

XII-045 - APLICAÇÃO DO MODELO DE MONOD NA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM REATOR BIOLÓGICO OPERANDO DE FORMA CONTÍNUA SEM RECICLO DE BIOMASSA

Abílio José Procópio Queiroz⁽¹⁾

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

Igor Souza Ogata

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

Pablo Luiz Fernandes Guimarães

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

Edson Cássio de Araújo Gomes

Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

Narcísio Cabral de Araújo

Graduando em Engenharia Sanitária e Ambiental pela Universidade Estadual da Paraíba – UEPB.

Endereço⁽¹⁾: Rua Rio de Janeiro, 77 – Liberdade – Campina Grande - Paraíba - CEP: 58414-080 - Brasil - Tel: +55 (83) 8730-3655 - e-mail: abiliojpq@hotmail.com.

RESUMO

A proposta desse trabalho foi modelar matematicamente, usando o modelo de Monod, na fórmula que determina a velocidade de crescimento celular, e a formulação de Leudeking e Piret, um biorreator operando em regime contínuo sem reciclo de biomassa, para determinação e estudo dos perfis das concentrações de biomassa, substrato e produtos. Para resolução numérica das equações foi utilizado o método de Ruge-Kutta e o aplicativo computacional Scilab 5.2. As condições originais trabalhadas foram: $V = 50$ L, $\mu_{MAX} = 0,5$ h⁻¹, $K_S = 0,25$ g/L, $Y_{XS} = 0,5$, $\alpha = 1,0$, $\beta = 0,5$ h⁻¹, $C_{XO} = 5,0$ g/L, $C_{SO} = 50,0$ g/L, $C_{PO} = 0,0$ g/L, $F = 25,0$ L/h, $C_{XF} = 1,0$ g/L, $C_{SF} = 10,0$ g/L e $C_{PF} = 0,0$ g/L. Foram variadas, cinco vezes a mais e cinco vezes a menos, para observação da influência dessas modificações no desenvolvimento do sistema, a vazão constante do reator F, as concentrações no fluxo constante do reator de biomassa e de substrato, respectivamente, C_{XF} e C_{SF} e arbitrados valores de concentração de produto C_{PF} , sendo essas feitas separadamente para que os resultados sejam o reflexo direto de cada uma. Nos resultados da modelagem, foi considerado como fator mais influente no comportamento do reator o valor da variável F, pois quando alto não permite a estabilização do reator e consumo do substrato, situação semelhante a que o C_{SF} tem valor elevado, e quando baixo funciona semelhante ao reator em batelada. A geração de biomassa foi maior quando entrou mais substrato no fluxo do reator, o que foi a melhor situação para formação de produto, também, e menor com o aumento de F, com influencia igual na formação de produto.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem Ambiental, Reator Contínuo sem Reciclo de Biomassa, Modelo de Monod.

INTRODUÇÃO

Temos modelo como uma abstração da realidade utilizada para se obter clareza conceitual, reduzindo a variedade e complexidade da situação real a um nível que se possa entender e representar (VIEIRA p. 2, 2010). Este pode ser físico e matemático.

A modelagem matemática de processos biológicos pode ser definida como 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 (RODRIGUES p. 3, 2006).

Os biorreatores são estruturas físicas onde as reações de consumo de substrato, crescimento de biomassa e formação de produtos é de ação, exclusiva, de microrganismos. Esses têm quatro tipos de operação: batelada, batelada alimentada, contínuo sem reciclo de biomassa e contínuo com reciclo de biomassa e circulação em série.

A operação de biorreatores no modo contínuo é caracterizada pela alimentação contínua do substrato a uma determinada vazão necessariamente constante, de modo que o volume do biorreator, após o período inicial de enchimento, permaneça constante (VIEIRA p. 48, 2010). O processo se inicia como batelada ou batelada alimentada até atingir a condição de volume constante, quando haverá o fluxo entrando e saindo. No caso de não haver recirculação de biomassa, nada do que passa pelo reator irá retornar ao mesmo, seguindo o fluxo no sentido do sistema.

Um dos primeiros modelos que relaciona a velocidade específica de crescimento e a concentração de substrato limitante, foi proposto por Monod (1942) (VIEIRA, p. 29, 2010). O modelo proposto por Monod é muito utilizado para a descrição cinética de processos biológicos, embora contenha uma simplificação acentuada dos fenômenos bioquímicos que estão ocorrendo no metabolismo celular (VIEIRA, p. 30, 2010). Com relação a formação de produtos, o modelo de Leudeking & Piret, combinando a velocidade específica de formação do produto associada e não associada a velocidade específica de crescimento, é muito aplicado (RODRIGUES p. 48, 2006).

Com base nesses conceitos e adotando concentrações iniciais de substrato C_{SO} , biomassa C_{XO} e produto C_{PO} , de 50 g/L, 5 g/L e 0 g/L, respectivamente, e os parâmetros cinéticos α de 1,0 e β de 0,50 h⁻¹, bem como μ_{MAX} igual a 0,5h⁻¹ e K_S igual a 0,25 g/L, o trabalho tem como objetivo a modelagem de um biorreator, de volume igual a 50 litros, operando em regime contínuo sem reciclo externo de biomassa, enfocando as influências da vazão constante do fluxo do reator F , da concentração de biomassa que entra no fluxo constante do reator C_{XF} , da concentração de substrato que entra no reator continuamente C_{SF} e da concentração de produto que entra de forma contínua no reator C_{PF} .

METODOLOGIA

O trabalho foi realizado com base em conhecimentos básicos de resolução de equações diferenciais ordinárias, operação em biorreatores operando de forma contínua sem reciclo de biomassa, do modelo de Monod e do modelo de Leudeking e Piret parcialmente associado, junto a ferramenta computacional Scilab versão 5.2 que é um software científico direcionado a parte numérica da computação, onde foi desenvolvido um código para simulação e resolução do problema.

Os valores das condições originais do sistema simulado foram: $V = 50$ L, $\mu_{MAX} = 0,5$ h⁻¹, $K_S = 0,25$ g/L, $Y_{XS} = 0,5$, $\alpha = 1,0$, $\beta = 0,5$ h⁻¹, $C_{XO} = 5,0$ g/L, $C_{SO} = 50,0$ g/L, $C_{PO} = 0,0$ g/L, $F = 25,0$ L/h, $C_{XF} = 1,0$ g/L, $C_{SF} = 10,0$ g/L e $C_{PF} = 0,0$ g/L.

Desta forma, os valores de F , C_{xf} e C_{sf} , foram variados, cinco vezes para mais e cinco vezes para menos, a fim de analisar o desenvolvimento do sistema com as mudanças dessas variáveis, em relação às concentrações de biomassa, substrato e produto, durante todo o tempo de fluxo contínuo, gerando novos gráficos para comparação com o inicial. Como produto era zero inicialmente, atribuímos valores para análise das diferentes situações.

Uma variável foi modificada por vez, permanecendo as outras em seu valor original, oferecendo suporte para que fosse associada à variação do resultado a variação de tal variável.

As equações 1, 2 e 3 foram utilizadas na modelagem dos perfis das concentrações de biomassa, substrato e produto, com apoio do método numérico Runge-Kutta de 4ª ordem e do aplicativo computacional Scilab 5.2 para implementação e resolução das equações.

$$\frac{dC_X}{dt} = D(C_{XF} - C_X) + \mu_{MAX} \frac{C_S}{K_S + C_S} C_X$$

equação (1)

$$\frac{dC_S}{dt} = D(C_{SF} - C_S) - \frac{1}{Y_{X/S}} \mu_{MAX} \frac{C_S}{K_S + C_S} C_X$$

equação (2)

$$\frac{dC_P}{dt} = D(C_{PF} - C_P) + \left[\alpha \left(\mu_{MAX} \frac{C_S}{K_S + C_S} C_X \right) + \beta \right] C_X$$

equação (3)

As equações diferenciais de C_X , C_S e C_P com relação ao tempo indicam, nessa ordem, os valores das concentrações de biomassa, substrato e produto.

Os resultados foram expressos em forma de gráficos.

RESULTADOS

Nas condições iniciais do reator funcionando de forma contínua sem reciclo de biomassa, o que pode ser observado na figura 1, existe um momento crítico, onde o substrato é totalmente consumido e a biomassa, juntamente com o produto, chega a um patamar de concentração máximo. Até esse momento o reator demonstra um funcionamento semelhante ao do reator em batelada, quando todos os reagentes são colocados de uma só vez no reator e só há retirada dos mesmos após um determinado tempo de reação (geralmente quando todo o substrato é consumido). Depois desse momento crítico há uma leve diminuição das concentrações de biomassa e produto, até a estabilização de ambos, o que é explicado pela dependência do crescimento da biomassa e geração de produto em relação ao substrato e a quantidade desses fatores que sai na vazão constante do reator, ou seja, a concentração de biomassa e produto para de crescer e ainda parte dessa concentração é retirada pelo fluxo contínuo do reator, diminuindo os valores de biomassa e produto. Quanto ao substrato, sua concentração aumenta um pouco e estabiliza naquele valor, pois não há biomassa suficiente para consumir a parcela de substrato que entra continuamente no reator.

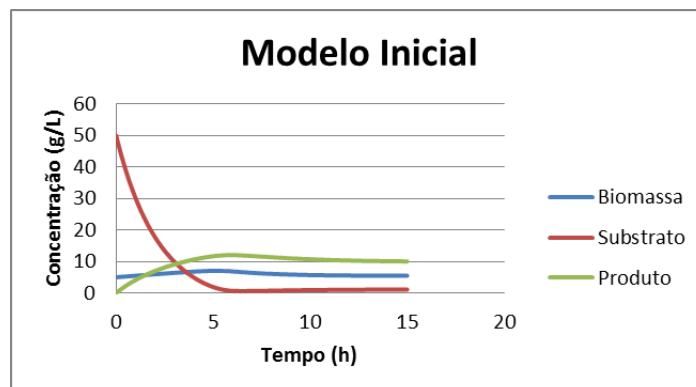


Figura 1 – Concentrações de Biomassa, Substrato e Produto, nas condições originais do reator.

A figura 2 mostra que aumentar a vazão F significa diminuir o tempo de detenção que uma partícula passa no reator, desta forma diminui bastante a concentração de biomassa e produto, pois o primeiro não tem tempo suficiente para se reproduzir e nem gerar produtos, a concentração de substrato estabiliza basicamente no valor do substrato que entra de forma contínua, pois com a quantidade de biomassa que tem no reator, juntamente ao pequeno tempo de detenção, quase não existe consumo do mesmo e o tempo para estabilizar os componentes do reator é menor, pois basicamente não existem variações nas concentrações das variáveis de estado, fenômeno chamado de lavagem do reator. Quando diminui o F , aumentando substancialmente o tempo de detenção, o reator se comporta analogamente a um reator em batelada, onde o substrato é totalmente consumido após um tempo e a biomassa cresce juntamente com o produto estabilizando-os quando o substrato zera, ocorrendo também de forma mais rápida que no modelo inicial.

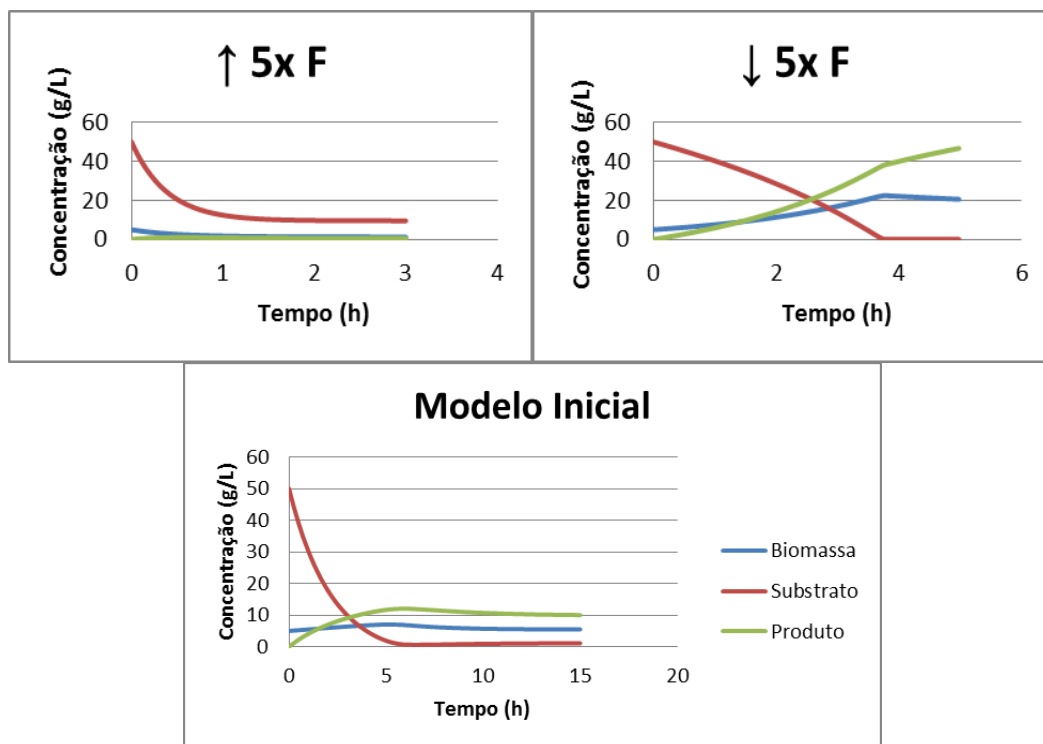


Figura 2 – Resultados das variações nos valores de F confrontados com os valores das condições originais.

Na figura 3 encontra-se a variação da concentração de biomassa que entra no fluxo constante do reator (C_{XF}). Ao aumentá-lo, a concentração de substrato não cresce mais depois do momento crítico, estabilizando-se em zero de forma mais rápida, e a concentração final de biomassa e produto aumentam. Isso ocorre porque há muitos indivíduos para se alimentar do substrato que tem no reator e que entra de forma contínua também formando mais produtos. Já ao diminuí-lo, no momento crítico o substrato não zera e vai aumentando gradativamente até chegar a superar o valor de biomassa, que permanece basicamente constante em todo o tempo que o reator funciona, e a concentração de produto é menor que na condição inicial do reator, também necessita de um tempo maior para as variáveis do reator estabilizarem. Isso é explicado pelo fato da quantidade de indivíduos ser pequena, não conseguindo consumir todo o substrato, e a quantidade de biomassa permanece constante porque a quantidade que é gerada sai pelo fluxo contínuo do reator, demorando mais tempo para as concentrações encontrarem um equilíbrio.

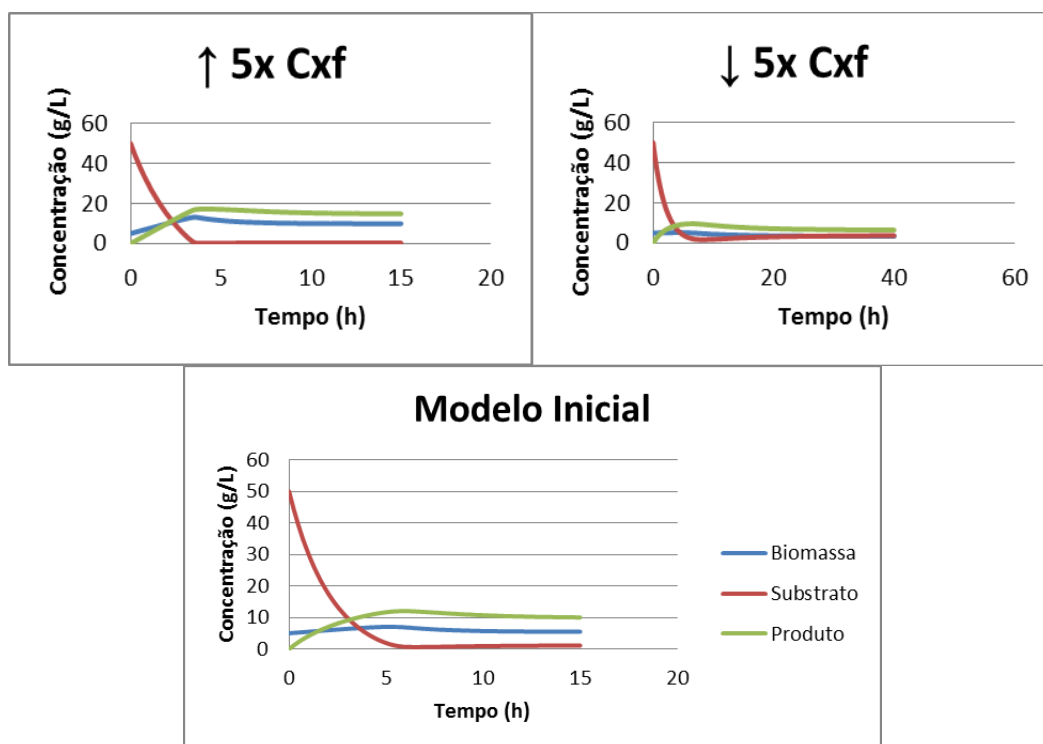


Figura 3 – Resultados das variações nos valores de C_{XF} confrontados com os valores das condições originais.

Ao variar a concentração de substrato que entra no reator continuamente (C_{SF}), figura 4, pode-se ver que, ao aumentá-lo, o substrato nunca é consumido totalmente, mesmo no momento crítico, e os valores de biomassa e produto aumentam também, bem como há um acréscimo significativo no tempo de estabilização do reator, uma vez que há muito substrato no reator a biomassa cresce rapidamente e gera bem mais produto. Contudo a quantidade de biomassa ainda não é suficiente para consumir todo o substrato. Já ao diminuí-lo, o substrato zera definitivamente no momento crítico e os valores de biomassa e produto diminuem depois do momento crítico, de forma mais rápida que o modelo inicial, pois a pequena concentração de substrato limita o crescimento da biomassa e geração de produto.

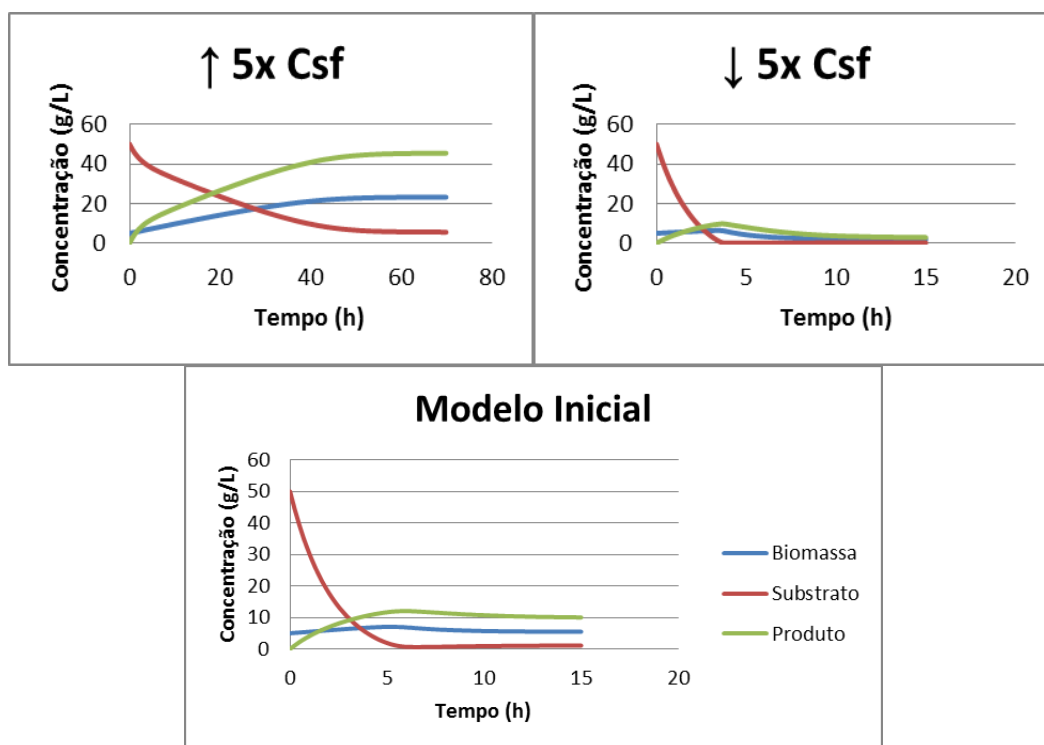


Figura 4 – Resultados das variações nos valores de C_{SF} confrontados com os valores das condições originais

Por fim, como exposto na figura 5, ao aumentar a concentração de produto que entra de forma contínua no reator (C_{PF}), que ao adicionar um determinado valor de produto no reator estamos acrescentando esse mesmo valor na concentração final de produto no reator, sem interferência nenhuma na produção de biomassa e consumo de substrato, o que é lógico já que o modelo de Monod não considera influência do produto no desenvolvimento do reator.

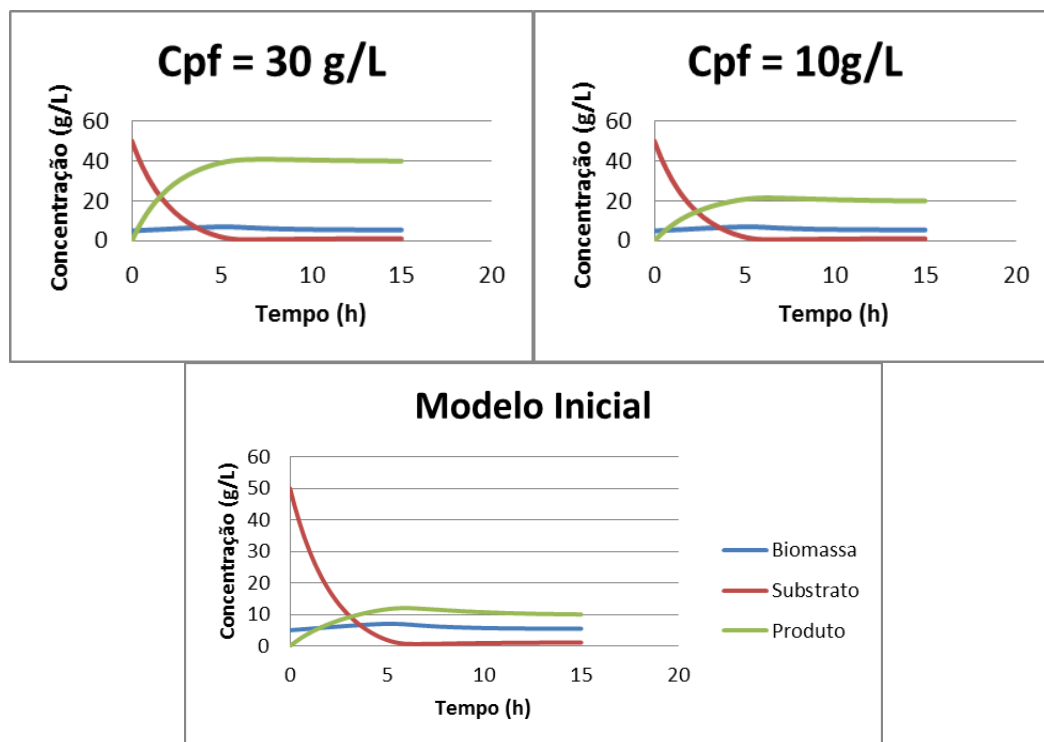


Figura 5 – Resultados das variações nos valores de C_{SF} confrontados com os valores das condições originais

CONCLUSÃO

A análise de um reator operando continuamente sem reciclo de biomassa leva em consideração um fator chave, que é a vazão que entra e sai seguidamente do reator F . Tal parâmetro irá influenciar muito no funcionamento do reator, fazendo com que ele estabilize mesmo sem ter consumido todo o substrato e com valores mínimos de biomassa e produto, diferindo de um reator operando em batelada, onde geralmente todo o substrato é consumido e existe uma formação maior de biomassa e produto.

Quando houver a necessidade de consumir substrato, de todas as situações analisadas a que obteve melhor resultado em menor tempo foi a diminuição de F , onde o reator se comportou no modelo de um reator em batelada, que como falado anteriormente, de forma geral, tem melhores valores de consumo de substrato. As piores situações foram o aumento de F e o próprio aumento de C_{SF} , onde no primeiro houve uma maior concentração final de substrato e no segundo houve muito tempo para o consumo mais de 50 horas para estabilizar, contudo é aceitável este acontecimento, pois mais substrato foi inserido no reator sem acréscimo de nenhum fator que aumente seu consumo como a quantidade de biomassa. Desta forma o fator que realmente influencia no processo de consumo de substrato é o F .

Quanto a ocasional geração de biomassa, o melhor resultado foi observado quando se aumentou a concentração de substrato que entra no fluxo contínuo do reator, pois, se há mais comida, mais indivíduos podem conviver em um mesmo espaço, e o pior resultado foi o aumento de F , onde o grande fluxo do reator não só impede o crescimento da biomassa (mesmo com a grande quantidade de substrato presente no reator), como ainda retira parte da biomassa inicial.

Finalmente, para uma possível geração de produto, o caso mais favorável foi o aumento de C_{SF} , onde a abundante concentração de substrato e biomassa gera como resultado o produto, e o pior caso é o aumento de F , explicado pelo impedimento de crescimento da biomassa no reator nessa situação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CASTILHO, José Eduardo. **Cálculo Numérico**. Minas Gerais: Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Matemática, 2001.
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.
4. 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.