:

$$D.(C_{sf} - C_s) = \mu.C_x \cdot \frac{1}{Y_G} + m_s.C_x \quad (28)$$

Substituindo o modelo proposto por Monod na Equação (28), obtém a concentração da biomassa:

$$C_x = \frac{D.(C_{sf} - C_s).Y_G}{(A.D + Kd) + Y_G.m_s} \quad (29)$$

• **Produção com o consumo de substrato:**

Substituindo a concentração da biomassa, encontrada na Eq. (29), na expressão da produtividade e produção de biomassa do processo, tem-se:

$$Pr_p = A.D.C_x = A.D \cdot \frac{D.(C_{sf} - C_s).Y_G}{(A.D + Kd) + Y_G.m_s} \quad (30)$$

$$Prod_p = A.F.C_x = A.F \cdot \frac{D.(C_{sf} - C_s).Y_G}{(A.D + Kd) + Y_G.m_s} \quad (31)$$

A partir dos modelos cinéticos de formação do produto substituídos nas equações de balanço e de produtividade e admitindo $C_{pf} = 0$, obteve-se:

- **Cinética de produção associada ao crescimento com a existência de decaimento:**

$$C_p = \frac{(\alpha \cdot \mu) \cdot C_x}{D} = \frac{\alpha \cdot (A \cdot D + Kd) \cdot C_x}{D} \quad (32)$$

$$Pr_p = \alpha \cdot (A \cdot D + Kd) \cdot C_x \quad (33)$$

- **Cinética de produção não associada ao crescimento:**

$$C_p = \frac{\beta \cdot C_x}{D} \quad (34)$$

$$Pr_p = \beta \cdot C_x \quad (35)$$

- **Cinética de produção parcialmente associada ao crescimento com a existência de decaimento:**

$$C_p = \frac{\alpha \cdot [(A \cdot D + Kd) + \beta] \cdot C_x}{D} \quad (36)$$

$$Pr_p = \alpha \cdot [(A \cdot D + Kd) + \beta] \cdot C_x \quad (37)$$

Resultados e discussão

Para a construção dos gráficos que representem os perfis de C_X , C_S , C_P , X_S , v_X , μ_X , v_P , μ_P , Pr_X e Pr_P foi levado algumas considerações referentes às variáveis de estado, mostradas na Tabela 1.

Tabela 1. Dados relacionados às variáveis de estado do biorreator.

$\mu_{\text{máx}}$	K_S	$Y_{X/S}$	C_{XF}	C_{SF}	C_{PF}	V	α	β	$D(Pr_{X\text{máx}})$	$Pr_{X\text{máx}}$	kd	ms
$0,5 \text{ h}^{-1}$	0,1 g/L	0,5	0 g/L	10 g/L	0 g/L	5 L	1,6	0,2 h^{-1}	$0,45 \text{ h}^{-1}$	2 g/L.h	0,03 h^{-1}	0,03 h^{-1}

Admitindo como válido o modelo de crescimento celular proposto por Monod com consumo de substrato sem considerar a manutenção das células e o decaimento da biomassa

O resultado das variáveis consideradas na Tabela 1 são representadas na Figura 3 sendo aplicadas nas equações obtidas através dos balanços já realizados.

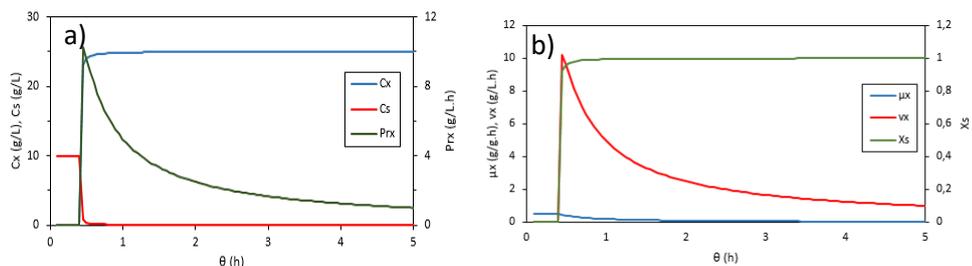


Figura 3- Perfis das concentrações de células, de substrato e da produtividade celular, da conversão de substrato e das velocidades de crescimento não-específica e específica. Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

Na Figura 3-a é possível observar que a concentração de substrato e de biomassa são inversamente proporcionais, indicando que para a formação de biomassa é necessário que haja o consumo de substrato. Este fato é corroborado devido a conversão do substrato às células, na qual tem-se uma totalidade da quantidade de células formadas a partir do consumo de certa quantidade de substrato (Figura 3-b). Pode-se constatar também que a produtividade inicialmente é bem elevada, pois como ainda se encontra grande quantidade de substrato

presente no meio, os microrganismos se alimentam e conseguem manter-se em grande atividade.

Pela Figura 3-b também é possível observar que a velocidade específica de crescimento celular (μ_x) decai à medida que aumenta o Tempo de Detenção Hidráulica (θ) do biorreator. Isso se deve ao fato de que, quando $D = \mu$, tem-se que o crescimento de biomassa no biorreator está no limite da quantidade perdida na vazão de saída, diferentemente da velocidade de crescimento (v_x) que tem uma rápida ascensão no momento que θ tem uma produtividade máxima. O produto é formado durante o crescimento, sendo somente proporcional a velocidade de crescimento, assim a Figura 4 trata do comportamento da cinética quando a produção é associada ao crescimento celular.

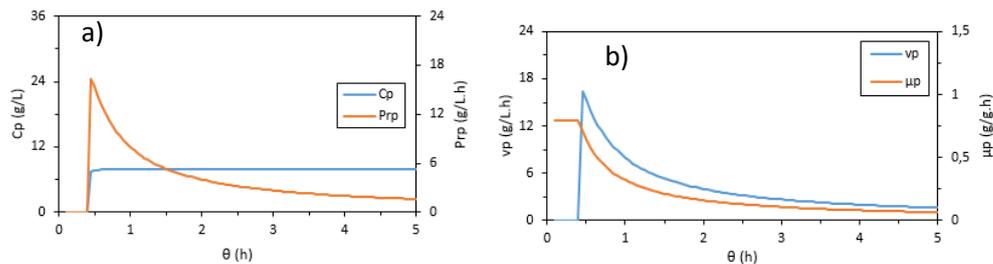


Figura 4- a) Perfis das concentrações de produto e da produtividade celular associada ao crescimento celular; b) Perfis das velocidades de crescimento não-específica e específica, associadas ao crescimento celular. Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

A concentração de produto é quase inalterada à medida que o tempo de residência acresce, podendo ser justificado de acordo com a Figura 3, pois sabe-se que a concentração de produto está diretamente influenciada pela concentração de biomassa. Pode-se observar que produtividade é influenciada pela concentração do produto.

O segundo caso, consiste no produto formado somente após o crescimento, dessa forma, está explícito na Figura 5 os perfis que apresentam uma cinética quando a produção não está associada ao crescimento celular.

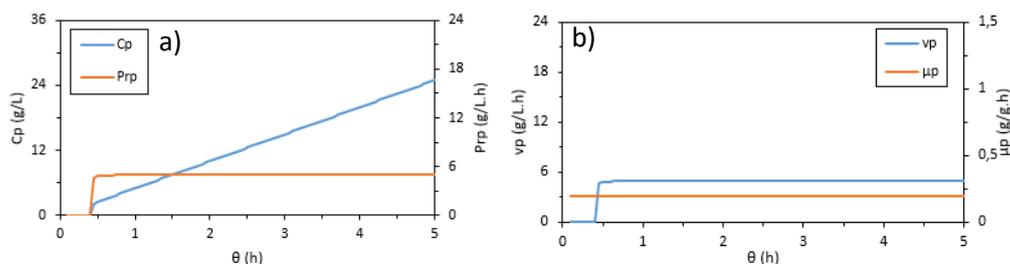


Figura 5- a) Perfis das concentrações de produto e da produtividade celular não-associada ao crescimento celular; b) Perfis das velocidades de crescimento não-específica e específica, não-associada ao crescimento celular. Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2016).

É possível notar que a produtividade se mantém constante, enquanto a concentração do produto cresce linearmente, pois estará havendo mais produtos sendo formados, logo após o crescimento celular. A velocidade específica de produto também permanece constante, e ainda é possível notar que, a velocidade de produto é proporcional à sua produtividade. O último caso, é quando o produto é formado parte antes e parte depois do crescimento. A Figura 6 apresenta os perfis das concentrações de produto, das velocidades de crescimento não-específica e específica, e da produtividade celular quando a produção é parcialmente associada ao crescimento.

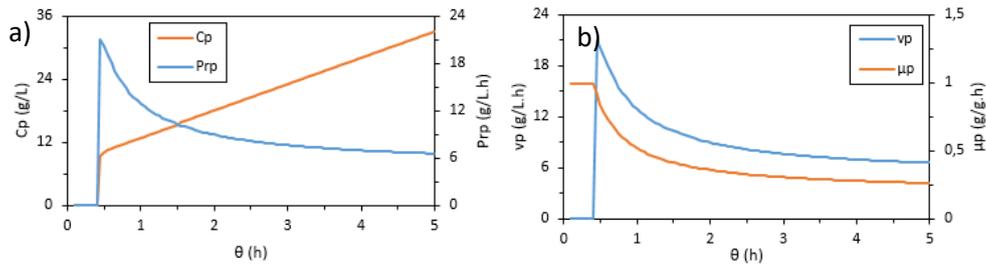


Figura 6- Perfis das concentrações de produto e da produtividade celular parcialmente associada ao crescimento celular, velocidades de crescimento não-específica e específica, parcialmente associada ao crescimento celular. Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

A curva da concentração de produto (C_p) é semelhante ao do processo não associado ao crescimento, e em relação ao comportamento da produtividade há similaridade com o processo associado ao crescimento, ambos justificados anteriormente. Com os perfis de concentrações gerados, foi possível avaliar a influência de alguns parâmetros nas concentrações de biomassa, substrato e produto. A Figura 7-a mostra que o aumento da velocidade específica de formação celular (μ_{max}) irá resultar em um crescimento mais acelerado da concentração de biomassa, mas à medida que aumenta o tempo de residência no biorreator, as concentrações, mesmo com μ_{max} distintos, tenderão a permanecer constante com o mesmo valor.

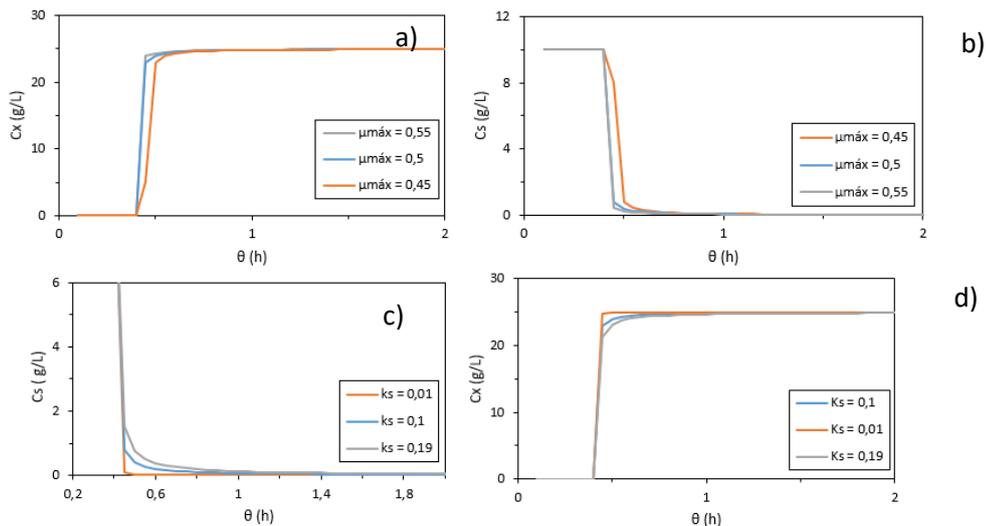


Figura 7. Influência do μ_{max} (a) e k_s (d) nas concentrações de biomassa; Influência do μ_{max} (b) e k_s (c) nas concentrações de substrato. Fonte: Autor (2019).

Nota-se pela Figura 7-b que para o substrato ocorre o mesmo princípio, mas de forma contrária, havendo o consumo mais rápido de substrato com um maior valor de μ_{max} , em que, posteriormente, apresenta mesmo comportamento. O comportamento das concentrações de substrato com a variação da constante cinética k_s está representado na Figura 7-c. Com a análise dos dados foi possível perceber que a concentração do substrato se apresenta ligeiramente maior quanto maior for o valor de k_s . De forma análoga, quanto maior for o valor da constante de saturação, menor será a concentração de biomassa, no instante inicial (Figura 7-d). Isso implica dizer que a elevação do valor de k_s pode afetar na formação de biomassa, corroborando com a sua definição. Sabe-se que as concentrações dos produtos são influenciadas pelos parâmetros α e β , e a variação dos mesmos, pode trazer configurações diferentes ao perfil de concentração do produto. Desse modo, a Figura 8 mostra o comportamento com essas variações.

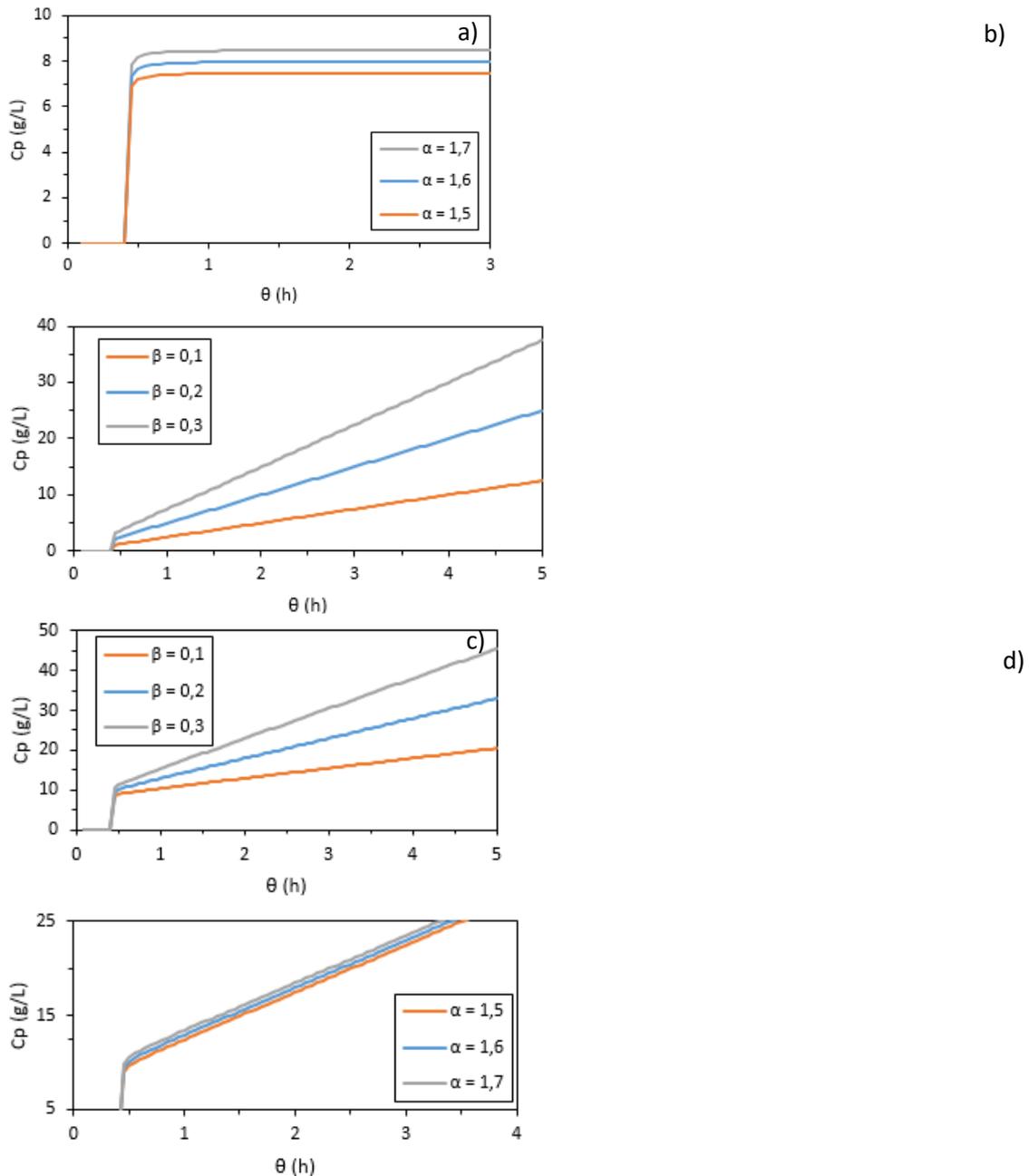


Figura 8. Influência das constantes α e β nos perfis das conc. de produto. a) Associada b) Não-associada c) parcialmente associada ao crescimento celular ($\alpha=1,6$) d) parcialmente associada ao cresc. celular ($\beta=0,2$). Fonte: Autor (2019).

Pode-se perceber que, quando associada ao crescimento celular, o aumento do valor de α irá ocasionar um aumento da concentração do produto no início do processo, mantendo-se praticamente constante após um determinado tempo de detenção. Com relação à formação de produto não associada ao crescimento, nota-se que tem uma maior concentração ao elevar o valor de β , isso porque depende exclusivamente da concentração presente no biorreator.

Quando se fixa o α e varia-se o β , percebe-se que há um aumento nas concentrações de produto inicial, quanto maior for o valor de β . De modo contrário, a concentração inicial do produto quando fixa β e varia α , não apresenta uma grande variação, porém segue a mesma proporção do caso anterior. O aumento de α irá ocasionar uma maior concentração. Desse

modo, é possível notar que a variação de β influencia mais na concentração do produto, visto que, α tende a acompanhar o crescimento celular.

Admitindo como válido o modelo de crescimento celular proposto por Monod com consumo de substrato devido à manutenção das células e decaimento da biomassa devido ao metabolismo endógeno ou lise celular.

O resultado das variáveis consideradas na Tabela 1 são representadas nas Figuras a seguir, sendo aplicadas nas equações obtidas através dos balanços já realizados, levando em consideração apenas o decaimento celular (Figura 9), apenas a manutenção celular (Figura 10), e considerando os dois simultaneamente (Figura 11).

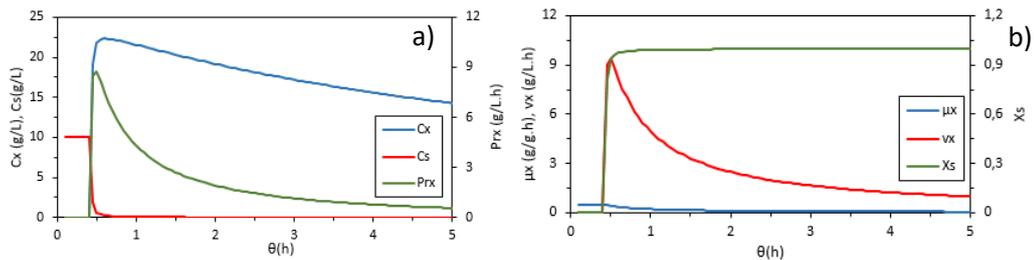


Figura 9- a) Perfis das concentrações de células e de substrato, da conversão de substrato e da produtividade celular, crescimento não-específico e específico. Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

Considerando apenas decaimento de biomassa devido ao metabolismo endógeno, houve uma leve redução da concentração de células, assim como da produtividade, ao comparar com as concentrações obtidas inicialmente, utilizando como válido apenas o modelo cinético de Monod.

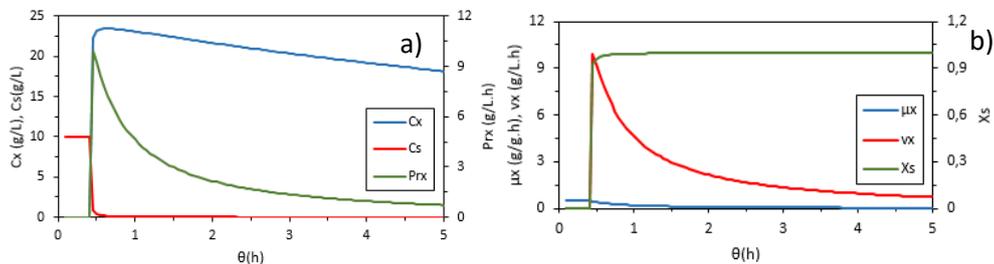


Figura 10. a) Perfis das concentrações de células e de substrato, da conversão de substrato e da produtividade celular; b) Perfis das velocidades de crescimento não-específica e específica. Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

Considerando apenas a manutenção celular, também se observa uma redução na concentração de biomassa, porém não tão acentuada quanto para o decaimento, tendo assim uma produtividade maior que considerando apenas o decaimento celular. Isto se deve ao fato de que, no decaimento, ocorre a lise celular, na qual é liberado material genético que será consumido pelos próprios microrganismos, reduzindo assim a sua concentração no sistema e podendo promover um aumento na concentração de substrato (não significativo). Já na manutenção celular, os microrganismos irão apenas consumir substrato para sua sobrevivência.

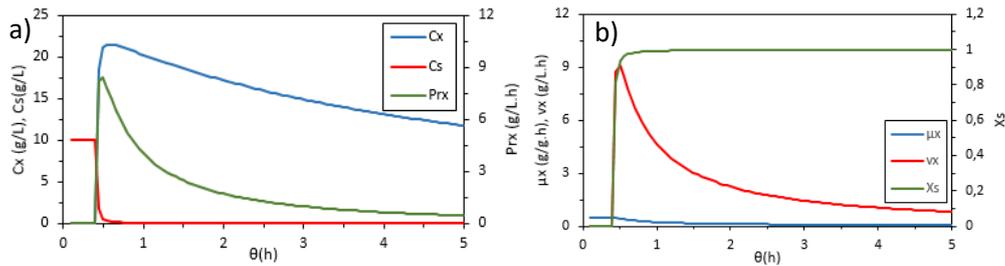


Figura 11. a) Perfis das concentrações de células e de substrato, da conversão de substrato e da produtividade celular; b) Perfis das velocidades de crescimento não-específica e específica. Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

Quando as duas considerações (decaimento e manutenção) são admitidas simultaneamente, nota-se um decréscimo ainda mais acentuado na concentração de biomassa, tornando o sistema mais próximo do real, uma vez que parte do substrato será utilizada pelas células para sua manutenção e metabolismo endógeno, reduzindo, dessa forma, a fração convertida em produto.

Quanto à influência exercida na velocidade não-específica e específica pelo k_d , observa-se que há um decréscimo na velocidade não-específica quando se considera apenas decaimento, uma vez que, o k_d é dependente da velocidade específica de formação de biomassa. Desta forma, quando se considera apenas a manutenção celular, o μ_x retorna às condições iniciais.

Portanto, pode-se concluir que, considerando decaimento, o substrato proveniente da respiração endógena concorre com o substrato do biorreator, tendo assim um menor consumo de substrato do que levando em consideração apenas a manutenção celular.

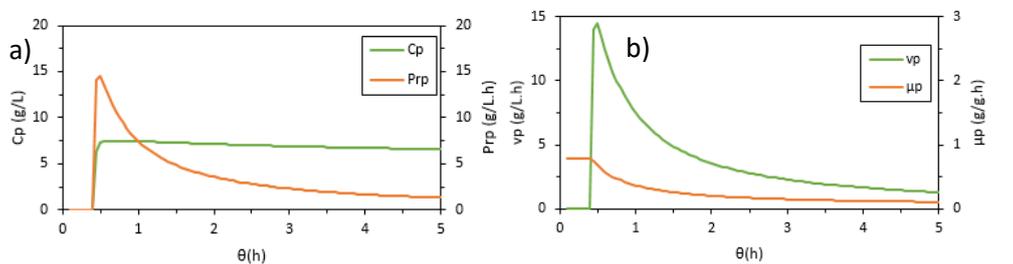


Figura 12. a) Perfis de concentrações de produto e da produtividade de produto; b) Perfis das velocidades de produção não específica e específica ($\alpha=1,6$). Fonte: Adaptado de Rodrigues et al. (2016).

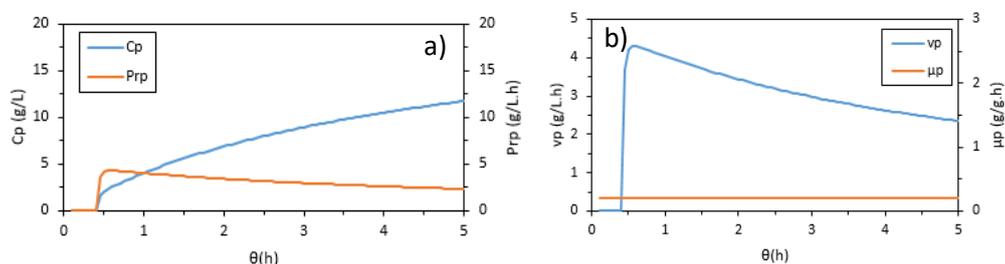


Figura 13. a) Perfis de concentrações de produto e da produtividade de produto; b) Perfis das velocidades de produção não específica e específica, considerando a formação do produto não associada ao crescimento ($\beta=0,2$). Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2016).

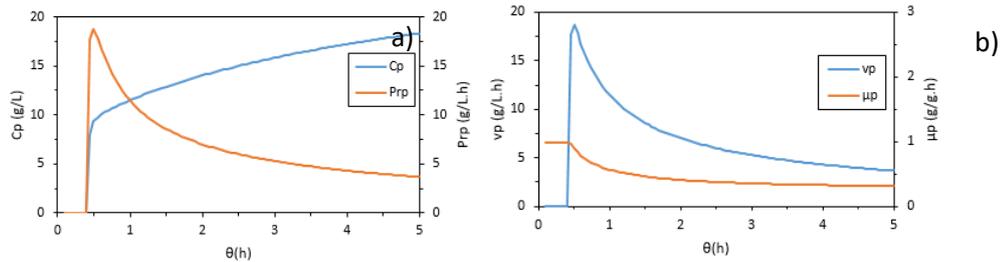


Figura 14 – a) Perfis de concentrações de produto e da produtividade de produto; b) Perfis das velocidades de produção não específica e específica, admitindo os modelos cinéticos de Monod, com considerações de decaimento e manutenção celular, em função do tempo de residência do biorreator considerando a formação do produto parcialmente associada ao crescimento ($\alpha=1,6$; $\beta=0,2 \text{ h}^{-1}$). Fonte: Adaptado de Rodrigues *et al.* (2016).

Avaliando as Figuras 12, 13 e 14, observa-se que houve uma redução na concentração de produto associada, não associada e parcialmente associada ao crescimento celular, em comparação com o estudo realizado no item 3.1. Isso se deve à redução de biomassa (devido ao decaimento celular) e à fração de substrato utilizada para manutenção celular, a qual não é convertida em produto. Nota-se também redução da produtividade em comparação com as condições iniciais. Houve ainda uma redução na velocidade não-específica de formação de produto (associada, não-associada e parcialmente associada), enquanto a velocidade específica permaneceu inalterada, levando a conclusão que a queda de produtividade se deu devido a redução da concentração de biomassa. A Figura 15 apresenta a influência da variação dos parâmetros k_d e m_s na concentração de biomassa e substrato.

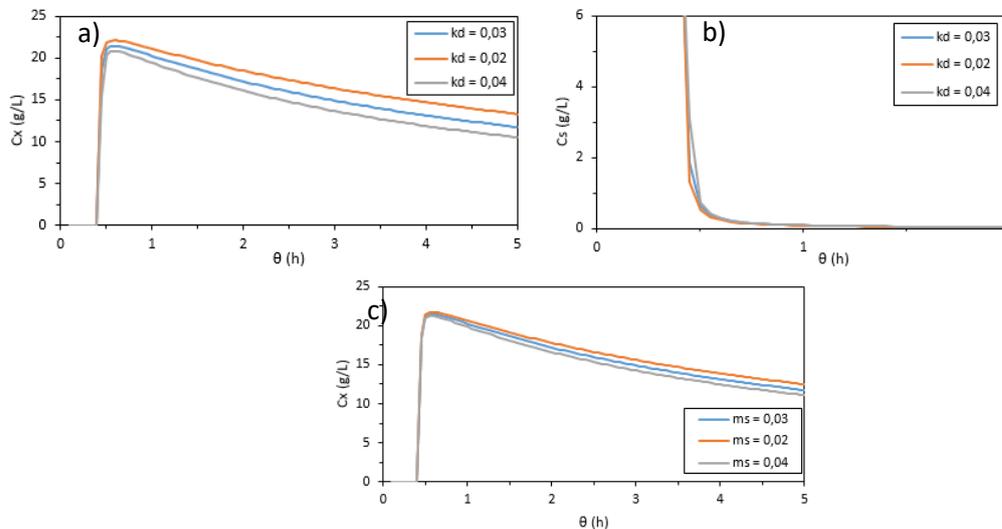


Figura 15- Influência dos parâmetros nos perfis. a) Influência da variação de k_d na concentração de biomassa ($m_s = 0,03$); b) Influência da variação de k_d na concentração de substrato ($m_s = 0,03$); c) Influência da variação de m_s na concentração de biomassa ($k_d = 0,03$).

Analisando a Figura 15-a, observa-se que o aumento da constante de decaimento favorece o decréscimo de biomassa no reator devido ao aumento da atividade endógena. Em contrapartida, verifica-se que a variação de k_d não influencia significativamente na concentração de substrato, tendo apenas um leve aumento desta quando se aumenta a constante. Esse aumento é resultado do material proveniente da lise celular.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem matemática é uma ferramenta essencial para otimizar bioprocessos. O estudo das técnicas de otimização apresenta grande importância na redução de custos e na satisfação de restrições relacionadas aos critérios de projeto e às condições operacionais de processos químicos. Um aspecto a considerar está relacionado ao conhecimento dos parâmetros do modelo, uma vez que, a aplicação destes, depende fortemente da precisão e exatidão dos parâmetros cinéticos, pois ao sofrerem alterações, as concentrações de biomassa, substrato e produto também sofrem influência sobre eles, nos quais estão interligados. A partir desse estudo, pode-se notar também parâmetros como a produtividade e a velocidade não específica se comportam de maneira semelhante.

Levando em consideração os parâmetros cinéticos de manutenção e decaimento celular, μ_s e k_d , respectivamente, existe uma influência direta na quantidade de substrato disponível dentro do reator, ou seja, em relação ao seu consumo, seja para formação ou manutenção das células, visando ocorrer um equilíbrio entre esses parâmetros para o melhor funcionamento do processo biológico. Portanto, sabendo do funcionamento e as peculiaridades dos processos biológicos de um reator que opera de modo contínuo com reciclo interno de biomassa, tem-se condições de fazer a análise do comportamento desses processos, assim como sua aplicação em diversos campos do conhecimento, como a ciência e a engenharia.

REFERÊNCIAS

RODRIGUES, J. A.; RATUSZNEI, S. M.; DAMASCENO, L. H. **Análise de processos biológicos**. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2006.

SCHMIDELL, W.; LIMA, U.; BORZANI, W.; AQUARONE, A. **Biotecnologia industrial**. 1 ed. 8 imp. São Paulo: Edgard Blücher, 2018. v. 2.