



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE SISTEMAS BIOLÓGICOS (SISTEMA DE LODO ATIVADO)

ALUNO: Aretho de Oliveira Barbosa

Campina Grande

Fevereiro de 2007

PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MODELAGEM DE SISTEMAS BIOLÓGICOS
(SISTEMA DE LODO ATIVADO)

*Relatório apresentado à coordenação de Graduação
de Engenharia Elétrica da UFCG, em cumprimento parcial
às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

ALUNO

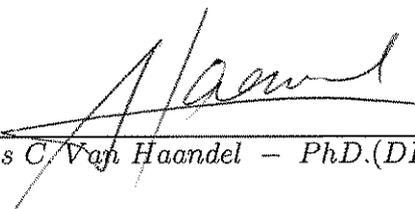


Aretho de Oliveira Barbosa

ORIENTADOR



Péricles Rezende Barros – PhD.(DEE/CEEI/UFCG)



Adrianus C. Van Haandel – PhD.(DEC/CCT/UFCG)

Campina Grande

Fevereiro de 2007



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, a toda minha família, em especial a meus pais: José Valdeck Barbosa e Magnolia de Oliveira Barbosa que sempre estiveram ao meu lado em todos os momentos dessa caminhada.

Agradeço também aos meus amigos, principalmente Thiago Antonio e André Luis pelo apoio que me deram no decorrer do projeto.

Agradeço ainda pelo apoio dos professores Péricles Rezende Barros e Adrianus C. Van Haandel.

Sumário

1	Objetivos	8
2	Introdução	8
3	O Modelo IAWQ N^o1	9
3.1	Processos de Remoção de Poluentes	10
3.1.1	Remoção de Matéria Orgânica	11
3.1.2	Nitrificação e Desnitrificação	11
3.2	As Variáveis de Estado do Modelo	12
3.2.1	Matéria Orgânica	12
3.2.2	Matéria Nitrogenada	14
3.2.3	Oxigênio Dissolvido	14
3.2.4	Alcalinidade	15
3.3	Parâmetros do Modelo	15
3.4	Processos do Modelo	15
3.4.1	Crescimento da Biomassa	16
3.4.2	Decaimento da Biomassa	18
3.4.3	Amonificação de Nitrogênio Orgânico	18
3.4.4	Hidrólise de material orgânico e nitrogenado capturados no biofloco	18
3.5	Construção do Modelo	19
3.6	Restrições do Modelo	22
4	Modelo de um Sistema de Tratamento de Esgotos Simples	24
4.1	Objetivos	24
4.2	A Planta do Sistema de Tratamento de Esgotos Simulada	24
4.3	Sedimentação Ideal	25
4.4	Algoritmo Numérico	28

5	Simulador de um Reator Biológico Simplificado	28
5.1	Interface Gráfica	29
5.2	Resultados	33
6	Conclusões	36
	Referências	37

Lista de Figuras

1	Caracterização da matéria orgânica.	13
2	Caracterização da matéria nitrogenada.	14
3	Matriz do modelo IAWQ N ^o 1.	20
4	Layout da planta de tratamento de esgotos simulada	24
5	Tela inicial do simulador.	30
6	Abas para alteração de parâmetros.	31
7	Plot das variáveis.	32
8	Reset de variáveis.	32
9	Mensagem de erro.	33
10	Concentração de Substrato - Matlab.	33
11	Concentração de Substrato - simulador.	33
12	Concentração de Nitrato - Matlab.	34
13	Concentração de Nitrato - simulador.	34
14	Concentração de Amônia - Matlab.	34
15	Concentração de Amônia - simulador.	34
16	Concentração de Oxigênio - Matlab.	34
17	Concentração de Oxigênio - simulador.	34
18	Concentração de Biomassa Ativa Heterotrófica - Matlab.	34
19	Concentração de Biomassa Ativa Heterotrófica - simulador.	34
20	Concentração de Biomassa Ativa Autotrófica - Matlab.	34
21	Concentração de Biomassa Ativa Autotrófica - simulador.	34

Lista de Tabelas

1	Variáveis de estado do modelo IAWQ N ⁰ 1	10
2	Parâmetros cinéticos e estequiométricos do modelo.	16
3	Caracterização do afluente.	25
4	Dados físicos da planta.	25
5	Seleção de valores dos parâmetros.	26

1 Objetivos

Deseja-se com a realização deste projeto colocar o aluno em contato direto com o recurso matemático da modelagem, afim de verificar o comportamento de um sistema simplificado de um reator biológico.

Concluída a etapa de modelagem o aluno terá ainda que desenvolver um simulador que possibilite ao operador do sistema fazer algumas simulações. Alterando os parâmetros utilizados, este poderá verificar o que muda no comportamento do sistema de lodo ativado caso uma determinada situação venha ocorrer na prática, podendo com isto fazer as manobras necessárias para o bom desempenho do mesmo.

2 Introdução

A modelagem matemática é utilizada em vários ramos da ciência como uma forma de entender e descrever a realidade. No entanto, no mundo real deve ser entendido que um modelo é sempre uma simplificação da realidade. Isto é especialmente verdadeiro quando tenta-se modelar sistemas naturais contendo organismos vivos, como é o caso de sistemas de tratamento de esgotos baseados no processo de lodo ativado [4].

A modelagem é uma ferramenta utilizada para a investigação do comportamento de um sistema sem necessariamente a sua realização prática. Segundo [4] para sistemas de tratamento de esgotos são duas as limitações práticas principais:

- os custos para a construção de um planta em escala real ou mesmo em escala piloto;
- as constantes de tempo do sistema são lentas e além deste fato, apresentam grande diferença de ordem (de muitos dias),

As limitações práticas listadas acima implicam no aumento da necessidade do uso de modelos matemáticos.

Além disso, existem ainda alguns pontos importantes que podem ser observados ao se trabalhar com os modelos matemáticos [4]:

- explorar o impacto da variação de parâmetros na planta;
- projetar plantas que alcancem os objetivos desejados com custos mínimos;
- desenvolver e testar hipóteses e portanto aumentar o conhecimento sobre o processo;
- desenvolver novas estratégias de controle através da investigação da resposta do sistema a diferentes entradas e variações nos parâmetros;
- prever o desenvolvimento da planta quando exposta a situações adversas e prover uma base para testar ações de contrapartida;
- prover pesquisadores com uma ferramenta capaz de explorar novas idéias e aumentar a aprendizagem sobre o processo;
- treinar os operadores de plantas, aumentando sua capacidade de avaliar e reagir a situações adversas.

O modelo matemático mais utilizado no estudo de sistemas de tratamento de esgotos baseado no processo de lodo ativado é o modelo IAWQ N⁰1. Este modelo surgiu da união dos três processos principais da modelagem de sistemas de tratamento de esgotos: remoção de matéria orgânica, nitrificação e remoção de nitrogênio através da desnitrificação biológica.

São duas as unidades dos sistemas de tratamento de esgotos a serem modeladas. Uma delas é o reator biológico, a outra é o decantador. Em geral essas duas unidades trabalham em conjunto, sendo que o decantador apresenta um interesse especial para a modelagem, pois é responsável pela remoção e recirculação dos sólidos do sistema, sendo um dos processos físicos mais importantes para o bom desempenho do sistema como um todo.

3 O Modelo IAWQ N⁰1

O modelo IAWQ N⁰1 tem como principal objetivo prever o desempenho de sistemas de lodo ativado capazes de realizar as tarefas de oxidação da matéria orgânica, nitrificação e

desnitrificação. Com este modelo torna-se possível realizar simulações de sistemas de lodo ativado sendo analisado assim o seu comportamento perante os diversos cenários antes da sua implementação.

Como pode ser visto na Tabela 1, o este modelo faz uso de 13 variáveis de estado. Segundo a nomenclatura da IAWQ, os componentes solúveis são indicados pelo símbolo S e os insolúveis pelo símbolo X . Já os componentes individuais são indicados subscritos a estes símbolos.

Componente	Descrição
S_I	Matéria orgânica solúvel inerte
S_S	Substrato rapidamente biodegradável
X_I	Matéria orgânica particulada inerte
X_S	Substrato lentamente biodegradável
X_{BH}	Biomassa heterotrófica ativa
X_{BA}	Biomassa autotrófica ativa
X_P	Produtos particulados resultantes do decaimento da biomassa
S_O	Oxigênio dissolvido
S_{NO}	Nitrato e nitrito
S_{NH}	Amônia
S_{ND}	Nitrogênio orgânico solúvel biodegradável
X_{ND}	Nitrogênio orgânico particulado biodegradável
S_{ALK}	Alcalinidade

Tabela 1: Variáveis de estado do modelo IAWQ N⁰¹

A seguir serão descritos de maneira sucinta os processos responsáveis pela remoção dos poluentes do esgoto, as variáveis de estado que compõem o modelo, os processos fundamentais incorporados no modelo com a apresentação das suas expressões de taxa de variação.

3.1 Processos de Remoção de Poluentes

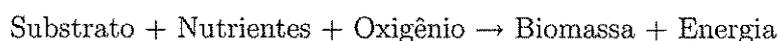
Os principais poluentes presentes nos esgotos são a matéria orgânica e os nutrientes (nitrogênio e fósforo). A remoção destes materiais é de extrema importância para evitar o comprometimento ou mesmo a morte dos corpos receptores. Como o modelo IAWQ N⁰¹ não foi desenvolvido para remoção de fósforo, aqui serão apenas descritos os processos

para remoção da matéria orgânica e de nitrogênio . A remoção de fósforo é descrita no modelo IAWQ N^o2 [4].

3.1.1 Remoção de Matéria Orgânica

Após alguns estudos, Arden e Lockett verificaram em 1914 que a aeração de águas residuárias promovia a remoção de material orgânico e a formação de flocos macroscópicos de microorganismos na forma de um lodo biológico, ao qual foi dado o nome de *lodo ativado*, sendo então responsável por acelerar o processo de remoção.

A composição do lodo é formada por bactérias, fungos, algas e protozoários. O substrato e nutrientes presentes no meio são utilizados pelas bactérias para o seu crescimento e como fonte de energia. Esse processo pode ser assim descrito [4]:

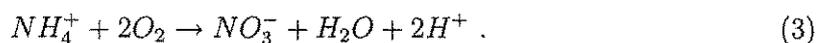


3.1.2 Nitrificação e Desnitrificação

O processo de remoção de nitrogênio é realizado através da nitrificação e da desnitrificação, sendo estes realizados de maneira seqüencial. A nitrificação trata da oxidação biológica de amônia tendo como produto final o nitrato. Para tal processo são utilizadas bactérias específicas e é executado em duas etapas: primeiramente a amônia é oxidada para nitrito através da ação bioquímica de bactérias do gênero *Nitrossomonas*¹; na etapa seguinte ocorre oxidação de nitrito para nitrato, sendo este processo mediado por bactérias do tipo *Nitrobacter*² [5]:

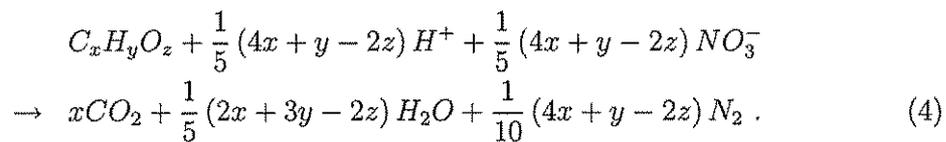


A combinação dessas duas etapas, 1 e 2, resulta em:



É válido ainda ressaltar que em ambos os casos, as *Nitrossomonas* e *Nitrobacter* somente desenvolvem atividade bioquímica na presença de oxigênio dissolvido.

A desnitrificação por sua vez trata da redução biológica de nitrato para nitrogênio molecular, usando para isto material orgânico como redutor. Considerando uma fórmula geral estrutural $C_xH_yO_z$ para o material orgânico, a desnitrificação pode ser descrita pela equação (4):



De acordo com a equação acima, a desnitrificação ocorre somente em ambiente anóxico, ou seja, sem a presença de oxigênio. Desta forma, para que haja remoção biológica do nitrogênio é necessário que se submeta o lodo a períodos alternados de presença e ausência de oxigênio, isto é, o reator biológico utilizado para remoção de nitrogênio se divide em zonas aeradas, onde ocorre nitrificação, e zonas não aeradas, onde se desenvolve a desnitrificação [5].

3.2 As Variáveis de Estado do Modelo

As variáveis de estado no modelo IAWQ N⁰¹ podem ser divididas em quatro classes:

- Matéria Orgânica;
- Matéria Nitrogenada;
- Oxigênio Dissolvido;
- Alcalinidade.

3.2.1 Matéria Orgânica

Existem algumas classificações pertinentes à matéria orgânica. No que se trata da sua biodegradabilidade ela pode ser classificada como biodegradável e não-biodegradável. Já

quando se trata da solubilidade da matéria orgânica, esta pode ser solúvel ou particulada. A unidade escolhida para expressar a matéria orgânica foi $mgDQO/l$, já que a DQO (Demanda Química de Oxigênio) permite uma ligação entre o substrato, a biomassa e o oxigênio utilizado, e ainda facilita o balanço de massa. A figura abaixo representa a caracterização da matéria orgânica de acordo com essas classificações:

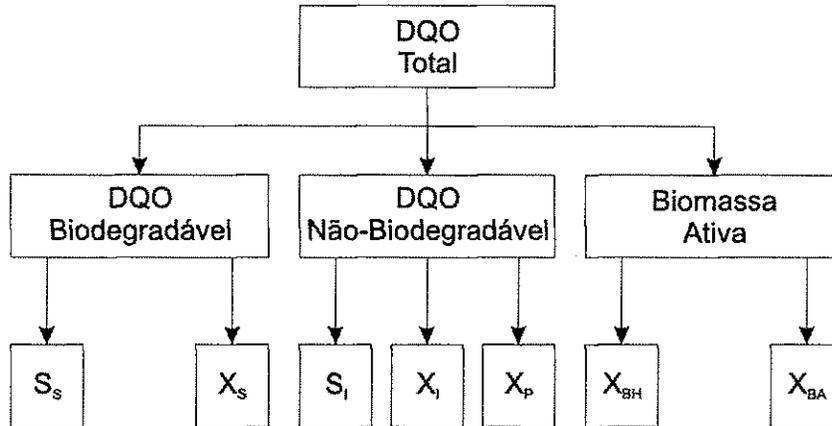


Figura 1: Caracterização da matéria orgânica.

Existe ainda uma subdivisão da matéria orgânica biodegradável em rapidamente biodegradável (S_s) e lentamente biodegradável (X_s). A matéria dita rapidamente biodegradável é constituída de moléculas relativamente simples que são absorvidas diretamente pela biomassa heterotrófica, enquanto que a lentamente biodegradável é formada por moléculas mais complexas que precisam ser quebradas através de enzimas antes de serem absorvidas. Este processo é chamado de hidrólise [4].

Já a matéria orgânica não-biodegradável é dividida em três frações, sendo as duas primeiras biologicamente inertes passando pelo sistema sem serem afetadas (uma solúvel (S_l) e outra particulada (X_l)) e a terceira (X_p) resulta da fração do decaimento da biomassa ativa que é inerte a outros ataques biológicos. Verifica-se ainda que enquanto S_l deixa o sistema com a mesma concentração de entrada, X_l e X_p são incorporadas ao lodo ativado e deixam o sistema apenas através do descarte de lodo.

Existe ainda na matéria orgânica uma categoria de microorganismos que constituem a

biomassa. Esta divide-se em biomassa heterotrófica (X_{BH}) e biomassa autotrófica (X_{BA}).

3.2.2 Matéria Nitrogenada

A matéria nitrogenada, cuja unidade é mgN/l , assim como a matéria orgânica, pode ser dividida em biodegradável e não-biodegradável. No que diz respeito à fração biodegradável, fração particulada é associada com a fração particulada da matéria orgânica, enquanto que a solúvel por se apresentar em quantidades irrisórias, em geral não é incorporada ao modelo.

De acordo com a Figura 2, a fração biodegradável é dividida em amônia (S_{NH}), nitrogênio solúvel (S_{ND}) e nitrogênio particulado (X_{ND}). Já o nitrito e o nitrato são considerados como sendo uma única variável (S_{NO}) no intuito de simplificar o modelo.

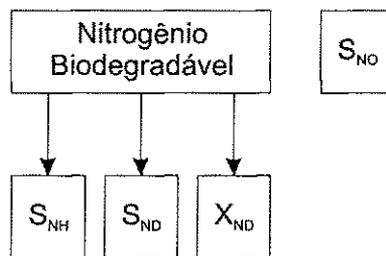
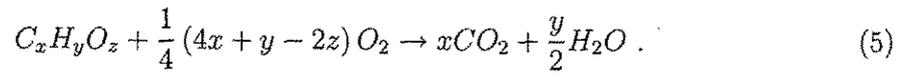


Figura 2: Caracterização da matéria nitrogenada.

3.2.3 Oxigênio Dissolvido

O oxigênio dissolvido (S_O) é o responsável pela oxidação e posterior conversão da matéria orgânica em compostos simples e inertes, tais como a água e o gás carbônico. Assim sendo, ele desempenha um papel fundamental no processo de tratamento de esgotos. Sua unidade é expressa em $-mgDQO/l$.

A oxidação da matéria orgânica é tida como o principal fator de consumo de oxigênio, o que está relacionado à respiração dos microorganismos decompositores, principalmente as bactérias heterotróficas aeróbicas. A seguir verifica-se a equação simplificada da oxidação da matéria orgânica:



3.2.4 Alcalinidade

A incorporação da alcalinidade (S_{ALK} expressa em $mols(HCO_3)/l$) no modelo não é de fato um procedimento essencial, mas sim desejável, pois é através da alcalinidade que mudanças inesperadas no pH podem ser previstas.

3.3 Parâmetros do Modelo

A partir da análise da matriz do modelo IAWQ N^o1 notar-se-á que são necessários 19 parâmetros para descrever o modelo, dos quais 14 são parâmetros cinéticos relacionados com as taxas de variação dos processos fundamentais enquanto os outros 5 são parâmetros relacionados com a estequiometria do modelo, como pode ser visto na Tabela 2.

É sabido que alguns destes parâmetros variam muito pouco de esgoto para esgoto sendo então considerados constantes. Já outros podem sofrer variações consideráveis. Daí a necessidade de desenvolvimento de métodos para identificação e estimação de variáveis de estado não-mensuráveis e de parâmetros do modelo.

3.4 Processos do Modelo

Para um melhor entendimento do que ocorre no sistema de tratamento de esgotos pelo processo do lodo ativado, o modelo utilizado é subdividido em quatro processos principais:

- Crescimento da biomassa;
- Decaimento da biomassa;
- Amonificação de nitrogênio orgânico;
- Hidrólise de material orgânico e nitrogenado capturados no biofloco.

Descrição	Parâmetro
Produção heterotrófica	Y_H
Produção autotrófica	Y_A
Fração da biomassa produzindo produtos particulados	f_P
N/DQO na biomassa	i_{XB}
N/DQO nos produtos da biomassa	i_{XP}
Taxa de crescimento específica máxima heterotrófica	$\hat{\mu}_H$
Taxa de decaimento heterotrófica	b_H
Coefficiente de meia saturação heterotrófica	K_S
Coefficiente de meia saturação heterotrófica do oxigênio	K_{OH}
Coefficiente de meia saturação do nitrato para desnitrificação heterotrófica	K_{NO}
Taxa de crescimento específica máxima autotrófica	$\hat{\mu}_A$
Taxa de decaimento autotrófica	b_A
Coefficiente de meia saturação autotrófica do oxigênio	K_{OA}
Coefficiente de meia saturação autotrófica da amônia	K_{NH}
Fator de correção para crescimento anóxico heterotrófico	η_g
Taxa de amonificação	k_a
Taxa máxima específica de hidrólise	k_h
Coef. de meia sat. para hidrólise de substrato lentamente biodegradável	K_X
Fator de correção para hidrólise anóxica	η_h

Tabela 2: Parâmetros cinéticos e estequiométricos do modelo.

3.4.1 Crescimento da Biomassa

O processo de crescimento da biomassa é melhor entendido quando subdividido em três outros processos. De acordo com [3], vem:

Crescimento Aeróbico de Heterotróficos:

O crescimento aeróbico de bactérias heterotróficas é um dos principais processos de remoção de matéria orgânica e produção de biomassa. Através deste processo o substrato rapidamente biodegradável é consumido resultando na produção de biomassa heterotrófica associada a utilização de oxigênio. Amônia é removida da solução e incorporada a massa celular e uma variação na alcalinidade também é associada ao processo. Este processo é descrito pela equação (6).

$$\rho_1 = \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) X_{BH}. \quad (6)$$

As concentrações de S_S e S_O são limitantes para o processo na forma de funções de

saturação do tipo Monod, responsável por indicar a relação existente entre o crescimento do substrato e a taxa de crescimento específica da concentração de microorganismos, a qual por sua vez é subdividida em quatro etapas[1]:

- Fase de retardo - não é observado o crescimento do número células;
- Fase de crescimento exponencial - crescimento exponencial da concentração de microorganismos limitado pelo substrato;
- Fase estacionária - ocorre um equilíbrio entre a concentração de microorganismos e o substrato;
- Fase de decaimento - o número de células decai devido a escassez de "alimento" (substrato).

Crescimento Anóxico de Heterotróficos:

Assim como no caso anterior, no crescimento anóxico de bactérias heterotróficas, o substrato rapidamente biodegradável é consumido, resultando na produção de biomassa heterotrófica, além da conversão de amônia em nitrogênio orgânico e da variação na alcalinidade. Ocorre neste caso porém a utilização de nitrato ao invés de oxigênio, desde que este componente inexista em meios anóxicos. A expressão da taxa de crescimento anóxico é semelhante à de crescimento aeróbico, mas devido à máxima taxa de crescimento ser menor em condições anóxicas ou ainda pelo fato de que apenas uma fração da biomassa heterotrófica ser capaz de funcionar com nitrato como aceptor de elétrons, um fato de correção é introduzido ($\eta_g < 1$).

$$\rho_2 = \hat{\mu}_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \eta_g X_{BH}. \quad (7)$$

Crescimento Aeróbico de Autotróficos:

$$\rho_3 = \hat{\mu}_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{OA} + S_O} \right) X_{BA}. \quad (8)$$

No caso em que há um crescimento aeróbico das bactérias autotróficas a amônia é oxidada para nitrato através da nitrificação o que resulta na produção de biomassa autotrófica e num consumo associado de oxigênio, além da variação na alcalinidade. Em contrapartida, uma pequena quantidade é incorporada à biomassa, e neste caso, as concentrações limitantes são S_{NH} e S_O .

3.4.2 Decaimento da Biomassa

Decaimento de Autotróficos:

O modelamento do decaimento heterotrófico é baseado na hipótese de morte-regeneração de Dold *et al.*, assumindo-se que continua com a mesma taxa independente do meio. A medida que os microorganismos morrem, são transformados em substrato lentamente biodegradável, material particulado e nitrogênio orgânico particulado [4]:

$$\rho_4 = b_H X_{BH}. \quad (9)$$

Decaimento de Heterotróficos:

O decaimento heterotrófico ocorre da mesma forma que no caso anterior, a única diferença entre eles é que a magnitude do coeficiente de decaimento de bactérias heterotróficas é bem maior que o de bactérias autotróficas.

$$\rho_5 = b_A X_{BA}. \quad (10)$$

3.4.3 Amonificação de Nitrogênio Orgânico

$$\rho_6 = k_a S_{ND} X_{BH}. \quad (11)$$

Neste processo o nitrogênio orgânico solúvel biodegradável é convertido em amônia através de bactérias heterotróficas o que resulta numa variação da alcalinidade.

3.4.4 Hidrólise de material orgânico e nitrogenado capturados no biofloco

Hidrólise de Matéria Orgânica Capturada:

Este processo ocorre apenas em condições aeróbicas ou anóxicas, onde a matéria orgânica lentamente biodegradável é quebrada produzindo substrato rapidamente biodegradável. Para condições anóxicas, a taxa de hidrólise é reduzida por um fator $\eta_h < 1$.

$$\rho_7 = k_h \left(\frac{\left(\frac{X_S}{X_{BH}} \right)}{K_X + \left(\frac{X_S}{X_{BH}} \right)} \right) \left[\left(\frac{S_O}{K_{OH} + S_O} \right) + \eta_h \left(\frac{K_{OH}}{K_{OH} + S_O} \right) \left(\frac{S_{NO}}{K_{NO} + S_{NO}} \right) \right] X_{BH}. \quad (12)$$

Hidrólise de Nitrogênio Orgânico Capturado:

$$\rho_8 = \rho_7 \left(\frac{X_{ND}}{X_S} \right). \quad (13)$$

Neste processo o nitrogênio orgânico é quebrado em nitrogênio orgânico solúvel a uma taxa proporcional a da hidrólise de matéria orgânica lentamente biodegradável.

3.5 Construção do Modelo

O modelo IAWQ N^o1 é baseado no balanço da DQO do sistema e é expresso na sua forma original através da matriz apresentada na Figura 3. Os 13 componentes do modelo são apresentados na primeira linha através de símbolos e na última pelo seu nome. Na primeira e última colunas são indicados os processos apresentados na seção anterior, que expressam as conversões ou transformações que afetam os componentes do modelo. Os elementos da matriz correspondem aos coeficientes estequiométricos, v_{ij} , que ajustam as relações de massa entre os componentes nos processos individuais.

O balanço de massa de cada componente em um sistema de lodo ativado é obtido através da seguinte equação:

$$\text{Variação} = \text{Entrada} - \text{Saída} + \text{Reação}.$$

Os termos de entrada e saída são dependentes da estrutura física da planta, mas o termo da reação de cada componente do modelo pode ser encontrado somando-se os produtos dos coeficientes estequiométricos (v_{ij}) pelas expressões das taxas dos processos (ρ_i) sendo então tais relações encontradas a partir da equação (14).

$$R_i = \sum_j \nu_{ij} \rho_j \quad (14)$$

Componente	<i>i</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Taxas do processo: ρ_j	
<i>j</i>	Processo	S_I	S_N	X_I	X_N	$X_{B,H}$	$X_{B,A}$	X_N	S_{O_2}	S_{NO}	S_{NH}	S_{ND}	X_{ND}	S_{NHX}		
1	Crescimento aeróbico de heterotróficos		$-\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{XB}$			$-\frac{i_{XB}}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) X_{B,H}$	
2	Crescimento anóxico de heterotróficos		$\frac{1}{Y_H}$			1			$-\frac{1-Y_H}{2.86Y_H}$		$-i_{XB}$			$\frac{1-Y_H}{14}$	$\mu_H \left(\frac{S_S}{K_S + S_S} \right) \left(\frac{S_{ND}}{K_{ND} + S_{ND}} \right) \eta_H X_{B,H}$	
3	Crescimento aeróbico de autotróficos						1		$\frac{4.57}{Y_A} + 1$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{XB} - \frac{1}{Y_A}$			$\frac{i_{XB}}{14} - \frac{1}{7Y_A}$	$\mu_A \left(\frac{S_{NH}}{K_{NH} + S_{NH}} \right) \left(\frac{S_O}{K_{O,A} + S_O} \right) X_{B,A}$	
4	Decaimento de heterotróficos				$1-f_p$	-1		f_p					$i_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_H X_{B,H}$	
5	Decaimento de autotróficos				$1-f_p$		-1	f_p					$i_{XB} - f_p i_{XP}$		$b_A X_{B,A}$	
6	Amonificação de nitrogênio solúvel orgânico										1	-1		$\frac{1}{14}$	$k_A S_{ND} X_{B,H}$	
7	Hidrólise de matéria orgânica capturada		1		-1										$k_1 \frac{X_S / X_{B,H}}{K_X + (X_S / X_{B,H})} \left(\frac{S_O}{K_{O,H} + S_O} \right) + \eta_1 \left(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H} + S_O} \right) \left(\frac{S_{ND}}{K_{O,H} + S_{ND}} \right) X_{B,H}$	
8	Hidrólise de nitrogênio orgânico capturado											1	-1		$\rho_T (X_{ND} / X_S)$	
Taxas de conversão observadas		$r_i = \sum_j \nu_{ij} \rho_j$								$r_i = \sum_j \nu_{ij} \rho_j$						
Parâmetros estequiométricos: Produção heterotrófica Y_H Produção autotrófica Y_A Fração da biomassa produzindo produtos particulados f_p NDQO na biomassa i_{XB} NDQO nos produtos da biomassa i_{XP}		Matéria orgânica solúvel inerte	Substrato rapidamente biodegradável	Matéria orgânica particulada inerte	Substrato lentamente biodegradável	Biomassa heterotrófica ativa	Biomassa autotrófica ativa	Produtos resultantes do decaimento da biomassa	Oxigênio dissolvido	Nitrato e nitrato	Amonia	Nitrogênio orgânico solúvel biodegradável	Nitrogênio orgânico particulado biodegradável	Alcalinidade	Parâmetros cinéticos: Crescimento e decaimento heterotróficos: $\mu_H, K_S, K_{O,H}, K_{O,H}, b_H$ Crescimento e decaimento autotróficos: $\mu_A, K_{NH}, K_{O,A}, b_A$ Fator de correção para crescimento anóxico de heterotróficos η_H Amonificação: k_A Hidrólise: k_1, K_X Fator de correção para hidrólise anóxica: ρ_T	

Figura 3: Matriz do modelo IAWQ N⁰1.

Observamos contudo que para o primeiro e terceiro componentes (S_I e X_I) não existe nenhum coeficiente estequiométrico, já que estes não estão envolvidos em nenhum processo de conversão. Assim, a reação para estes componentes é nula,

$$R_{S_I} = 0, \quad (15)$$

$$R_{X_I} = 0. \quad (16)$$

O substrato rapidamente biodegradável (S_S) é removido pelo crescimento de biomassa

heterotrófica tanto em ambiente aeróbico como anóxico e é formada pela hidrólise de material orgânico. Portanto, temos:

$$R_{S_S} = -\frac{1}{Y_H} (\rho_1 + \rho_2) + \rho_7. \quad (17)$$

O substrato lentamente biodegradável (X_S) é removido pela hidrólise e formado pelo decaimento de biomassa heterotrófica e autotrófica [4],

$$R_{X_S} = (1 - f_P) (\rho_4 + \rho_5) - \rho_7. \quad (18)$$

A biomassa heterotrófica por sua vez é formada pelo crescimento em ambiente aeróbico e anóxico e a autotrófica pelo crescimento apenas em um ambiente anóxico, sendo ambas destruídas pelo decaimento,

$$R_{X_{BH}} = \rho_1 + \rho_2 - \rho_4, \quad (19)$$

$$R_{X_{BA}} = \rho_3 - \rho_5. \quad (20)$$

A formação de produtos particulados inertes se dá pelo decaimento de biomassa,

$$R_{X_P} = f_P (\rho_4 + \rho_5). \quad (21)$$

O oxigênio dissolvido é utilizado apenas quando ocorre o crescimento de biomassa em ambiente aeróbico. Essa reação é normalmente chamada de TCO (Taxa de Consumo de Oxigênio), sendo um dos parâmetros de grande importância para indicação da remoção da matéria orgânica,

$$R_{S_O} = -\left(\frac{1 - Y_H}{Y_H}\right) \rho_1 - \left(\frac{4.57 - Y_A}{Y_A}\right) \rho_3. \quad (22)$$

A concentração de nitrato aumenta através do crescimento aeróbico da biomassa heterotrófica pelo processo de nitrificação e diminui através do crescimento anóxico da biomassa autotrófica pelo processo de desnitrificação,

$$R_{SNO} = -\left(\frac{1 - Y_H}{2.86Y_H}\right)\rho_2 + \frac{1}{Y_A}\rho_3. \quad (23)$$

A amônia é formada pela amonificação de nitrogênio solúvel orgânico e removido pelo crescimento de biomassa,

$$R_{SNH} = -i_{XB}(\rho_1 + \rho_2) - \left(i_{XB} + \frac{1}{Y_A}\right)\rho_3 + \rho_6. \quad (24)$$

O nitrogênio orgânico solúvel é formado pela hidrólise de nitrogênio orgânico particulado e convertido para amônia pelo processo de amonificação,

$$R_{SND} = -\rho_6 + \rho_8. \quad (25)$$

Já a concentração de nitrogênio orgânico particulado aumenta com o decaimento de biomassa e diminui através do processo de amonificação,

$$R_{XND} = (i_{XB} - f_P i_{XP})(\rho_4 + \rho_5) - \rho_8. \quad (26)$$

Finalmente, a alcalinidade é influenciada pelos processos de crescimento aeróbico e anóxico e pela amonificação,

$$R_{SALK} = -\frac{i_{XB}}{14}\rho_1 + \left(\frac{1 - Y_H}{14 \cdot 2.86Y_H} - \frac{i_{XB}}{14}\right)\rho_2 - \left(\frac{i_{XB}}{14} + \frac{1}{7Y_A}\right)\rho_3 + \frac{1}{14}\rho_6. \quad (27)$$

3.6 Restrições do Modelo

O modelo IAWQ N⁰1 possui algumas restrições, sendo elas as seguintes [4]:

1. Temperatura constante. Para ajustar os parâmetros do modelo variáveis com a temperatura uma equação de Arrhenius pode ser usada.
2. O pH é constante e próximo a neutralidade. A inclusão da alcalinidade no modelo permite o usuário detectar problemas potenciais com o controle de pH.
3. Os coeficientes cinéticos nas taxas dos processos são constantes.

4. Os efeitos de limitações de nitrogênio, fósforo e outros nutrientes inorgânicos na remoção de substrato orgânico e no crescimento celular não foram considerados.
5. Os fatores de correção para nitrificação (η_g e η_h) são fixos e constantes.
6. Os coeficientes para nitrificação são constantes.
7. A biomassa heterotrófica é homogênea, não apresenta variação na diversidade das espécies com o tempo.
8. A incorporação de matéria orgânica particulada na biomassa é instantânea.
9. Hidrólise de matéria orgânica e nitrogênio orgânico são acopladas e ocorrem simultaneamente com a mesma taxa.
10. O tipo de acceptor de elétrons não afeta a perda de biomassa ativa pelo decaimento.

Além das restrições acima citadas, alguns fatores a mais devem ser garantidos para que as simulações tenham utilidade prática, pois nem tudo que é modelado matematicamente pode ser realizado. São eles:

1. A idade do lodo, ou seja, o tempo médio de permanência do lodo no sistema, deve estar numa faixa que permita o desenvolvimento de uma biomassa floculenta. Valores aceitos para a idade do lodo devem estar compreendidos entre 3 e 30 dias, fora desta faixa há um comprometimento para a sedimentabilidade do lodo.
2. A fração de volume não aerada do reator não deve exceder 50%, pois as características de sedimentabilidade podem ser deterioradas.
3. A intensidade de mistura do reator aeróbico deve ser proporcional a potência gasta por unidade de volume para a transferência de oxigênio. Intensidades de mistura excessivas ($> 240s^{-1}$) ocasionam uma má sedimentação do lodo.

4 Modelo de um Sistema de Tratamento de Esgotos Simples

4.1 Objetivos

O objetivo principal com esta atividade é que ao final dela será possível efetuar a modelagem e simulação de modelos simples de estações de tratamento de esgotos utilizando uma ferramenta computacional antes mesmo da construção de uma planta real, ou verificar se o comportamento de uma planta já em operação está condizente com a teoria.

4.2 A Planta do Sistema de Tratamento de Esgotos Simulada

O layout da planta utilizada nesta atividade está representada pela Figura 4. Verifica-se portanto que se trata de um sistema simples formado por apenas um reator biológico e com recirculação de parte do esgoto.

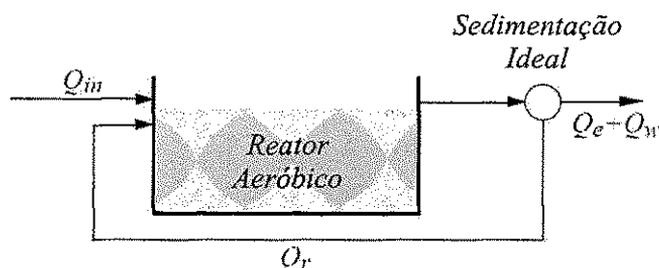


Figura 4: Layout da planta de tratamento de esgotos simulada

A planta acima é especialmente projetada para a remoção de DQO e nitrificação. O fluxo do material particulado (X) é descrito na Figura 4, enquanto que para os componentes dissolvidos $S = S_{out}$, sendo que este não é afetado pelo processo de sedimentação ideal.

Considera-se que o afluente da estação de tratamento foi previamente caracterizado e os resultados encontram-se na Tabela 3. Os dados físicos da planta estão na Tabela 4. As equações que descrevem as diferentes reações no reator aeróbico estão indicados na

matriz do modelo IAWQ N⁰1, Figura 3. Os valores dos parâmetros a serem utilizados na simulação encontram-se na Tabela 5 (assumir que a temperatura do afluente é 20°C).

Considerando que a planta é equipada com um sistema automático de controle de oxigênio capaz de manter constante a concentração de oxigênio no reator biológico independente da quantidade de substrato e microorganismos presentes. O valor de oxigênio assumido é de 2 mg O₂/l (equivalente a 2 mg (-DQO/l)). Isto significa que não há necessidade de representação do comportamento do oxigênio através de uma equação diferencial, portanto basta apenas inserir o valor 2 mg(-DQO)/l onde requerido no modelo.

Parâmetro		Valor
Fluxo do afluente	Q_{in}	20.000 m ³ /dia
DQO (solúvel)	$S_{S,in}$	600 mg DQO/l
Amônia	$S_{NH,in}$	30 mg N/l
Nitrato	$S_{NO,in}$	1 mg N/l
Biomassa heterotrófica	$X_{B,H,in}$	20 mg DQO/l
Biomassa autotrófica	$X_{B,A,in}$	5 mg DQO/l
Concentração de oxigênio	$S_{O,in}$	0 mg (-DQO)/l

Tabela 3: Caracterização do afluente.

Volume do reator	V	4.000 m ³
Grau de recirculação	r	50% (de Q_{in})

Tabela 4: Dados físicos da planta.

4.3 Sedimentação Ideal

Para facilitar a modelagem e conseqüentemente a simulação deste processo, assumimos que a sedimentação do processo pode ser descrita satisfatoriamente por um processo que apresente sedimentação ideal.

Na sedimentação ideal assume-se que o sistema é capaz de produzir um lodo cuja espessura é capaz de manter uma concentração no reator biológico necessária para especificação da idade do lodo. A idade do lodo é normalmente definida como:

$$\theta_s = \frac{V \cdot X}{Q_e \cdot X_e + Q_w \cdot X_w} \quad (28)$$

Parâmetros do modelo IAWQ	Símbolo	Unidade	20°C	10°C	Literatura
<i>Parâmetros estequiométricos</i>					
Produção heterotrófica	Y_H	g célula DQO formado (g DQO oxidado) ⁻¹	0,67	0,67	0,38 - 0,75
Produção autotrófica	Y_A	g célula DQO formado (g N oxidado) ⁻¹	0,24	0,24	0,07 - 0,28
Fração da biomassa produzindo produtos particulados	f_P	adimensional	0,08	0,08	-
N/DQO na biomassa	i_{XB}	g N (g DQO) ⁻¹ na biomassa	0,086	0,086	-
N/DQO nos produtos da biomassa	i_{XP}	g N (g DQO) ⁻¹ na massa endógena	0,06	0,06	-
<i>Parâmetros cinéticos</i>					
Taxa de crescimento específica máxima heterotrófica	$\hat{\mu}_H$	dia ⁻¹	6,0	3,0	0,6 - 13,2
Taxa de decaimento heterotrófica	b_H	dia ⁻¹	0,62	0,20	0,05 - 1,6
Coefficiente de meia saturação heterotrófica	K_S	g DQO m ⁻³	20	20	5 - 255
Coefficiente de meia saturação heterotrófica do oxigênio	K_{OH}	g O ₂ m ⁻³	0,20	0,20	0,01 - 0,20
Coefficiente de meia saturação do nitrato para desnitrificação heterotrófica	K_{NO}	g NO ₃ -N m ⁻³	0,50	0,50	0,1 - 0,5
Taxa de crescimento específica máxima autotrófica	$\hat{\mu}_A$	dia ⁻¹	0,80	0,30	0,2 - 1
Taxa de decaimento autotrófica	b_A	dia ⁻¹	0,20	0,10	0,05 - 0,2
Coefficiente de meia saturação autotrófica do oxigênio	K_{OA}	g O ₂ m ⁻³	0,4	0,4	0,4 - 2,0
Coefficiente de meia saturação autotrófica da amônia	K_{NH}	g NH ₃ -N m ⁻³	1,0	1,0	-
Fator de correção para crescimento anóxico heterotrófico	η_g	adimensional	0,8	0,8	0,6 - 1,0
Taxa de amonificação	k_a	m ³ (g DQO dia) ⁻¹	0,08	0,04	-
Taxa máxima específica de hidrólise	k_h	g lentamente biodegradável DQO (g célula DQO dia) ⁻¹	3,0	1,0	-
Coef. de meia sat. para hidrólise de substrato lentamente biodegradável	K_X	g lentamente biodegradável DQO (g célula DQO) ⁻¹	0,03	0,01	-
Fator de correção para hidrólise anóxica	η_h	adimensional	0,4	0,4	-

Aretho de Oliveira Barbosa Tabela 5: Seleção de valores dos parâmetros.

onde o índice e significa efluente e w descarte. Naturalmente o balanço de massa é descrito pela equação (29):

$$(Q_{in} + Q_r).X = Q_r.X_r + Q_w.X_w + Q_e.X_e \quad (29)$$

sendo $X_r = X_w$ (r indica retorno) e X é a concentração total de material particulado no reator. Através da equação do balanço de massa podemos então obter a seguinte expressão para a idade do lodo:

$$\theta_S = \frac{V.X}{(Q_{in} + Q_r).X - Q_r.X_r} \quad (30)$$

Eliminando a dependência apresentada na equação da concentração do efluente, utilizamos o fator γ , que indica a relação entre X_r e X que indica quanto o crescimento da concentração de todos os componentes particulados presentes no lodo de recirculação é afetado pela quantidade de microorganismos presentes no processo:

$$\gamma = \frac{X_r}{X} = \frac{(Q_{in} + Q_r - \frac{V}{\theta_S})}{Q_r} \quad (31)$$

Ainda em relação à sedimentação ideal em processos sem muita sofisticação, como é o caso da planta analisada, uma nova consideração deve ser feita: $X_e = 0$, já que desejava-se definir uma aproximação para Q_w e a sedimentação ideal não garante que o lodo de descarte e o lodo que sai do sistema através do efluente é de fato todo o lodo que deixa o sistema. Assim, vem:

$$Q_w = \frac{V}{\theta_S \cdot \gamma} \quad (32)$$

$$X_w = \gamma \cdot X \quad (33)$$

Uma outra característica da sedimentação ideal é a de que os componentes dissolvidos e os componentes particulados permanecem separados. O material particulado bem como o dissolvido pode ser expelido do sistema ou recirculado. No entanto, as concentrações

dos componentes dissolvidos são as mesmas no reator biológico, no efluente e no esgoto de recirculação.

4.4 Algoritmo Numérico

Existem várias ferramentas matemáticas e computacionais disponíveis hoje em dia que facilitam bastante simulações de processos reais, tais sistemas biológicos. Uma das aproximações numéricas mais utilizadas é a aproximação de Euler. Com ela é possível aproximar uma equação diferencial através de uma tangente baseada em apenas dois valores conhecidos:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{X(kh + h) - X(kh)}{h} \quad (34)$$

onde h é o passo de cálculo e k é o integrador. Sendo os valores iniciais conhecidos e as equações diferenciais discretas obtidas a partir do modelo estudado, obtivemos a implementação do modelo utilizando dois softwares o Matlab® e o Microsoft Visual Studio®, este último por sua vez foi utilizado no intuito de elaborar um simulador com interface gráfica afim de disponibilizá-lo para que outras pessoas possam vir a estudar este tipo de sistema sem maiores complicações.

5 Simulador de um Reator Biológico Simplificado

No intuito de verificar a eficácia do modelo do sistema de tratamento de esgotos pelo método do lodo ativado acima descrito, inicialmente implementamos as equações do modelo IAWQ N^o1 no Matlab® sem a preocupação de elaborar uma interface gráfica, apenas gerando gráficos de saída que apresentassem o comportamento de algumas variáveis do sistema ao longo do tempo sendo considerados os valores iniciais e os dados físicos da planta disponíveis nas Tabelas 3 e 4 respectivamente.

Após esta primeira etapa do projeto, surgiu então a idéia de desenvolver um simulador com uma interface gráfica amigável, possibilitando ao usuário uma maior flexibilidade e facilidade ao simular o comportamento de reatores biológicos com a estrutura apresentada

anteriormente.

A plataforma escolhida para o desenvolvimento deste software foi o Visual Studio® da Microsoft sendo utilizado o C# como linguagem de programação, que é uma linguagem orientada a objeto e disponibiliza diversas ferramentas facilitando principalmente a elaboração da interface gráfica do software. Além disso, já existia uma classe desenvolvida no Laboratório de Instrumentação Eletrônica e Controle (LIEC) nesta mesma linguagem que trabalha diretamente com plotagem de gráficos a partir de dados gerados por simulações e armazenados em um arquivo. O software foi desenvolvido utilizando como base em [2], onde estão dispostas as principais funcionalidades desta linguagem, bem como as ferramentas disponíveis no Visual Studio®.

5.1 Interface Gráfica

A interface gráfica do software desenvolvido é bastante simples o que torna possível o estudo do comportamento do sistema modelado por pessoas que não possuem nenhum conhecimento prévio sobre programação, o que seria muito mais difícil no caso de se trabalhar diretamente com o Matlab®.

Na Figura 5 observamos a interface gráfica do software projetado. Nesta tela inicial podemos verificar que há um campo chamado *Parâmetros* onde aparecem todas as variáveis do sistema modelado passíveis de alteração.

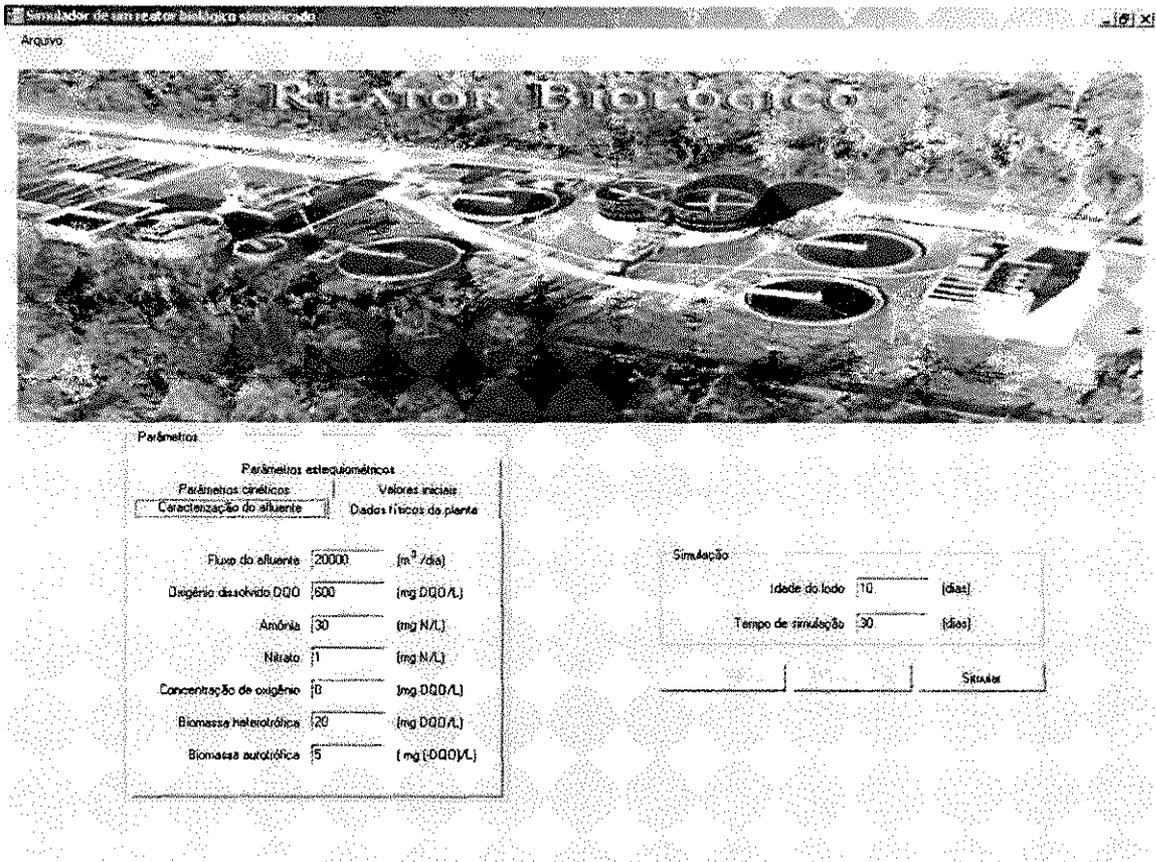


Figura 5: Tela inicial do simulador.

Clicando em cada uma das abas disponíveis nesse campo, navegamos sobre as distintas categorias de variáveis. Observamos também que cada variável já inicia a simulação setada com um valor padrão como pode ser visto na Figura 6. Nesta mesma tela há também a possibilidade de mudar as configurações físicas da planta, que assim como as variáveis do sistema também iniciam a simulação com valor default, isto permite que o sistema seja executado sem qualquer alteração, bastando para isto clicar no botão *Simular*.

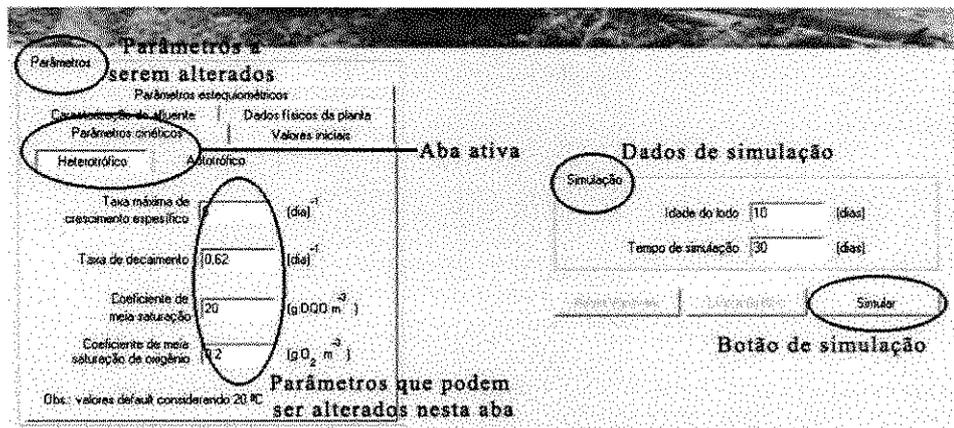


Figura 6: Abas para alteração de parâmetros.

Após clicar no botão *Simular* aparece na tela, na mesma posição onde inicialmente aparecia a imagem de uma estação de tratamento, um espaço reservado para o plot das variáveis de interesse, onde no campo esquerdo temos disponível o espaço específico para o plot, e na direita estão listadas as variáveis carregadas sendo que podem ser visualizadas uma ou mais variáveis simultaneamente, Figura 7.

Pode ainda ser observado que ao ser gerado o gráfico, o botão *Limpar Gráfico* fica habilitado, o qual possibilita voltar para a tela anterior.

Como pode ser observado na Figura 8 o botão *Reset Variáveis* fica ativo quando da alteração de algum parâmetro. Com ele é possível restabelecer os valores padrões para os parâmetros da simulação.

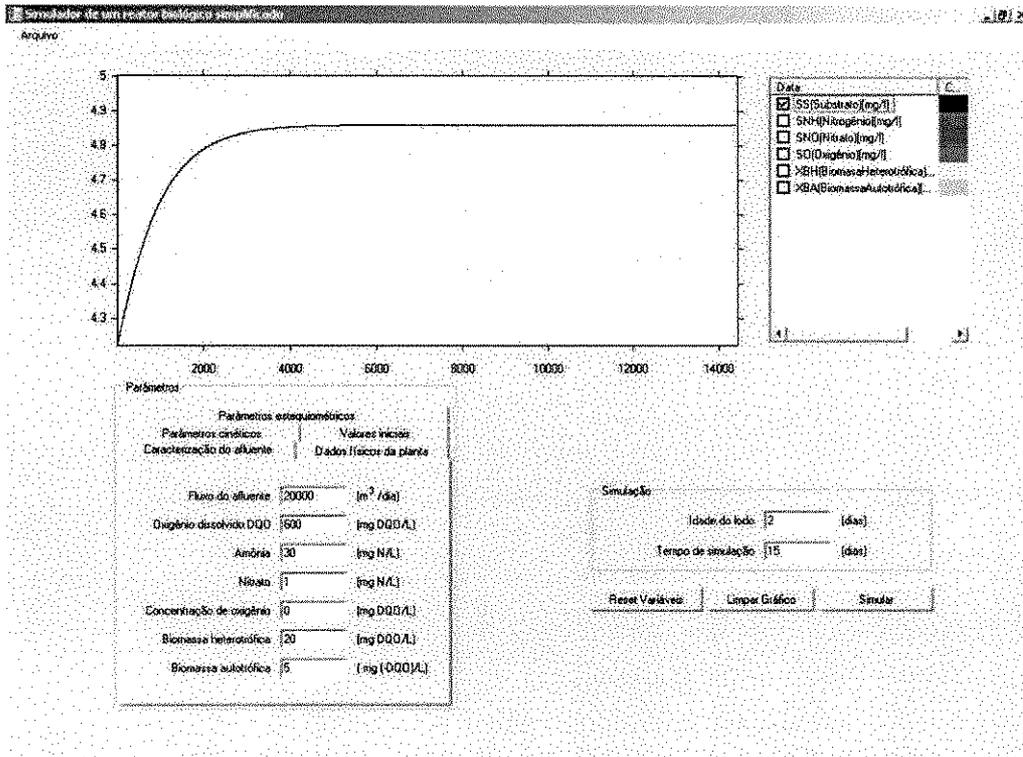


Figura 7: Plot das variáveis.

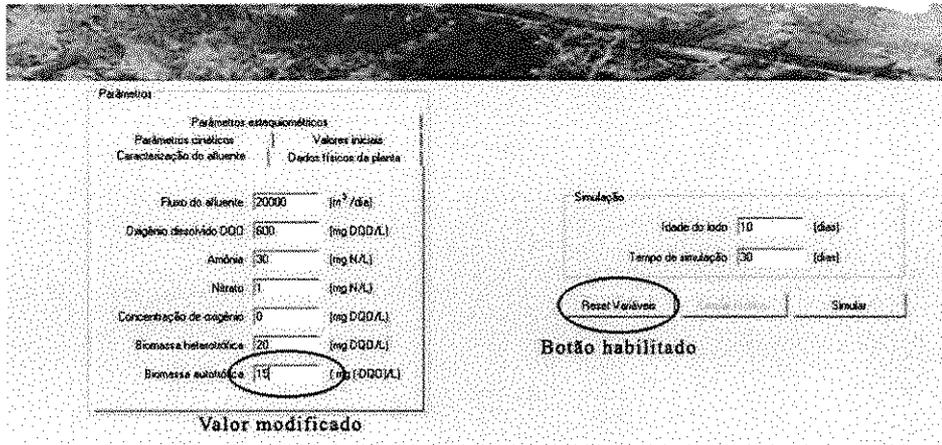


Figura 8: Reset de variáveis.

Quando ao menos uma variável está fora dos limites de operação do sistema, uma

mensagem de erro aparece indicando o ocorrido a simulação então fica desabilitada até que as variáveis que apresentem problemas sejam corrigidas. A tela que indica a ocorrência de um erro de entrada de dados pode ser vista na Figura 9.

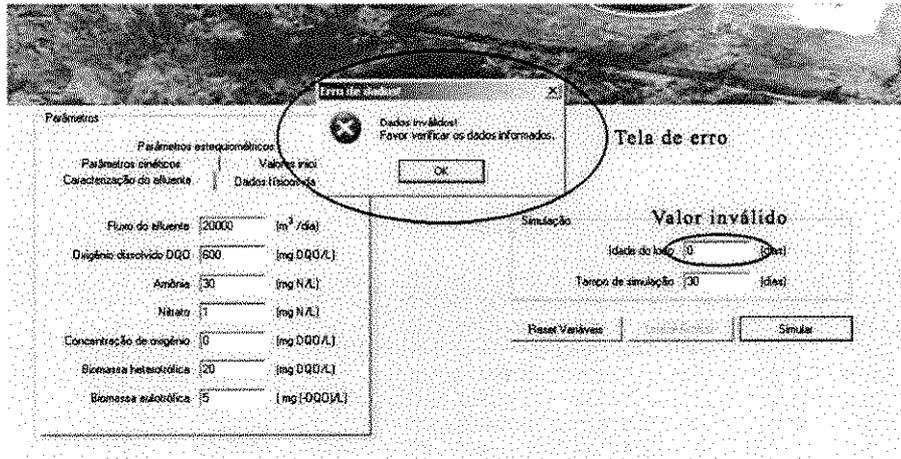


Figura 9: Mensagem de erro.

Por fim, foi implementado um menu *Arquivo* através do qual é possível finalizar o programa.

5.2 Resultados

O sistema modelado foi simulado utilizando duas plataformas: Matlab® e o Simulador projetado em C#. Os resultados obtidos em ambas simulações encontram-se indicados nas figuras abaixo, sendo que os parâmetros das simulações foram mantidos os mesmos em ambos os casos estabelecendo assim uma linha de comparação entre o funcionamento do software desenvolvido face aos resultados apresentados pelo Matlab®.

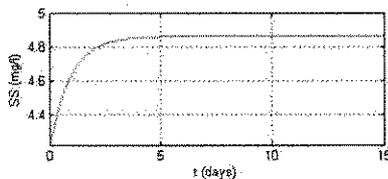


Figura 10: Concentração de Substrato - Matlab.

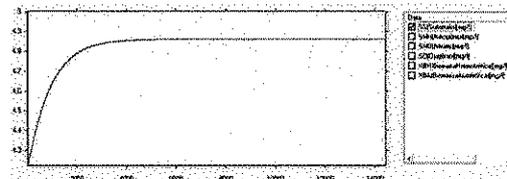


Figura 11: Concentração de Substrato - simulador.

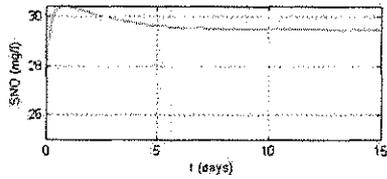


Figura 12: Concentração de Nitrato - Matlab.

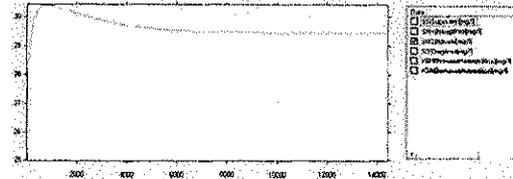


Figura 13: Concentração de Nitrato - simulador.

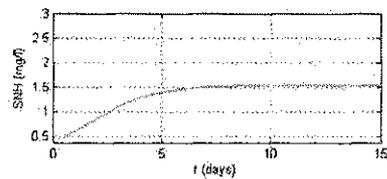


Figura 14: Concentração de Amônia - Matlab.

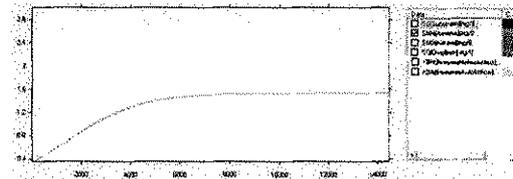


Figura 15: Concentração de Amônia - simulador.

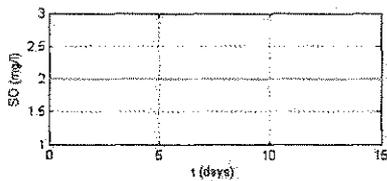


Figura 16: Concentração de Oxigênio - Matlab.

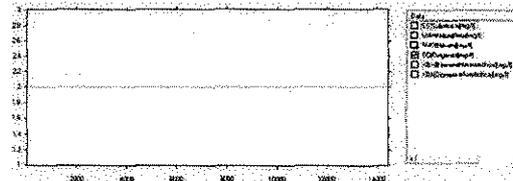


Figura 17: Concentração de Oxigênio - simulador.

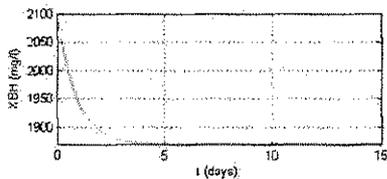


Figura 18: Concentração de Biomassa Ativa Heterotrófica - Matlab.

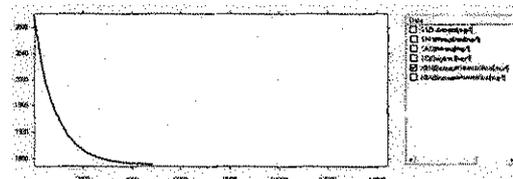


Figura 19: Concentração de Biomassa Ativa Heterotrófica - simulador.

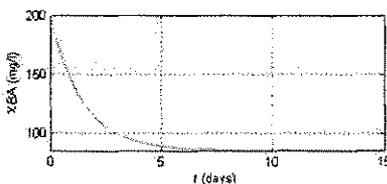


Figura 20: Concentração de Biomassa Ativa Autotrófica - Matlab.



Figura 21: Concentração de Biomassa Ativa Autotrófica - simulador.

Para os resultados mostrados acima, a planta foi simulada considerando uma idade de lodo de 2 dias e um tempo de simulação de 15 dias. Podemos verificar que enquanto há crescimento de substrato e amônia, as concentrações de nitrato e biomassa decaem, o que já era esperado, pois apenas quando a idade do lodo atinge 5 dias ocorre o processo de nitrificação [5].

6 Conclusões

Com o desenvolvimento da pesquisa envolvendo a modelagem matemática de sistemas biológicos, pudemos verificar que apesar das várias aproximações feitas do sistema real, este processo se mostrou bastante eficiente, pois possibilitou reproduzir de maneira quase fiel o comportamento de um sistema de tratamento de esgotos, o reator biológico, que apesar de sua simplicidade apresenta uma modelagem relativamente complexa com o envolvimento de diversas variáveis.

O projeto possibilitou ainda um contato maior do aluno com um ambiente de programação, tendo que desenvolver a capacidade de solucionar problemas reais através de rotinas computacionais, que nem sempre são facilmente resolvidos. Além disso, as ferramentas utilizadas, Matlab® e Visual Studio®, são o que há de mais moderno em se tratando de ferramentas utilizadas em simulações digitais, possibilitando ao aluno ter conhecimento do que pode vir a enfrentar no mercado de trabalho caso venha trabalhar nesta área.

Podemos comprovar que a modelagem quando executada corretamente descreve o comportamento do sistema quase que em sua totalidade. Isto deve ser sempre levado em consideração quando houver a oportunidade de executar uma tarefa que envolva grandes riscos operacionais, pois com a simulação prévia do sistema pode-se verificar se o sistema é realizável na prática e quais os ônus e bônus envolvidos nesta tarefa.

Observou-se ainda que o simulador projetado apresentou uma interface amigável e flexível, possibilitando ao operador do sistema fazer as investigações necessárias sobre o comportamento do sistema de lodo ativado.

Por fim, seria bastante interessante se o sistema fosse implementado na prática e tivesse suas variáveis monitoradas no intuito de fazer um comparativo com o modelo simulado. Além disso, uma sugestão para trabalhos futuros seria o desenvolvimento de um outro simulador mais completo que retrate o comportamento de um sistema de lodo ativado mais elaborado e sem tantas restrições.

Referências

- [1] Bengt Carlsson. An introduction to sedimentation theory in wastewater treatment. Technical report, 2003.
- [2] H. M. Deitel, P. J. Deitel, J. Listfield, T. R. Nieto, C. Yaeger, and M. Zlatkina. *C# Como Programar*. São Paulo: Pearson Education, 2003.
- [3] Ulf Jeppsson. A general description of the IAWQ activated sludge model N^o1. Technical report, 1987.
- [4] Valnir Vasconcelos Lira. Implementação do Modelo IAWQ N^o1 para Simulação de Plantas de Tratamento de Esgoto. Technical report, 2003.
- [5] Adrianus van Haandel and Gerrit Marais. *O Comportamento do Sistema de Lodo Ativado. Teoria e Aplicações para Projetos e Operação*. PB: Epgraf, 1999.