

SIMULAÇÃO DINÂMICA DO CRESCIMENTO DE BACTÉRIAS FLOCULANTES E FILAMENTOSAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES POR LODOS ATIVADOS: MODELO CONSIDERANDO ENRIJECIMENTO DOS FLOCOS

S. C. OLIVEIRA¹ e R. P. FRANZOTE²

¹Faculdade de Ciências Farmacêuticas, UNESP – Univ Estadual Paulista, Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia

E-mail: samueloliveira@fcfar.unesp.br

²Consórcio Ductor-Encibra-Contécnica

E-mail: ricprado@hotmail.com

RESUMO – Neste trabalho, a dinâmica de crescimento de bactérias floculantes e filamentosas em bioprocessos de tratamento de efluentes por lodos ativados é simulada para diferentes tempos de detenção hidráulica (t_h). A um modelo matemático simples, baseado em expressões cinéticas do tipo Monod, foi introduzido um parâmetro relativo ao enrijecimento dos flocos, o qual estabilizou o modelo fazendo com que a coexistência estável das bactérias fosse prevista para um intervalo de valores de t_h (4,08-22,22 h) e não para um único valor como previsto pelo modelo original. Para o processo de lodos ativados operar eficientemente deve ocorrer certo equilíbrio entre o número de bactérias floculantes e filamentosas para que haja o enrijecimento filamentoso do lodo, evitando a sua lavagem. Deste modo, observou-se, através das simulações, que valores de t_h em torno de 5,88 h parecem ser os mais adequados para a operação do processo.

1. INTRODUÇÃO

No âmbito do tratamento biológico de efluentes, existem vários processos de uso consagrado, como o processo de lodos ativados, o qual é amplamente utilizado, em nível mundial, para o tratamento de águas residuárias domésticas e industriais em que são necessários reduzidos requisitos de área e elevada qualidade do efluente tratado. No entanto, o processo de lodos ativados possui grau de mecanização superior ao de outros processos de tratamento, implicando uma operação mais sofisticada e um maior consumo energético.

Os flocos de lodos ativados constituem um amplo consórcio de microrganismos que interagem entre si segundo diversos tipos de relações (mutualismo, competição, inibição, comensalismo, etc.). Assim, a análise e a simulação de modelos matemáticos que descrevem a dinâmica populacional de espécies interagentes em processos de lodos ativados torna-se um requisito fundamental para a otimização e o controle de tais processos.

Em um trabalho anterior, Oliveira e Franzote (2013) utilizaram um modelo matemático simples baseado em expressões cinéticas do tipo Monod para simular a dinâmica de crescimento de bactérias floculantes e filamentosas em bioprocessos de tratamento de efluentes por lodos ativados e analisar as condições operacionais que levam à coexistência estável de ambas as espécies de bactérias. Entretanto, o modelo apresentado não foi capaz de representar um conjunto de condições reais de operação para as quais se sabe ocorrer a coexistência de ambas as bactérias.

Deste modo, para obter um modelo mais realista, que represente a coexistência estável de ambas as bactérias, as equações do modelo devem ser modificadas para que isso seja possível. Essas modificações devem fazer com que o modelo descreva a coexistência das bactérias formadoras de flocos e as filamentosas no processo de tratamento por lodos ativados em um intervalo maior de condições operacionais, o que pode ser conseguido levando-se em conta o fenômeno de enrijecimento filamentosos do floco conforme proposto por Cenens *et al.* (2000).

A teoria do enrijecimento filamentosos dos flocos em sistemas de lodos ativados assume que a estrutura do floco é formada por dois níveis. O primeiro, chamado de microestrutura, depende da biofloculação das bactérias formadoras de flocos. O segundo é a macroestrutura, formada pelas bactérias filamentosas, as quais dão firmeza aos flocos, enquanto que as bactérias formadoras de flocos se agrupam com os polímeros extracelulares de maneira estável.

Neste trabalho, a dinâmica de crescimento de bactérias floculantes e filamentosas em processos de lodos ativados é simulada utilizando-se um modelo matemático que leva em consideração o fenômeno de enrijecimento dos flocos.

2. MODELO MATEMÁTICO

Baseado na teoria do enrijecimento filamentosos, o modelo original, apresentado em uma publicação anterior (Oliveira e Franzote, 2013), foi estendido para levar em conta as bactérias filamentosas que são utilizadas para a formação de flocos. Considerando o esquema mostrado na Figura 1 e admitindo não haver biomassa no efluente do sistema nem substrato na corrente de reciclo e nem na de descarte de biomassa, as equações de balanço de massa no reator e no sedimentador são dadas por:

$$\frac{dC_S}{dt} = D(C_{S,in} - (1+r)C_S) - \frac{\mu_{floc}C_{Xfloc}}{Y_{floc}} - \frac{\mu_{fil}C_{Xfil}}{Y_{fil}} \quad (1)$$

$$\frac{dC_{Xfloc}}{dt} = rDC_{Xfloc, sed} - (1+r)DC_{Xfloc} + \mu_{floc}C_{Xfloc} + \alpha \frac{Y_{floc}}{Y_{fil}} C_{Xfil} \quad (2)$$

$$\frac{dC_{X_{fil}}}{dt} = rDC_{X_{fil, sed}} - (1+r)DC_{X_{fil}} + \mu_{fil}C_{X_{fil}} - \alpha C_{X_{fil}} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{S, sed}}{dt} = (1+r)\frac{Q}{V_{sed}}C_S - (1-w)\frac{Q}{V_{sed}}C_{S, sed} \quad (4)$$

$$\frac{dC_{X_{floc, sed}}}{dt} = (1+r)\frac{Q}{V_{sed}}C_{X_{floc}} - (r+w)\frac{Q}{V_{sed}}\beta_{floc}C_{X_{floc}} \quad (5)$$

$$\frac{dC_{X_{fil, sed}}}{dt} = (1+r)\frac{Q}{V_{sed}}C_{X_{fil}} - (r+w)\frac{Q}{V_{sed}}\beta_{fil}C_{X_{fil}} \quad (6)$$

Considerando que a estabilidade e o comportamento do sistema são determinados pela dinâmica mais lenta, pode-se assumir que o sedimentador está sempre em estado estacionário em comparação com o reator. Assim:

$$\frac{dC_{S, sed}}{dt} = 0 \Rightarrow C_{S, sed} = \frac{(1+r)}{(1-w)}C_S \quad (7)$$

$$\frac{dC_{X_{floc, sed}}}{dt} = 0 \Rightarrow C_{X_{floc, sed}} = \frac{(1+r)}{\beta_{floc}(w+r)}C_{X_{floc}} \Rightarrow \frac{dC_{X_{floc}}}{dt} = \mu_{floc}C_{X_{floc}} - \bar{D}C_{X_{floc}} + \alpha\frac{Y_{floc}}{Y_{fil}}C_{X_{fil}} \quad (8)$$

$$\frac{dC_{X_{fil, sed}}}{dt} = 0 \Rightarrow C_{X_{fil, sed}} = \frac{(1+r)}{\beta_{fil}(w+r)}C_{X_{fil}} \Rightarrow \frac{dC_{X_{fil}}}{dt} = \mu_{fil}C_{X_{fil}} - \bar{D}C_{X_{fil}} - \alpha C_{X_{fil}} \quad (9)$$

onde: $\bar{D} = \frac{w(1+r)}{r+w}D$

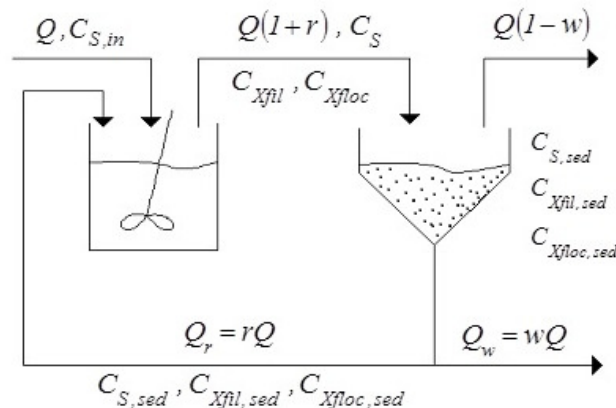


Figura 1 – Esquema do processo de lodos ativados para fins de modelagem matemática.

Nestas equações, o parâmetro α (h^{-1}), do ponto de vista biológico, representa a fração de bactérias filamentosas incorporadas ao floco enquanto que, do ponto de vista matemático, representa um fator estabilizante do modelo, o qual faz com que a coexistência estável das bactérias ocorra em um intervalo de valores de \bar{D} ($\bar{D}_1 < \bar{D} < \bar{D}_2$) e não em um único valor como ocorre para o modelo original (Figura 2).

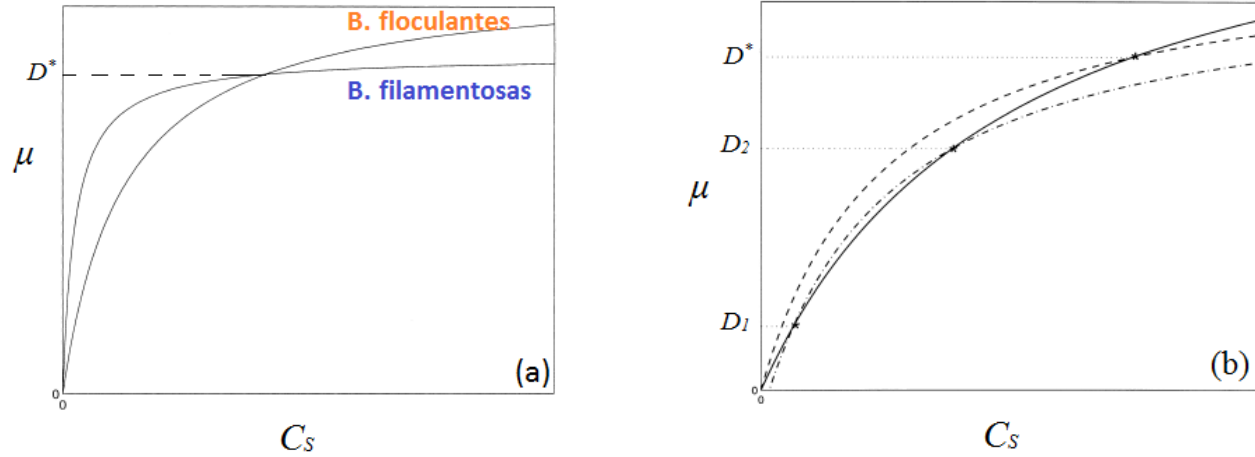


Figura 2 – Comportamento qualitativo da taxa específica de crescimento das bactérias flocculantes e filamentosas quando $K_{S,floc} > K_{S,fil}$ e $\mu_{max,floc} > \mu_{max,fil}$: (a) – modelo original ; (b) – modelo modificado

As expressões matemáticas para os valores de \bar{D} que definem o intervalo para o qual a coexistência das bactérias ocorre são as seguintes (Cenens *et al.*, 2000) :

$$\bar{D}_1 = \frac{(\bar{D}^* - \alpha) - \sqrt{(\alpha - \bar{D}^*)^2 - \frac{4\alpha K_{S,fil} \mu_{max,floc}}{K_{S,floc} K_{S,fil}}}}{2} \quad (10)$$

$$\bar{D}_2 = \frac{(\bar{D}^* - \alpha) + \sqrt{(\alpha - \bar{D}^*)^2 - \frac{4\alpha K_{S,fil} \mu_{max,floc}}{K_{S,floc} - K_{S,fil}}}}{2} \quad (11)$$

$$\bar{D}^* = \frac{\mu_{max,fil} K_{S,floc} - \mu_{max,floc} K_{S,fil}}{K_{S,floc} - K_{S,fil}} \quad (12)$$

Na Tabela 1 estão apresentados os valores dos parâmetros cinéticos e operacionais utilizados na simulação do processo de lodos ativados.

Tabela 1 – Parâmetros usados na simulação do processo de lodos ativados

Bactérias	μ_{max} (h ⁻¹)	K_S (g/L)	Y (g/g)	Parâmetros operacionais		
Floculantes	1,1	0,4	0,6	r (-)	w (-)	$C_{S,in}$ (g/L)
Filamentosas	0,7	0,2	0,6	0,5	0,1	25,0

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os valores de \bar{D}_1 e \bar{D}_2 são completamente determinados pelos parâmetros cinéticos e também pelo valor de α . Por meio de diversas simulações, verificou-se numericamente que o valor de α deve estar compreendido entre 0 e 0,0180652 h⁻¹ para que os valores de \bar{D}_1 e \bar{D}_2 sejam números reais positivos. Valores de α acima do limite superior levam à obtenção de números complexos para \bar{D}_1 e \bar{D}_2 .

Estes valores de \bar{D}_1 e \bar{D}_2 levam a três casos distintos, os quais estão sumarizados na Tabela 2. Para a simulação desses casos, os valores dos parâmetros usados foram os mesmos da Tabela 1, além de $\alpha=0,01\text{h}^{-1}$ e as seguintes condições iniciais: $C_S(0)=1\text{g/L}$, $C_{floc}(0)=10\text{g/L}$ e $C_{fil}(0)=10\text{g/L}$. Assim, simulando-se a interação das bactérias floculantes com as filamentosas utilizando-se o modelo modificado, obtém-se a Figura 3 para os casos descritos na Tabela 2.

Para o modelo do processo de lodos ativados considerando o enrijecimento filamentoso, as condições iniciais impostas e os parâmetros cinéticos adotados, observa-se que ambas as espécies coexistem no intervalo de \bar{D} entre 0,045 e 0,245 h⁻¹ (tempo de detenção hidráulica t_h entre 22,22 e 4,08 h), permitindo, deste modo, uma maior flexibilidade das condições operacionais do sistema de tratamento (Figura 4).

Apesar de as bactérias filamentosas competirem com as floculantes pelo mesmo substrato, elas são importantes para o bom andamento do processo. Assim, para o processo de lodos ativados operar eficientemente deve ocorrer certo equilíbrio entre o número de bactérias formadoras de flocos e o de filamentosas para que haja o enrijecimento filamentoso do lodo não permitindo a sua lavagem. Deste modo, valores de \bar{D} em torno de 0,17 h⁻¹, ou seja, t_h em torno de 5,88 h parecem ser os mais adequados para a operação do processo.

Tabela 2 – Estados estacionários e condições de estabilidade para o processo de lodos ativados segundo o modelo modificado

	Valores calculados analiticamente	Valores calculados numericamente
1. Lavagem das bactérias filamentosas i. Valores no estado estacionário: $\bar{D} = \mu_{floc}$ $C_S^* = \frac{K_{S,floc} \bar{D}}{\mu_{max,floc} - \bar{D}}$ $C_{Xfloc}^* = \left(\frac{C_{S,in}}{1+r} - C_S^* \right) Y_{floc} \frac{r+w}{w}$ $C_{Xfil}^* = 0$ ii. Estabilidade: Estável se $\bar{D} < \bar{D}_1 \vee \bar{D} > \bar{D}_2$	$\bar{D}_1 = 0,0448750891$ $\bar{D}_2 = 0,245124862$ $\bar{D} = 0,5$ $C_S^* = 0,333333272$ $C_{Xfloc}^* = 58,8$ $C_{Xfil}^* = 0$	$\bar{D} = 0,5$ $C_S^* = 0,333333333$ $C_{Xfloc}^* = 58,8$ $C_{Xfil}^* = 3,26517377 \times 10^{-314}$
2. Coexistência i. Valores no estado estacionário: $\bar{D} = \mu_{fil} - \alpha$ $C_S^* = \frac{K_{S,fil} (\bar{D} + \alpha)}{\mu_{max,fil} - (\bar{D} + \alpha)}$ $C_{Xfloc}^* = \left(\frac{C_{S,in}}{1+r} - C_S^* \right) \frac{\alpha Y_{floc}}{\alpha + \bar{D} - \mu_{floc}} \frac{w+r}{w}$ $C_{Xfil}^* = \left(\frac{C_{S,in}}{1+r} - C_S^* \right) \frac{Y_{fil} (\bar{D} - \mu_{floc})}{\alpha + \bar{D} - \mu_{floc}} \frac{w+r}{w}$ ii. Estabilidade: Estável se $D_1 < \bar{D} < D_2$	$\bar{D} = 0,1$ $C_S^* = 0,037288135$ $C_{Xfloc}^* = 36,95063512$ $C_{Xfil}^* = 22,91512816$	$\bar{D} = 0,1$ $C_S^* = 0,0372881356$ $C_{Xfloc}^* = 36,9506382$ $C_{Xfil}^* = 22,9151245$
3. Lavagem das bactérias floculantes e filamentosas i. Valores no estado estacionário: $C_S^* = \frac{C_{S,in}}{1+r}$ $C_{Xfloc}^* = 0$ $C_{Xfil}^* = 0$ ii. Estabilidade: Estável se $\bar{D} > \mu_{max,floc} \frac{C_{S,in}}{K_{S,floc} + C_{S,in}}$	$C_S^* = 16,6666667$ $C_{Xfloc}^* = 0$ $C_{Xfil}^* = 0$	$C_S^* = 16,6666667$ $C_{Xfloc}^* = 2,00343619 \times 10^{-320}$ $C_{Xfil}^* = 4,76773348 \times 10^{-321}$

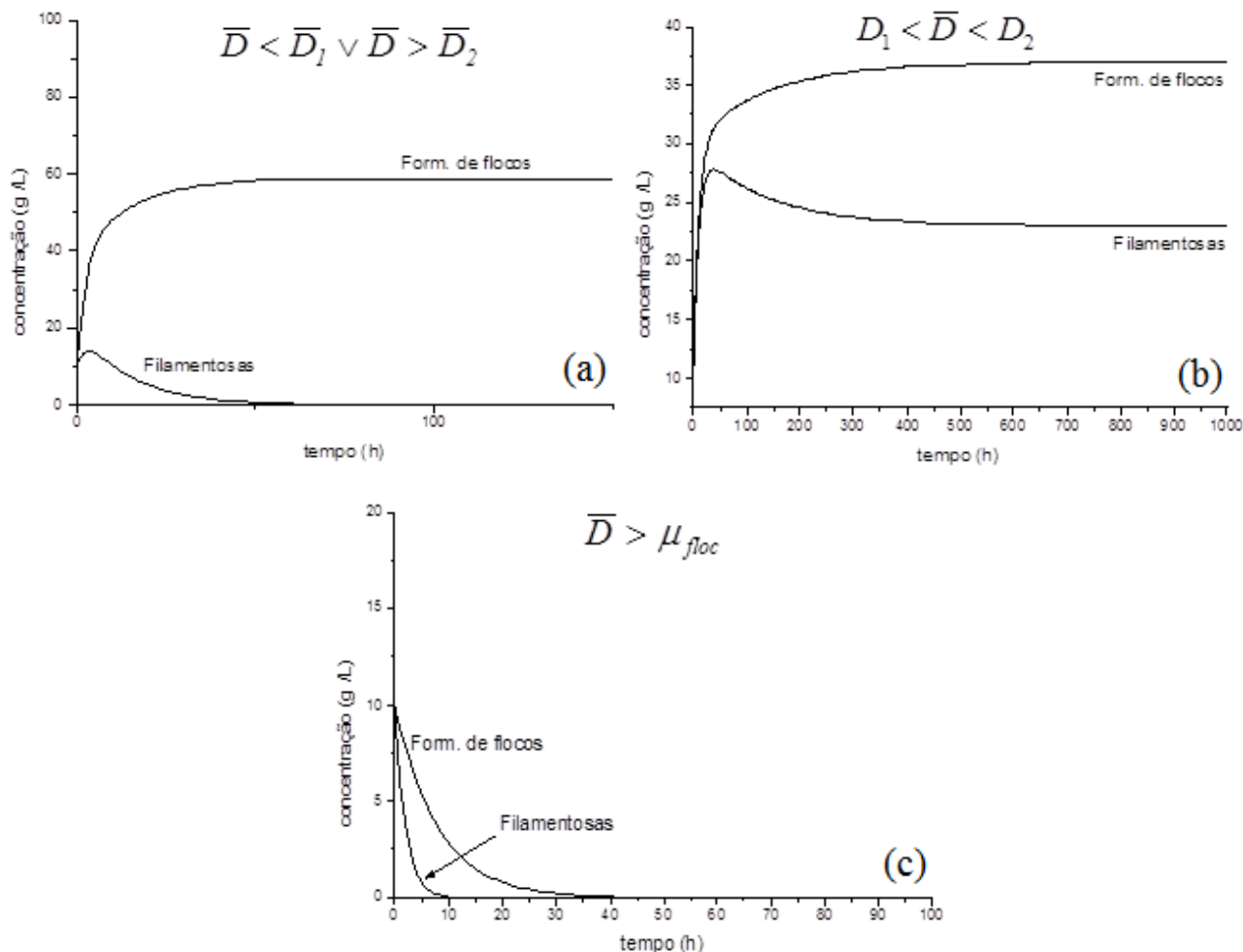


Figura 3 – Dinâmica de crescimento de bactérias floculantes e filamentosas em um processo de lodos ativados: (a) Extinção das bactérias filamentosas ; (b) Coexistência estável ; (c) Extinção de ambas as bactérias.

4. CONCLUSÕES

A partir de um modelo matemático que considera o fenômeno de enrijecimento filamentoso dos flocos foi possível prever, para um amplo intervalo de t_h (4,08-22,22 h), a coexistência estável de bactérias floculantes e filamentosas em um processo de tratamento de efluentes por lodos ativados. A simulação do modelo dentro do intervalo de t_h especificado revelou que, para um tempo de detenção hidráulica em torno de 6 horas, ocorre a coexistência das bactérias em quantidades aproximadamente iguais, condição essencial para uma boa eficiência do processo. Este tempo de detenção de 6 horas, para o qual a coexistência ocorre, aproxima-se bem do tempo usualmente praticado em processos de lodos ativados convencionais.

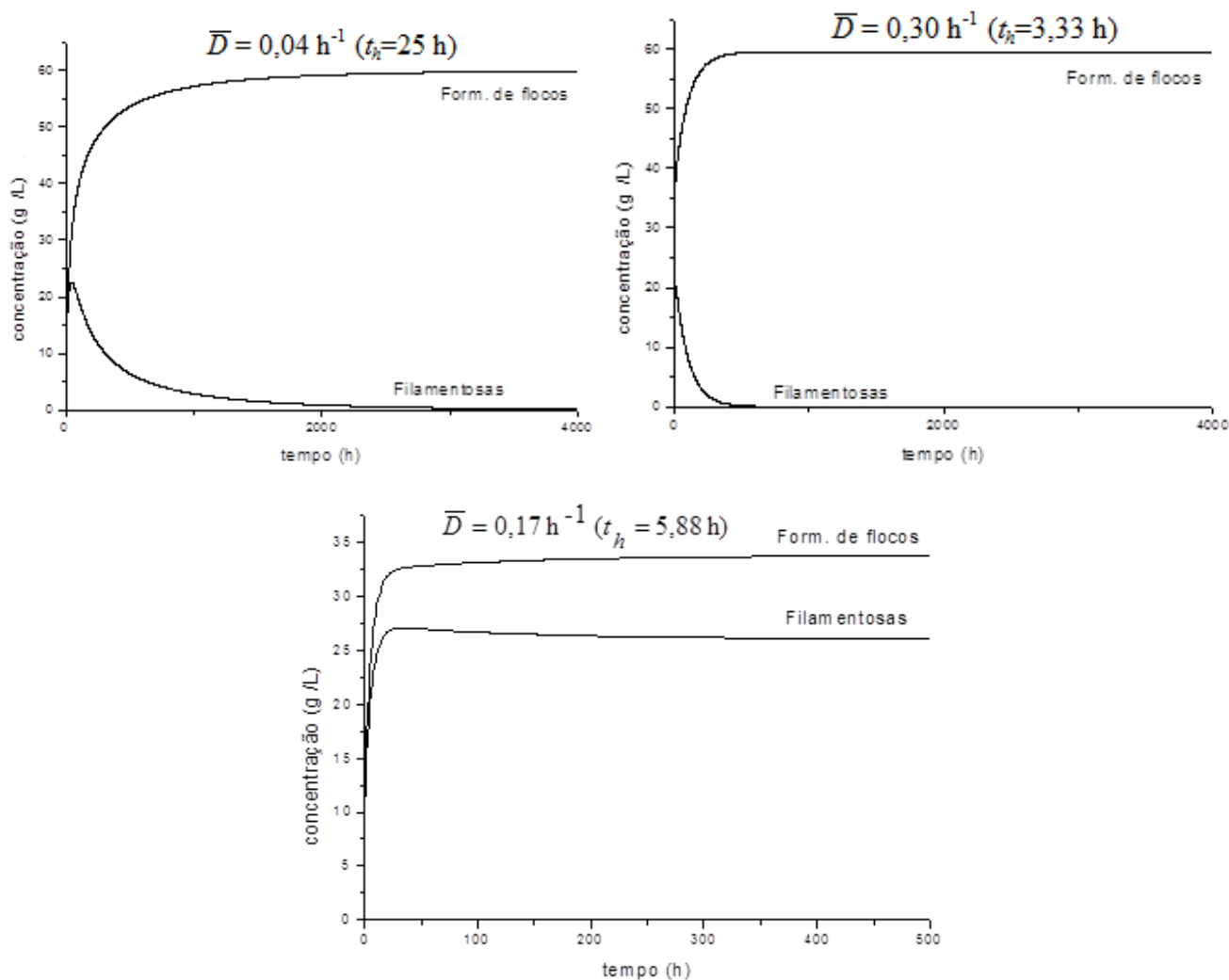


Figura 4 – Simulação da dinâmica de crescimento de bactérias floculantes e filamentosas em um processo de lodos ativados para diferentes condições operacionais.

5. REFERÊNCIAS

OLIVEIRA, S. C.; FRANZOTE, R. P. Modelagem matemática e simulação da dinâmica de crescimento de bactérias floculantes e filamentosas em bioprocessos de tratamento de efluentes por lodos ativados. In: Anais do XIX Simpósio Nacional de Bioprocessos/X Simpósio de Hidrólise Enzimática de Biomassas. Foz do Iguaçu-PR, 2013.

CENENS, C.; SMETS, I. Y.; VAN IMPE, J. F. Modeling the Competition Between Floc-Forming and Filamentous Bacteria in Activated Sludge Waste Water Treatment Systems – II: A Prototype Mathematical Model Based on Kinetic Selection and Filamentous Backbone Theory. *Wat. Res.* v. 34 (9), p. 2535-2541, 2000.