

## **XII-043 - COMPORTAMENTO DE CONCENTRAÇÕES EM BIORREATORES DE ALIMENTAÇÃO CONTÍNUA, SEGUNDO MODELO BIOLÓGICO INIBIDO PELA PRESENÇA DE DETERMINADO PRODUTO**

**Hérculys Pessoa e Castro<sup>(1)</sup>**

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).

**Abílio José Procópio Queiroz**

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

**Edson Cássio Araujo Gomes**

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

**Igor Souza Ogata**

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

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Manoel Leite Cavalcante, 32 - Palmeira – Campina Grande - PB - CEP: 58401-000 - Brasil - Tel: (83) 8756-5103 - e-mail: [herculys.hpc@hotmail.com](mailto:herculys.hpc@hotmail.com)

### **RESUMO**

A modelagem de processos biológicos é uma ferramenta orientada ao projeto de plantas de tratamento de águas residuárias, treinamento de operadores, controle de processos biotecnológicos e detecção de falhas nesses processos. A expressão cinética de uso mais aceita para os modelos fenomenológicos é a do modelo de Monod, que expressa a variação da taxa de crescimento com a concentração de substrato. Existem modelos modificados de Monod, tais como o modelo de crescimento inibido pela presença de determinado produto do metabolismo, bem como, o modelo de Leudeking & Piret, combinando a velocidade específica de formação do produto associada e não associada à velocidade específica de crescimento biológico. Utilizando os últimos modelos citados, este trabalho tem por objetivo avaliar, através da modelagem matemática e simulação computacional, a influência da variação da concentração de substrato na alimentação; da concentração de biomassa início de operação; da vazão de alimentação; da taxa de recirculação e do fator de concentração, no perfil de concentrações de biomassa, substrato e produto, em um reator biológico operando de forma contínua com e sem reciclo externo de biomassa.

**PALAVRAS-CHAVE:** Modelagem matemática, Reatores biológicos, Influência da recirculação, Variação de Concentrações.

### **INTRODUÇÃO**

Os processos biológicos se desenvolvem através da atividade vital de microrganismos em meios de cultivo, havendo a transformação de certas substâncias em outras, podendo conduzir a resultados de interesse econômico (RODRIGUES, RATUSZNEI & DAMASCENO, 2006).

Os biorreatores, segundo Vicente (2008), são equipamentos no qual se realizam processos químicos que envolvem organismos ou substâncias bioquimicamente ativas derivadas de organismos, podendo ser anaeróbicos ou aeróbicos. Do ponto de vista dos modos de operação, um biorreator pode ser classificado como batelada, batelada alimentada ou operação contínua (IUPAC, 1992 apud VICENTE, 2008).

A modelagem de processos biológicos é uma ferramenta orientada ao projeto de plantas de tratamento de águas residuárias, treinamento de operadores, controle de processos biotecnológicos e detecção de falhas (RODRÍGUEZ, 2003).

Segundo Rodriguez (2003), entre os modelos aplicados na área biotecnológica, um deles é o fenomenológicos com conhecimento dos balanços de massa e energia, da cinética e das condições hidrodinâmicas do sistema.

O estudo cinético destes processos requer a escolha de quais substâncias consumidas e produzidas deverão ser consideradas, de quais métodos analíticos deverão ser utilizados para a quantificação destas substâncias além da medida de biomassa, responsável pelas reações (RODRIGUES, RATUSZNEI & DAMASCENO, 2006).

Em conformidade com Rodríguez (2003), a expressão cinética de uso mais aceito para os modelos fenomenológicos é a do modelo de Monod, que expressa a variação da taxa de crescimento com a concentração de substrato. Portanto existem outros modelos cinéticos citados nas literaturas, como por exemplo: os modelos modificados de Monod, tais como o modelo de Andrews, para processos com inibição pelo substrato (Perry, 1997 apud Rodríguez, 2003); modelo de crescimento inibido pela presença de determinado produto do metabolismo; e o modelo de Leudeking & Piret, combinando a velocidade específica de formação do produto associada e não associada à velocidade específica de crescimento (RODRIGUES, RATUSZNEI & DAMASCENO, 2006).

Nestas condições, este trabalho tem por objetivo avaliar, através da modelagem matemática e simulação computacional, a influência da variação da concentração de substrato na alimentação; da concentração de biomassa início de operação; da vazão de alimentação; da taxa de recirculação e do fator de concentração, em um reator biológico operando de forma contínua com e sem reciclo externo de biomassa.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Na execução deste trabalho utilizou-se o modelo de crescimento inibido pela presença de determinado produto do metabolismo. Já para a formação de produtos, o modelo de Leudeking & Piret. As equações 1 e 2 mostram a velocidade específica para as respectivas situações:

$$\mu = \mu_{\max} \left( \frac{K_1}{K + C_s} \right) \left( \frac{K_1}{K_1 + C_p} \right) \quad \text{equação (1)}$$

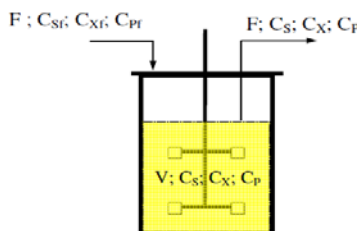
Onde:  $\mu$  – velocidade específica de crescimento celular (g-X/g-X.h);  
 $\mu_{\max}$  – velocidade específica máxima de crescimento celular ( $\text{h}^{-1}$ );  
 $K$  e  $K_1$  – constantes cinéticas (g/L); e  
 $C_p$  e  $C_s$  – concentração de produto e substrato (g-P/L e g-S/L), respectivamente.

$$\mu_p = \alpha \mu + \beta \quad \text{equação (2)}$$

Onde:  $\alpha$  e  $\beta$  - constantes cinéticas do modelo de Leudeking & Piret (adimensional e  $\text{h}^{-1}$ , respectivamente); e  
 $\mu_p$  – velocidade específica de formação de produto (g-P/g-X.h).

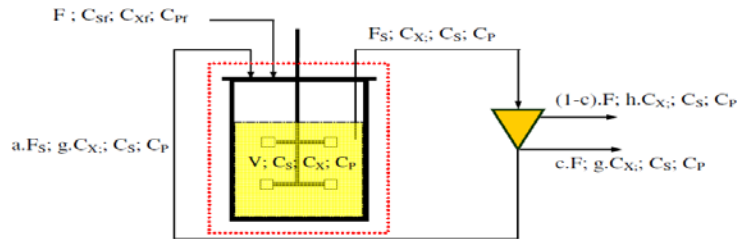
A operação dos biorreatores utilizados neste trabalho é caracterizada pela alimentação contínua do meio de cultivo a uma vazão de alimentação constante.

A figura 1 mostra o biorreator operando de modo contínuo sem o reciclo de biomassa, onde se admitiu que o biorreator fosse isotérmico com volume constante perfeitamente agitado.



**Figura 1: Esquema do biorreator contínuo sem o reciclo de biomassa.**  
**Fonte: Rodrigues, Ratusznei & Damasceno (2006).**

Já a figura 2 mostra o esquema do biorreator operando de modo contínuo com o reciclo externo da biomassa, onde se admitiu que este fosse isotérmico perfeitamente agitado, com o reciclo de biomassa realizado externamente através da utilização do sedimentador.



**Figura 02: Esquema do biorreator contínuo com reciclo externo de biomassa através do uso de um sedimentador.**

**Fonte: Rodrigues, Ratusznei & Damasceno (2006).**

Onde: F – vazão volumétrica de alimentação (L/h);  
 V – volume de meio no biorreator (L);  
 t – tempo do processo (h);  
 CX – concentração de biomassa (g-X/L);  
 CXf – concentração de biomassa na vazão de alimentação (g-X/L);  
 CS – concentração de substrato limitante (g-S/L);  
 CSf – concentração de substrato limitante na vazão de alimentação (g-S/L);  
 CP – concentração de produto genérico (g-P/L);  
 CPf – concentração de produto genérico na vazão de alimentação (g-P/L);  
 a – fração da vazão do líquido de saída do biorreator que é recirculado;  
 g – fator de concentração de CX obtido no elemento separador ( $g > 1$ );  
 c – fração do líquido efluente concentrado removida do biorreator após o mecanismo de separação;  
 h – fator de diluição da concentração celular obtido no líquido filtrado ( $h < 1$ ).

O balanço de massa das espécies químicas e biológicas presentes no meio de cultura é expresso através de um balanço de conservação da espécie química ou biológica segundo a equação (3):

$$\text{Acúmulo} = (\text{Entrada} + \text{Formação} - \text{Saída} - \text{Consumo}) \quad \text{equação (3)}$$

Aplicando a Equação (3), para a quantidade de biomassa no biorreator da figura 1, tem-se:

$$\frac{d(C_X V)}{dt} = F \cdot C_{Xf} + v_x \cdot V - F \cdot C_X \quad \text{equação (4)}$$

Definindo  $D = F/V$  como a vazão específica de alimentação e  $m = m_X = v_X/C_X$  a velocidade específica de crescimento, vem:

$$\frac{dC_X}{dt} = D \cdot (C_{Xf} - C_X) + \mu \cdot C_X \quad \text{equação (5)}$$

Onde:  $dC_X/dt$  - perfil de velocidade de crescimento celular.

Para o perfil de velocidade de consumo de substrato no biorreator contínuo sem reciclo de biomassa apresentado na figura 1 tem-se a seguinte equação:

$$\frac{dC_S}{dt} = D(C_{Sf} - C_S) - \frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \mu \cdot C_X \quad \text{equação (6)}$$

Onde:  $Y_{X/S}$  – fator de conversão de substrato à biomassa (g-X/g-S).

A equação (7), representa o perfil de velocidade de formação de produto no biorreator da figura 1.

$$\frac{dC_P}{dt} = D \cdot (C_{Pf} - C_P) + \mu_P \cdot C_X \quad \text{equação (7)}$$

Onde:  $\mu_P$  será dado pelo o modelo de Leudeking & Piret.

Fazendo-se o balanço material, em conformidade com a equação (3) para a quantidade de biomassa no biorreator contínuo com reciclo externo de biomassa através do uso do sedimentador, tem-se a equação (8) para o perfil de velocidade de crescimento celular.

$$\frac{dC_x}{dt} = \left( \mu - D \cdot \frac{1-\alpha \cdot q}{1-\alpha} \right) C_x \quad \text{equação (8)}$$

No biorreator da figura 2 o substrato e produto, são idênticos ao do biorreator sem reciclo (figura 1), pois novamente o sistema de separação é específico para a biomassa.

Após a definir essas equações, criou-se um código computacional, que satisfizesse a resolução das equações e a geração de gráficos que representassem as configurações dos comportamentos da biomassa, substrato e produto, dentro dos biorreatores.

Na tabela 1 estão ilustrados os dados utilizados como ponto de partida, para as simulações computacionais.

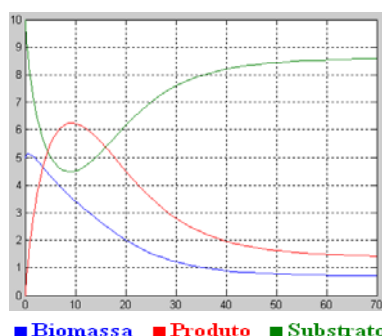
**Tabela 1: Dados iniciais utilizados nas simulações computacionais propostas neste trabalho.**

Parâmetros	Unidades	Valor	Parâmetros	Unidades	Valor
$\mu_{\max}$	$h^{-1}$	1,50	$C_{pf}$	g/L	0,0
$k_1$	g/L	2,0	$V$	L	50,0
$Y_{x/s}$	g/g	0,5	$F$	L/h	10,0
$K$	g/L	0,25	$C_x$	g/L	5,0
$\alpha$	-	0,1	$C_s$	g/L	10,0
$\beta$	$h^{-1}$	0,1	$C_p$	g/L	0,0
$C_{xf}$	g/L	0,0	$a$	%	20
$C_{sf}$	g/L	10,0	$g$	-	2

Visando-se verificar os comportamentos da biomassa, substrato e produto, dentro dos biorreatores, dobraram-se e dividiram-se esses valores.

## RESULTADOS E DISCURSÕES

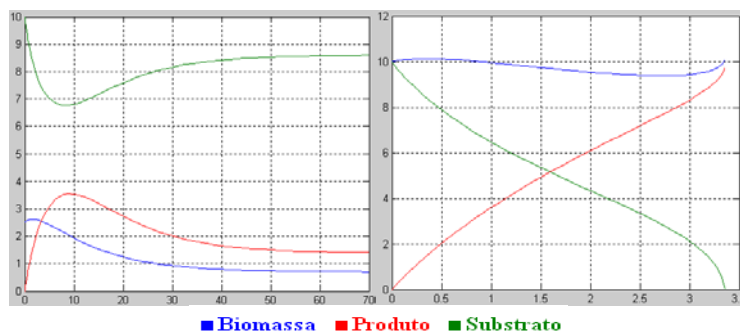
A figura 3, gerada pelos dados supracitados, mostra que há produção de biomassa nas primeiras horas do processo, provocando um consumo e acentuado de substrato, e consequente geração de produto. Com o passar do tempo, a biomassa não consegue digerir todo o substrato que entra no reator, levando a um aumento na concentração de substrato e causando efeito deletério na biomassa. Consequentemente, a medida que a concentração de biomassa decai, a geração de produto associada a mesma no modelo de Leudeking & Piret também decai. E cada vez que se consome menos, maior é a acumulação de substrato, até que se chegue a concentrações estáveis 70 horas depois do início do processo.



**Figura 3: Comportamento da Concentração (g/L) pelo tempo (horas) no reator sob condições iniciais.**

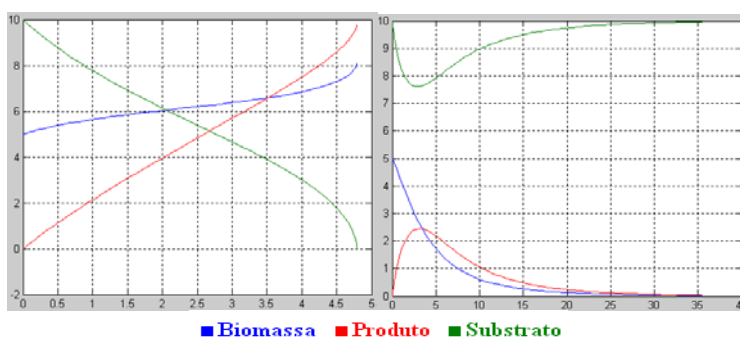
Se diminuirmos a concentração inicial de biomassa pela metade, podemos perceber que haverá um menor consumo inicial de substrato. No entanto as concentrações finais de biomassa, produto e substrato não serão alteradas, e se estabilizarão, também em 70 horas. Já se dobrarmos a concentração inicial de biomassa no

reator, ela irá consumir rapidamente todo o substrato. Podemos perceber também que a concentração da biomassa irá crescer oscilar, permanecendo em 10g/L ao fim do processo. Como mostra a figura 4



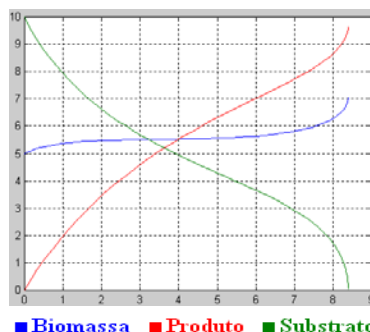
**Figura 4: Comportamento da Concentração (g/L) pelo tempo (horas) com a concentração inicial de Biomassa pela metade e dobrada, respectivamente.**

Se diminuirmos a vazão de alimentação pela metade, haverá um maior tempo de detenção do efluente no reator, portanto a biomassa terá mais tempo para consumir o substrato, não deixando que o mesmo se acumule no reator. Já se aumentarmos a vazão de alimentação, haverá uma lavagem do reator, sendo o efeito da biomassa inicial insignificante, pois com o passar do tempo, concentração de substrato que entra irá sair inerte. Como mostra a figura 5.



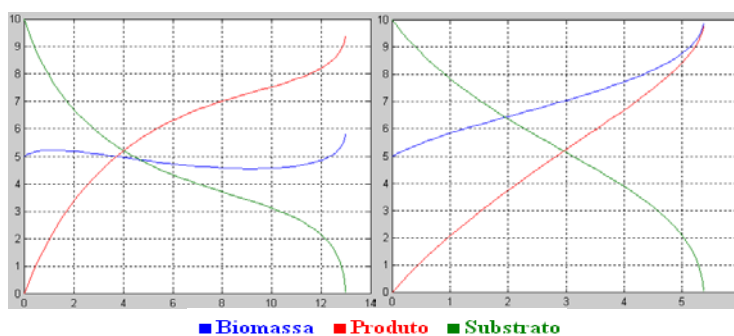
**Figura 5: Comportamento da Concentração (g/L) pelo tempo (horas) com a vazão de alimentação pela metade e dobrada, respectivamente.**

Se considerarmos um biorreator contínuo com as mesmas condições iniciais, porém com uma taxa de recirculação de 20% e um fator de concentração de 2, teremos a Figura 6. Diferentemente da Figura 3, a biomassa também estará entrando continuamente no processo, e conseguirá consumir todo o substrato que entra no mesmo.



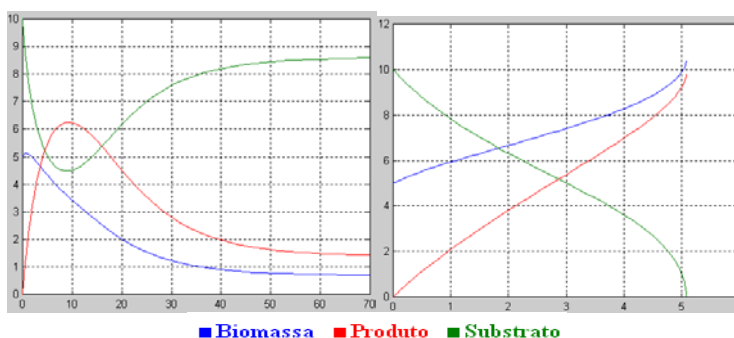
**Figura 6: Comportamento da Concentração (g/L) pelo tempo (horas) em um biorreator contínuo com recirculação de 20% e fator de concentração 2.**

Se diminuirmos ou aumentarmos a taxa de recirculação podemos perceber que a biomassa terá uma taxa de crescimento menor e maior, respectivamente, e levará maior tempo ou menor tempo para consumir o substrato. Como mostra a figura 7.



**Figura 7: Comportamento da Concentração (g/L) pelo tempo (horas) com a taxa de recirculação de 10% e 40%, respectivamente.**

Se variarmos o fator de concentração para 1( um), o efluente de recirculação terá a mesma concentração que sai do biorreator, não apresentando influencia significativa no processo, portanto o reator se comportará igual aquele sem recirculação. Já se dobrarmos o fator de concentração de 2 para 4, a concentração de biomassa no reator irá ascender rapidamente, o que levará a um consumo mais rápido do substrato. Como Mostra a figura 8.



**Figura 8: Comportamento da Concentração (g/L) pelo tempo (horas) com o fator de concentração de 1 e 4, respectivamente.**

## CONCLUSÕES

Podemos perceber que a relação entre quantidade de biomassa e substrato irá ser determinante em dois comportamentos possíveis, ou o substrato é consumido totalmente, ou a biomassa é inibida. Recomenda-se que análises mais aprofundadas determinem o ponto de corte desses comportamentos. Com base nos resultados expostos acima, pode-se considerar a modelagem matemática um bom instrumento para a simulação do comportamento de biorreatores, pois através de simulações, pode-se constatar relações ideais de concentrações iniciais de substrato e biomassa, com vista a otimizar o processo no reator, economizando tempo e recursos financeiros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RODRIGUES, J. A. D; RATUSZNEI, S. M. & DAMASCENO, L. H. S. ANÁLISE DE PROCESSOS BIOLÓGICOS. Escola de Engenharia de São Carlos - PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2006.
2. RODRÍGUEZ, J. E. N. DESENVOLVIMENTO DE UM SENSOR POR SOFTWARE PARA AVALIAÇÃO DE BIOMASSA EM REATORES ANAERÓBIOS. 2003. 80f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis/SC.
3. VICENTE, B. G. G. L. Z. MODELAGEM DO TRANSPORTE DE O<sub>2</sub> EM UM BIOREATOR PARA CULTIVO DE CÉLULA ANIMAL. 2008. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado à Escola de São Carlos – Universidade de São Carlos/SP.