

XII-047 - APLICAÇÃO DO MODELO DE MONOD NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM REATOR BIOLÓGICO OPERANDO EM BATELADA ALIMENTADA

Igor Souza Ogata⁽¹⁾

Graduando em Engenharia Sanitária Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande. Técnico em Eletroeletrônica pelo SENAI – Prof. Stênio Lopes.

Abílio José Procópio Queiroz

Graduando em Engenharia Sanitária Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande.

Herculys Pessoa e Castro

Graduando em Engenharia Sanitária Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba.

Narcísio Cabral de Araújo

Graduando em Engenharia Sanitária Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba.

Pablo Luiz Fernandes Guimarães

Graduando em Engenharia Sanitária Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba. Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Federal de Campina Grande.

Endereço⁽¹⁾: Rua Coronel João Figueiredo, 78 - Bodocongó – Campina Grande - Paraíba - CEP: 58430-180 - Brasil - Tel: +55 (83) 8750-3292 - Fax: +55 (83) 3321-0967 - e-mail: **igor_ogata@hotmail.com**.

RESUMO

Utilizando o aplicativo Scilab 5.2, este trabalho apresenta uma modelagem de um reator biológico operando em batelada alimentada com os seguintes parâmetros iniciais: $V_0=2L$, $V_f=5L$, $F=0,75L/h$, $\mu_{max}=0,5h^{-1}$, $K_s=0,25g/L$, $Y_{xs} = 0,5$, $\alpha=1,0$, $\beta=0,5h^{-1}$, $C_{xo} = 2,0 g/L$, $C_{so} = 0,0 g/L$, $C_{po} = 0,0 g/L$, $C_{xf}=0,0g/L$, $C_{sf}=25,0g/L$ e $C_{pf}=0,0g/L$. As equações que regem a dinâmica de crescimento de biomassa e consumo de substrato foram propostas pela formulação de Monod para substrato limitante e a geração de produto pela formulação parcialmente associada de Leudeking-Piret. Os valores de F , C_{xo} e C_{sf} foram variados 5 vezes para mais e 5 vezes para menos, enquanto que os valores de V_0 e V_f foram manipulados de forma a torná-los insignificante um em relação ao outro, com a finalidade de analisar a influência desses parâmetros nas concentrações de biomassa, substrato e produto do reator. Percebe-se então que ao aumentar F compromete-se o funcionamento do biorreator, por sua vez ao ser diminuído, a biomassa cresce menos, o substrato é mais rapidamente consumido e menos produto é formado, as mudanças em C_{xo} são inversamente proporcionais à formação de produto e ao tempo de consumo de substrato, as variações em C_{sf} são diretamente proporcionais ao crescimento de biomassa e formação de produto, por fim quando o valor de V_f é insignificante, o comportamento é análogo ao aumento de F e quando V_0 é insignificante, o substrato é mais rapidamente consumido e a biomassa e o produto diminuem sua concentração.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Ambiental, Reator em Batelada Alimentada, Modelo de Monod.

INTRODUÇÃO

“Um modelo pode ser conceituado como qualquer artifício que permita reproduzir a realidade física de um determinado sistema”, assim conceitua RODRIGUES (p. 2, 2006). É importante que esse artifício corresponda a realidade com um determinado grau de simplicidade, desta maneira o modelo deve conter um equilíbrio entre representatividade e necessidade de informações para obter tal representatividade.

Quanto à classificação os modelos podem ser físicos ou matemáticos. Os modelos físicos são os que simulam a realidade através da reconstrução do sistema real em menor escala, como por exemplo, os experimentos laboratoriais, por sua vez os modelos matemáticos representam a realidade de forma abstrata utilizando fórmulas matemáticas, desta maneira, a modelagem matemática é capaz de gerar mais dados que a modelagem física (podendo ser testadas mais hipóteses como situações ótimas, condições extremas, otimização de sistemas, entre outras), com total segurança e custos muito baixos.

RODRIGUES (p. 5-7, 2006) em seu livro *Análise de Processos Biológicos*, mostra um roteiro de como fazer um modelo matemático, que será mostrado resumidamente a seguir.

Inicialmente deve-se definir seu objetivo de trabalho, a fim de estudar o fenômeno para compreendê-lo, se possível em sua totalidade, depois converter as etapas do processo em equações matemáticas, verificar se o conjunto de equações é passível de resolução e por fim comparar os valores da resolução com dados gerados empiricamente, se estes forem similares então o modelo é válido para aquele fenômeno. Contudo, muitos problemas podem surgir durante esse roteiro, como a falta de conhecimento sobre o processo estudado, a impossibilidade de traduzir o fenômeno em fórmulas matemáticas, a dificuldade em resolver as equações matemáticas geradas e a não compatibilidade dos resultados do modelo com a situação real. Caso algumas destas situações ocorram, é necessário retornar a etapas anteriores para fazer mudanças no modelo.

As unidades físicas em que ocorre a remoção de matéria orgânica biodegradável ou processamento dessas, através da ação de microrganismos (células vivas), são denominadas de reatores biológicos ou biorreatores. Nesses reatores, são introduzidas quantidades determinadas de substrato e de biomassa, e gerada alguma quantidade de produtos. Quanto à logística de funcionamento dos reatores encontramos o de batelada, batelada alimentada, contínuo com e sem recirculação de biomassa e o contínuo em série.

Segundo VIEIRA (p. 80-81, 2010), um reator operando em batelada alimentada significa que nele contém um volume inicial entre 10 e 20 % de biomassa ativa, e então um volume de substrato é adicionado até alcançar um volume final em um tempo determinado, onde permanece até que o tempo de batelada seja completado. A retirada do meio do reator pode ser total ou parcial, sendo essa última quando o reator será utilizado novamente, necessitando de certa quantidade de biomassa ativa.

Esses reatores podem ser modelados matematicamente, pelas fórmulas de Monod, que analisam o crescimento celular limitado pela concentração de substrato (RODRIGUES, p. 45, 2006). Para estudar a geração de produtos pode-se empregar o modelo de Leudeking-Piret, que podem estar totalmente, parcialmente ou não associado ao substrato limitante.

Um reator operando em batelada alimentada, modelado pelas fórmulas de Monod com geração de produto parcialmente associada às fórmulas de Leudeking-Piret, usando como variáveis o volume inicial (V_0), volume final (V_f), fluxo de alimentação (F), velocidade máxima de crescimento celular (μ_{max}), constante de Monod (K_s), relação do crescimento de biomassa e consumo de substrato (Y_{xs}), parâmetros cinéticos de formação de produto (α e β), concentração de biomassa no fluxo (C_{xf}), concentração de substrato no fluxo (C_{sf}), concentração de produto no fluxo (C_{pf}), concentração inicial de biomassa (C_{xo}), concentração inicial de substrato (C_{so}) e concentração inicial de produto (C_{po}) foi modelado. A fim de analisar o comportamento do reator pelo modelo empregado, bem como a influência da variação de alguns desses parâmetros.

METODOLOGIA

Com o auxílio do aplicativo Scilab 5.2, para resolver equações diferenciais ordinárias, pelo método de Runge-Kutta de 4ª ordem, inerentes ao modelo de Monod parcialmente associado à Leudeking-Piret, foi modelado um reator hipotético operando em batelada alimentada, com as seguintes variáveis nas condições iniciais: $V_0=2L$, $V_f=5L$, $F=0,75L/h$, $\mu_{max}=0,5h^{-1}$, $K_s=0,25g/L$, $Y_{xs}=0,5$, $\alpha=1,0$, $\beta=0,5h^{-1}$, $C_{xo}=2,0g/L$, $C_{so}=0,0g/L$, $C_{po}=0,0g/L$, $C_{xf}=0,0g/L$, $C_{sf}=25,0g/L$ e $C_{pf}=0,0g/L$.

As formulações que regem a dinâmica de funcionamento do biorreator (equações 1, 2 e 3) são descritas abaixo. Representam a variação de concentrações de biomassa (C_x), substrato (C_s) e produto (C_p), respectivamente.

$$\frac{dC_x}{dt} = \left(\mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s} - \frac{F}{(V_f - V_0)} \right) C_x \quad \text{Equação (1)}$$

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{F}{(V_f - V_0)} (C_{sf} - C_s) - \frac{1}{Y_{xs}} \mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s} C_x \quad \text{Equação (2)}$$

$$\frac{dC_p}{dt} = \left(\alpha \mu_{max} \frac{C_s}{K_s + C_s} + \beta \right) C_x - \frac{F}{(V_f - V_0)} C_p \quad \text{Equação (3)}$$

Desta maneira, os valores de F , C_{xo} e C_{sf} foram variados 5 vezes para mais e 5 vezes para menos, enquanto que os valores de V_0 e V_f foram modificados de forma que o volume inicial fosse insignificante, cerca de 2%

do volume total, (aumentando 20 vezes o V_f ou diminuindo 20 vezes o V_o) e o volume adicionado fosse insignificante, cerca de 2%. Cada variável foi modificada separadamente, conservando a condição inicial das outras variáveis, a fim de analisar a influência de cada fator no desenvolvimento do reator.

Tanto nas condições iniciais quanto nas variações dos fatores em estudo, foram gerados gráficos com o desenvolvimento da concentração de biomassa, substrato e produto ao longo do tempo de funcionamento no reator. Tornando possível a comparação das variantes do reator com a condição inicial.

RESULTADOS

O modelo do reator operando em batelada alimentada, nas condições iniciais (figura 1), desenvolve-se formando um pico de concentração de substrato, alcançando sua concentração máxima no momento em que cessa a entrada de substrato pelo fluxo de alimentação do reator, nesse primeiro momento, a biomassa e a geração de produto crescem exponencialmente como normalmente ocorre em um reator em batelada comum. Após essa primeira etapa, a biomassa e produto continuam com o mesmo comportamento, mas o substrato começa a diminuir sua concentração até o consumo total do mesmo, como é esperado de um reator em batelada, nesse momento a concentração de biomassa torna-se constante, mas a de produto continua a crescer, mudando apenas o ângulo de inclinação, o que é explicado pela inserção das fórmulas de Leudeking-Piret parcialmente associado, onde o produto continua a aumentar mesmo acabando o substrato. Sendo assim, só serão consideradas as concentrações de produto até a mudança de inclinação da reta no gráfico.

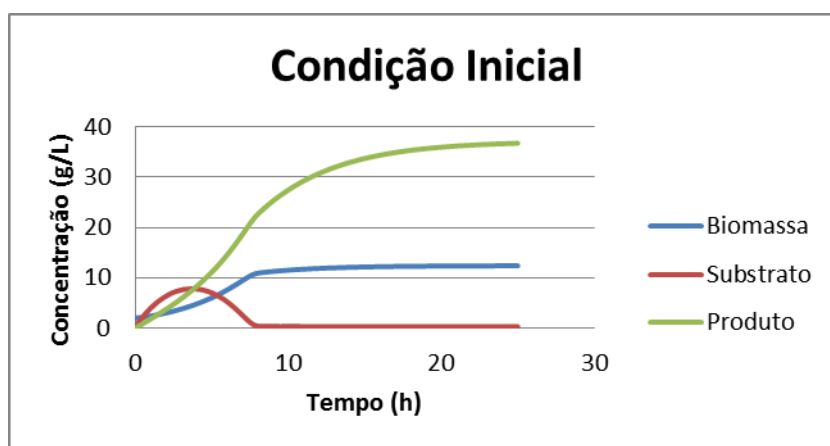


Figura 1 – Valores de Biomassa, Substrato e Produto, na Condição Inicial do reator.

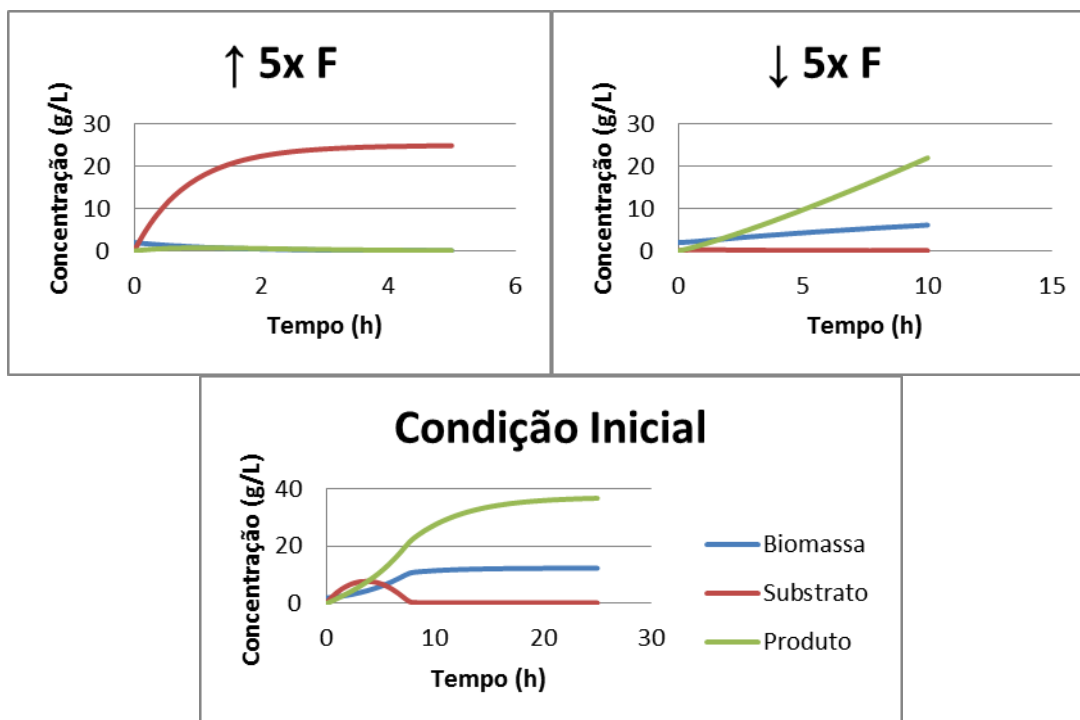


Figura 2 – Comparação da Condição Inicial com a Variação do F.

Aumentado o fluxo de entrada em cinco vezes, vê-se que ocorre a drástica diminuição da concentração de biomassa, o produto basicamente permanece em zero e não ocorre consumo de substrato. Ao diminuí-lo, também na mesma proporção, o crescimento de biomassa é menor que nas condições iniciais, mas o consumo total do substrato ocorre bem mais rápido, com o produto aumentando indefinidamente, ver figura 2.

O comprometimento do funcionamento do reator quanto o fluxo é aumentado, é explicado pelo fenômeno de lavagem do reator, ou seja, o aumento extremo do fluxo carrega as substâncias anteriormente presentes no reator e impõe as concentrações dos componentes inerentes ao fluxo de entrada, no caso não existindo biomassa e produto na contribuição de entrada apenas uma concentração de 25 g/L de substrato, como foi mostrado na metodologia.

A diminuição de concentração de biomassa e o rápido consumo do substrato no reator quando se diminui o fluxo, ocorre graças à racionalização na distribuição do substrato que impede que a biomassa cresça um pouco mais e o substrato é rapidamente consumido, pois o pouco substrato que entra no reator é suficiente apenas para alimentar a biomassa existente no mesmo.

Na figura 3 estão às variações de C_{x0} , ao aumentá-lo percebe-se que o substrato é rapidamente consumido na sua totalidade, com leve crescimento de biomassa e diminuição da concentração de produto característico das condições iniciais. Contudo, ao diminuí-lo o consumo do substrato é mais demorado, sem variações nas concentrações finais de biomassa e aumento da formação de produto.

Quanto maior a quantidade de indivíduos mais rapidamente o substrato é consumido e menos produto é gerado, de maneira análoga quanto menos indivíduos houver no reator mais devagar o substrato é consumido e mais produto é formado, explicando assim a ocasião descrita acima. A formação de produto não depende diretamente da quantidade de biomassa, no entanto quanto maior a concentração de biomassa, mais rápido é o consumo de substrato, ou seja, menor o tempo de crescimento exponencial que influi diretamente na geração de produto.

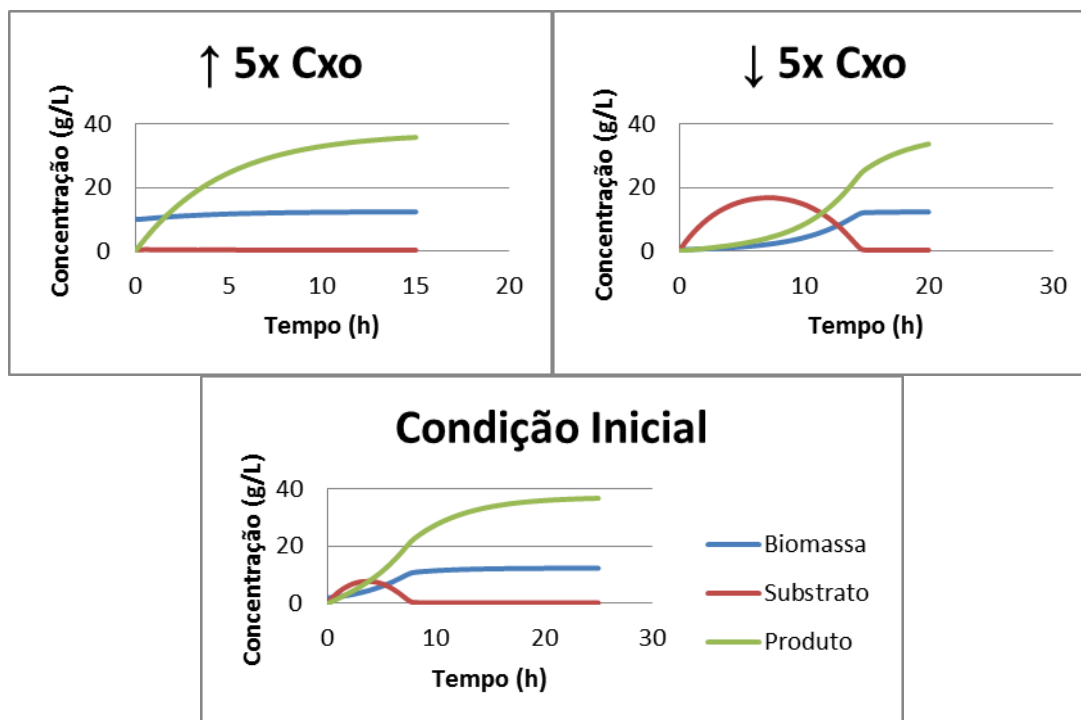


Figura 3 - Comparação da Condição Inicial com a Variação do C_{xo} .

Com um valor maior de C_{sf} , a biomassa e o produto aumentam consideravelmente, bem como o tempo para o substrato ser todo consumido e um menor valor de C_{sf} , faz com que limite o crescimento de biomassa e a formação de produto, nunca consumindo totalmente o substrato, ver na figura 4.

Isso ocorre desta maneira, pois se há muito substrato entrando no reator mais indivíduos podem coexistir no reator e mais produto pode ser formado, mas quando o substrato limita o crescimento da biomassa por ser pouco, a produção de produto é pequena e essa biomassa não tem capacidade de consumir o substrato totalmente.

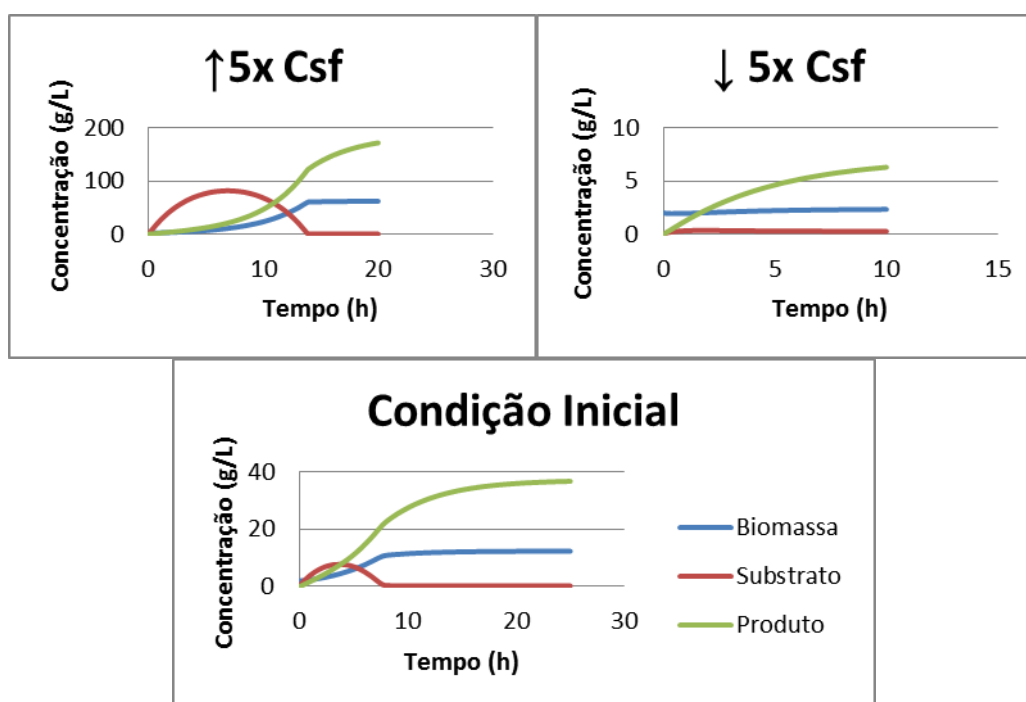


Figura 4 - Comparação da Condição Inicial com a Variação do C_{sf} .

Quando o volume a ser adicionado no reator é mínimo o comportamento é análogo a quando o fluxo de alimentação é aumentado. Todavia, o caso em que o volume inicial é mínimo, o substrato é rapidamente consumido e o crescimento e geração de biomassa e produto, respectivamente, diminuem. Conferir a figura 5.

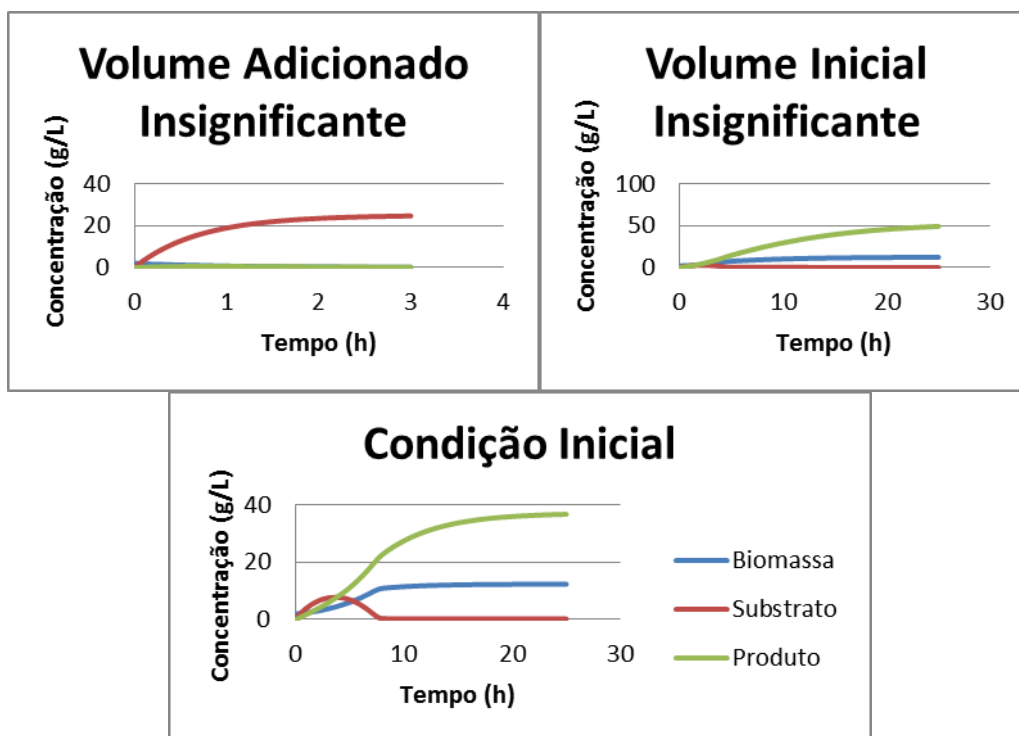


Figura 5 - Comparação da Condição Inicial quando o Volume Adicionado é insignificante e o Volume Inicial é insignificante.

Quando o volume a ser adicionado é insignificante, representa o caso em que o reator funciona em batelada apenas, pois basicamente todo o volume do reator é colocado de uma única vez no mesmo. A inércia do reator pode ser explicada pelo fato da quantidade de substrato que entra no reator ser pouca, apesar de estar em uma concentração suficiente para o desenvolvimento do reator, impedindo da biomassa se desenvolver e gerar produto.

Na situação quando o volume inicial é insignificante, a biomassa não cresce muito, pois existe uma pequena quantidade inicial no reator da mesma, impedindo uma grande formação de produto, apesar de haver bastante substrato no reator, graças a considerável entrada de material adicionado.

CONCLUSÃO

Quando o fluxo de entrada é aumentado em cinco vezes, o fenômeno de lavagem do reator ocorre. Contudo, essa situação é característica de reatores contínuos, onde existe também um fluxo de saída que pode carrear as substâncias para fora do reator. Sendo assim, esse caso pode ser uma falha do modelo utilizado.

Quando o volume adicionado é insignificante o reator deveria comportar-se analogamente a um reator em batelada. No entanto, o modelo prevê a baixa entrada de substrato no reator, impedindo o desenvolvimento do mesmo.

No caso em que o volume inicial é insignificante, bastante substrato é inserido no reator com pouca quantidade de biomassa. Todavia, o consumo do substrato é mais rápido que na condição inicial, podendo ser também uma limitação do modelo utilizado.

As situações mais favoráveis para o consumo de substrato é quando a biomassa é aumentada e quando o fluxo de alimentação é diminuído. Na primeira situação, é graças ao elevado número de indivíduos consumirem totalmente e rapidamente o substrato, e na segunda situação, o fato se deve a taxa de entrada de substrato ser

pequena. Já as situações menos favoráveis são quando o fluxo de alimentação aumenta e quando o volume adicionado é insignificante, onde o substrato não é consumido. Nesse caso acontece porque o fornecimento de substrato é extremamente baixo, impedindo o crescimento da biomassa e consequentemente o consumo desse substrato.

Quando se quer gerar biomassa a melhor situação é quando se dispõe mais substrato, pois uma maior quantidade da mesma faz crescer mais biomassa. Porém, as piores situações são quando o fluxo aumenta e o volume adicionado é insignificante, pois novamente o baixo fornecimento de substrato limita o crescimento de biomassa, chegando até a torná-la zero.

Da mesma maneira que a biomassa, a geração de produto se comporta, o melhor caso é quando o substrato aumenta e os piores casos são quando o fluxo de alimentação aumenta e o volume adicionado é insignificante. Uma vez que, pelo modelo utilizado, o supercrescimento e o subcrescimento da biomassa diminuem e aumentam, respectivamente, a formação de produto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RODRIGUES, J. A. D.; RATUSZNEI, S. M.; DAMASCENO, L. H. S.. **Análise de Processos Biológicos**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia. Área de Concentração Hidráulica e Saneamento. São Carlos: 2006.
2. VIEIRA, F. F. **Modelagem Matemática em Sistemas Ambientais – Modelagem de Processos Biológicos**. Notas de Aula Fernando Fernandes Vieira. Paraíba: Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, 2010.
3. VIEIRA, F. F. **Modelagem Matemática em Sistemas Ambientais – unidade 1: Introdução**. Notas de Aula Fernando Fernandes Vieira. Paraíba: Universidade Estadual da Paraíba, Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, 2010.