UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

José Haroldo Sena de Oliveira Filho

PROJETO DE UM CONTROLADOR FUZZY TAKAGI-SUGENO PARA UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS

DM 01/2013

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

José Haroldo Sena de Oliveira Filho

PROJETO DE UM CONTROLADOR FUZZY TAKAGI-SUGENO PARA UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS

DM 01/2013

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARA
INSTITUTO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

José Haroldo Sena de Oliveira Filho

PROJETO DE UM CONTROLADOR FUZZY TAKAGI-SUGENO PARA UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS

Dissertação de Mestrado apresentada para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Instituto Tecnológico. Universidade Federal do Pará. Área de Concentração: Computação aplicada. Orientador Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2013

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Oliveira Filho, José Haroldo, 1978-
Projeto de um controlador fuzzy takagi-sugeno para uma estação de tratamento de esgoto por lodos ativados / José Haroldo Oliveira Filho. - 2013.

Orientador: José Augusto Lima Barreiros.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2013.

1. Controladores programáveis. 2. Lodo de esgoto - tratamento biológico. 3. Lógica fuzzy. I. Título.

CDD 22. ed. 629.895

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

"PROJETO DE UM CONTROLADOR FUZZY DO TIPO TAKAGI-SUGENO PARA SIMULAÇÃO DE ETAPA DE OXIGENAÇÃO DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS"

AUTOR: **JOSÉ HAROLDO SENA DE OLIVEIRA FILHO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA, SENDO JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMA DE ENERGIA ELÉTRICA.

APROVADA EM: 24 / 01 / 2013

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. José Augusto Lima Barreiros
(Orientador – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Carlos Tavares da Costa Junior
(Membro – PPGEE/UFPA)

Prof. Dr. Orlando Fonseca Silva
(Membro – FEE/UFPA)

Prof. Dr. Neyson Mendonça Martins
(Membro – PPGEC/UFPA)

Prof. Dr. Walter Barra Júnior
(Membro – PPGEE/UFPA)

VISTO:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA)

À minha família que me apoiou desde que decidi iniciar esta jornada: minha mãe Sarah, minha tia Lena e meus irmãos Rodrigo e Bruno

À minha nova família que surgiu no percurso desta jornada: minha esposa Katiúscia, minha enteada Viviane e minha amada filha Ana Clara, e que ela e sua irmã se inspirem no exemplo que estou fazendo de estudar para conquistar seus objetivos de forma digna e honrada

Ao meu avô Silvio Monteiro (in memorian), um entusiasta da ciência.

Minha avó Osmarina Monteiro (in memorian) que me viu iniciar esta jornada, mas partiu sem me ver concluí-la.

AGRADECIMENTOS

Á Deus acima de tudo por ter ouvido minhas orações e ter abertos todos os caminhos para que pudesse iniciar e concluir esta jornada.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Augusto Barreiros pela sua dedicada orientação e as demais conversas que não faziam parte da pesquisa mas ajudaram a enriquecer minha cultura geral.

Ao Prof. Orlando Fonseca, que foi o primeiro a apostar neste projeto e abriu “as portas” necessárias para iniciar esta jornada.

Ao Prof. Neysom Mendonça pelo seu apoio incondicional nas orientações de Saneamento Ambiental e assim pude compreender o quão rico é para o nosso aprendizado um projeto interdisciplinar como este e, por conseguinte, me abriu outras portas para minha atividade profissional.

Ao Prof. Dr. Walter Barra Júnior que me apoiou em um crítico momento desta jornada e teve paciência e dedicação comigo.

Ao prof. Eurípedes Santos pelas suas valorosas ajudas em RNA e pelas agradáveis conversas que ajudaram a enriquecer minha cultura geral.

Prof. Tavares que dedicou parte de seu tempo e colaborou muito com este trabalho.

Às professoras Ilka e Márcia do IFPA e seus alunos André, Thyego, Fabiano e demais que corroboram em algumas pesquisas de campo.

Aos eternos colegas do PPGEE que, dentro de suas possibilidades, apoiaram-me nesta jornada: Prof. Raphael Comesanha, Prof. Eliomar, Prof. Cleison, Diego, Prof. Raphael Teixeira, Marcus Cirus, Profa. Conceição e Prof. Fabrício.

Ao meu primo, o pesquisador Dr. Carlos Souza Júnior, pelo seu apoio, auxílio e por me mostrar o quão bela é a ciência.

E por fim, ao meu amigo, Prof. Marco Sussuarana, que conheci no início me minha carreira de docente e foi “um grande colaborador” durante esta jornada que dedicou seu tempo, seu conhecimento e sua “paciência” comigo e me recomendou ao Prof. Orlando Fonseca e assim, pude iniciar e concluir esta dissertação de mestrado. Muito obrigado!

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 TRATAMENTO DE ESGOTO 1
1.2 PROBLEMAS COM TRATAMENTO POR LODOS ATIVADOS 3
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO 4
2. TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS 6
2.1 VARIÁVEIS DO PROCESSO 7
2.1.1 Variáveis físicas 7
2.1.1.1 Resíduo total 7
2.1.1.2 Temperatura 8
2.1.2 Variáveis químicas 8
2.1.2.1 Demanda Química de Oxigênio 8
2.1.2.2 Demanda Biológica de Oxigênio 8
2.1.2.3 Fósforo total 8
2.1.2.4 Oxigênio dissolvido 9
2.1.2.5 Potencial Hidrogeniônico 9
2.1.2.6 Nitrogênio Orgânico 9
2.1.2.7 Amônio 10
2.1.2.8 Amônia 10
2.1.2.9 Nitrito 10
2.1.2.10 Nitrato 10
2.1.2.11 Alcalinidade 10
2.1.3 Variáveis microbiológicas 11
2.1.3.1 Bactérias autotróficas 11
2.1.3.2 Bactérias heterotróficas 11
2.2 PLANTA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS 11
2.1 PROCESSO DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGENADA 14
2.1.1 Nitrificação 14
2.1.2 Desnitrificação 14
2.2 MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO 15
2.2.1 Taxa de Transferência de Oxigênio 15
2.2.2 Modelo de Dinâmica de Oxigênio Dissolvido 16
2.3 MODELO DE TRATMANTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS ASM1 18
3. SISTEMAS FUZZY 20
3.1 ELEMENTOS DE UM SISTEMA FUZZY 20
3.1.1 Universo de discurso 20
3.1.2 Variáveis Linguísticas 21
3.1.3 Valores Linguísticos 21
3.1.4 Funções de Pertinência 22
3.1.5 Regras Lingüísticas 23
3.1.6 Conjuntos Fuzzy 24
3.2 SISTEMA FUZZY DO TIPO MANDANI 25

3.2.1 fuzzificador 25
3.2.2 Base de Regras Fuzzy 25
3.2.3 Máquina de Inferência 26
3.2.4 Defuzzificador 26
3.3 SISTEMA FUZZY DO TIPO TAKAGI-SUGENO 26
3.3.1 Interpolação entre Mapeamentos Lineares 27
3.3.2 Interpolação entre Sistemas Lineares 28
4. PROJETO DO CONTROLADOR 29
4.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL E INTEGRATIVO 29
4.2 O MODELO CONTÍNUO DE OD 29
4.3 A LINEARIZAÇÃO DO MODELO CONTÍNUO DE OD 30
4.4 PROJETO DOS CONTROLADORES PI LOCAIS 31
4.5 PROJETO DO CONTROLADOR FUZZY 32
4.5.1 Variável de Entrada 33
4.5.2 Variáveis de Saída 34
4.5.3 Base de Regras 34
4.6 PLANTA EM MALHA FECHADA 35
5. RESULTADOS DE ESTUDO E SIMULAÇÃO 36
5.1 ENSAIOs PRELIMINARes 36
5.1.1 Análise do Ensaio para o Ponto de Operação x° = 2,00 mgO_2/l 36
5.1.2 Análise do Ensaio para o Ponto de Operação x° = 3,75 mgO_2/l 37
5.1.3 Análise do Ensaio para o Ponto de Operação x° = 5,50 mgO_2/l 38
5.2 ENSAIOs DO CONTROLADOR FUZZY TAKAGI-SUGENO 40
5.2.1 Análise do Ensaio do Cenário 1 41
5.2.2 Análise do Ensaio do Cenário 2 41
5.2.3 Análise do Ensaio do Cenário 3 43
5.2.4 Análise do Ensaio do Cenário 4 44
6. CONSIDERAÇÃOES FINAIS 46
6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO 46
6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS 47
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 48
ANEXO A 51
ANEXO B 52
ANEXO C 53

LISTA DE ABREVIATURAS

ALC - Acalinidade
ASM#1 – Activated Sludge Model No. 1
C – Celsius
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DP – Decantador Primário
DQO – Demanda Química de Oxigênio
DS – Decantador Secundário
EB – Efluente Bruto
ETE – estação de tratamento de esgoto
IDB – Indicadores e Dados Básicos de Saúde
IWA – Internacional Water Association
K_La – transferência de oxigênio
Kw.h/hab – KiloWatt hora por habitante
l – Litro
mg/l – miligrama por litro
mgO_2/l – miligrama de oxigênio por litro
N_2 – nitrogênio
N-am – nitrogênio amoniacal
NH_3^+ – amônia
NH_4^+ – amônio
NO_2^- – nitrato
NTK – Nitrogênio Total de Kjeldahl
O_2 – oxigênio
OD – Oxigênio Dissolvido
P – Fósforo
pH – Potencial Hidrogeniônico
PI – Proporcional Integrativo
Q – Vazão de entrada do efluente bruto no tanque de aeração
Q_r – Vazão de recirculação
R – Taxa de consumo de Oxigênio
RNA – Redes Neurais Artificiais
RPM – Rotação por Minuto
S – Concentração de Substrato, ou DBO, efluente
S_o – Concentração de Substrato, ou DBO, Afluente
SST – Sólidos Suspensos Totais
SSTret – Sólidos Suspensos Totais de Recirculação
TA – tanque de aeração
TDH – Tempo de Detenção Hidráulica
TMP – Temperatura
TS – Takagi-Sugeno
u – Taxa de vazão de ar.
V – volume do tanque de aeração
X – Concentração de Sólidos Suspensos no tanque de aeração
Xe – Concentração de sólidos suspensos no efluente
X_o – Concentração de Sólidos Suspensos afluente
Xr – Concentração de sólidos suspensos no lodo de recirculação
y – Concentração de oxigênio dissolvido

y_{in} – Concentração de oxigênio dissolvido ao entrar no tanque de aeração
YREF – Valor de referência de OD para a ação de controle
y_{sat} – Concentração de oxigênio dissolvido saturado

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1Amostras de águas residuárias tratada (esquerda) e não tratada (direita) 3
Figura 2.1Flocos gelatinosos presentes no licor misto do lodo ativado 6
Figura 2.2Primeira variação: Convencional (fluxo contínuo)..... 12
Figura 2.3Segunda variação: Aeração Prolongada (fluxo contínuo)..... 12
Figura 2.4Terceira variação: Fluxo Intermitente (batelada)..... 12
Figura 2.5ETE de lodos ativados convencional e as devidas variáveis físicas e químicas presentes no processo..... 13
Figura 3.1 Funções de pertinência da variável linguística RPM que definem os valores lingüísticos: marcha lenta, marcha plena e marcha rápida..... 23
Figura 3.2 Esquema de um sistema fuzzy do tipo Mandani..... 25
Figura 3.3 Representação de um sistema fuzzy TS com um entrada, funções de pertinência trapezoidal 27
Figura 4.1Universo de discurso e funções de pertinência da variável de entrada do sistema fuzzy TS 33
Figura 4.2 Planta em malha fechada da ETE de tratamento de esgoto por lodos ativados..... 35
Figura 5.1 Curvas de desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 2,0 mgO2/l aplicando um degrau de 5% de x°..... 37
Figura 5.2 Curvas de desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 3,75 mgO2/l aplicando um degrau de 5% de x°..... 39
Figura 5.3 Curvas de desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 5,5 aplicando um degrau de 5% de x° 40
Figura 5.4 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 1..... 42
Figura 5.5 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 2..... 43
Figura 5.6 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 3..... 44
Figura 5.7 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 4..... 45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Variáveis físicas, químicas e biológicas do processo de tratamento de efluentes.... 7
Tabela 3.1Variáveis lingüísticas e seus respectivos intervalos de definição, tipo de função de pertinência e grau de pertinência 23
Tabela 4.1 Valores atribuídos às variáveis da equação 2.3..... 32
Tabela 4.2 Valores de, K_P e K_I calculados para os dois pontos de operação x° = 2,00 mgO2/l, x° = 3,75 mgO2/l e x° = 5,50 mgO2/l..... 33
Tabela 4.3Valores lingüísticos e valores numéricos das variáveis de saída do controlador fuzzy TS 34
Tabela 5.1 Desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 2,00 aplicando um degrau de 5% de x° 37
Tabela 5.2 Desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 3,75 aplicando um degrau de 5% de x° 38
Tabela 5.3 Desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 5,50 aplicando um degrau de 5% de x° 39
Tabela 5.4 Cenários e seus parâmetros para ensaios 40
Tabela 5.5 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 1..... 41
Tabela 5.6 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 2..... 42
Tabela 5.7 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 3..... 44
Tabela 5.8 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 4..... 45

RESUMO

Este trabalho propõe o projeto de um controlador Fuzzy do tipo Takagi-Sugeno em uma estação de tratamento de esgoto por lodos ativados. Este tipo de tratamento ocorre na presença de oxigênio, pois microorganismos aeróbios presentes no licor misto irão proporcionar a remoção tanto da matéria carbonácea quanto nutrientes formados por compostos à base de nitrogênio. O controlador atua via mecanismo de aeração e foi projetado para interpolar os ganhos proporcionais e integrativos de três controladores fixos locais que, por sua vez, foram projetados a partir da linearização de um modelo contínuo de balanço de massa de oxigênio. O controlador auxiliará manter a concentração de oxigênio dissolvido desejável na faixa de operação do processo para que ocorra a nitrificação, reação química de oxiredução que transforma amônio em nitrito, que é fundamental para o sucesso do processo, e poderá também economizar energia elétrica utilizada pelo mecanismo de aeração. Os ensaios foram realizados via simulação computacional em quatro cenários idealizados comparando o desempenho do controlador fuzzy e o desempenho de um controlador fixo projetado em um ponto de operação diferente do qual se utilizou como valor de referência na planta. Ao aplicar um degrau no valor de referência estabelecido no cenário de análise, observou-se o tempo de subida, o tempo de acomodação e o erro em regime. Após os ensaios, observou-se que o desempenho do controlador fuzzy nos quesitos tempo de subida e tempo de acomodação em relação ao controlador fixo foi melhor, enquanto nos quesitos sobressinal e erro em regime foi semelhante. Após as análises, concluiu-se que a estratégia de controle escolhida neste trabalho é viável, pois de acordo com o valor auferido de oxigênio dissolvido na entrada da planta, o controlador fuzzy irá interpolar os ganhos proporcionais e integrativos de um controlador fixo projetado na vizinhança deste valor e assim, atuar de forma bastante satisfatória.

Palavras-chave: controlador Fuzzy Takagi-Sugeno, estação de tratamento de esgoto, tratamento de esgoto por lodos ativados, controlador Proporcional e Integrativo, oxigênio dissolvido, nitrificação.

ABSTRACT

The mean goal of this work is the design of a Takagi-Sugeno fuzzy controller on an activated sludge wastewater treatment plant. This kind of process requires oxygen and aerobic microorganisms in the mixed liquor that are necessary to remove the carbonaceous matter and the nutrients based on nitrogen compounds. The controller acts on the aeration valve engine and has been designed to interpolate the proportional and integrative gain of three fixes controllers designed from the linearization of a continuous model of oxygen mass balance. The controller assists to keep the desirable dissolved oxygen concentration necessary to the nitrification, an oxi-reduction chemical reaction that transforms ammonia into nitrite and it is also possible to save electric energy used by the aeration engine. It is imperative the nitrification occurs for the success of the whole process. The Assays were performed by computerized simulation in four idealized scenarios analyzing the performances of the fuzzy controller and the fix controller designed to a different operation point of the set point defined in the plant. Applying a degree in the set point established in the scenario it was analyzed the rise time, settling time, overshoot and steady-state error. After the assays, the fuzzy controller performed better than the fix one at rise time and settling time criteria and equivalent performance at overshoot and steady-state error. After analysis, it was conclude that the control strategy chosen in the work is viable, according the dissolved oxygen measure at the plant entrance, the fuzzy controller interpolate the proportional and integrative gains of a fix controller designed near this value and thus act quite satisfactory.

Keywords: Takagi-Sugeno Fuzzy controller, wastewater treatment plant, activated sludge wastewater treatment, proportional and integrative controller, dissolved oxigen, nitrification.

1. INTRODUÇÃO

O Saneamento básico no Brasil, de responsabilidade do setor público, não recebeu muitos investimentos e dos poucos projetos elaborados, uma minoria trouxe os retornos esperados (Nozaki, 2007). Segundo o IDB...(2012), foi apurado que no ano de 2010 122.486.590 (cento e vinte e dois milhões, quatrocentos e oitenta e seis mil e quinhentos e noventa) habitantes[1] possuíam cobertura de rede de esgoto, sendo o maior percentual na região sudeste: 56%, enquanto o menor percentual está na região Norte: 4%. De acordo com Mendonça e Mota (2005) apud Nozaki (2007), a falta de investimentos neste setor acarreta altos gastos no tratamento de saúde pública.

A Resolução Nº 430 de 13 de Maio de 2011, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, CONAMA estabelece padrões para o tratamento de água residuárias oriundas tanto de esgoto doméstico quanto industrial (Brasil, 2011). Este tratamento é fundamental, pois este tipo de água possui uma baixa concentração de oxigênio dissolvido, o que é prejudicial à vida aquática, além da presença de substâncias como a amônia que é nociva ao organismo e de patógenos[2] que provocam doenças de veiculação hídrica[3] (Mendonça, 2005).

A criação de políticas públicas e sua aplicação na questão do tratamento da água residuária não só evita problemas de saúde como também cria formas sustentáveis de acesso à água potável. Tal ação inclusive corrobora com um dos objetivos da Meta 7 (sete) Assegurar Sustentabilidade Ambiental, que faz parte das Oito Metas do Milênio desenvolvida pela Organização das Nações Unidas (MILLENIUM...,2012).

1.1 TRATAMENTO DE ESGOTO

O tratamento de esgoto é uma técnica que prepara a água residuária para voltar ao meio ambiente através de um processo químico e biológico (Sperling, 1997; Oliveira Filho et al, 2011). Há dois tipos de tratamentos de esgoto: anaeróbio que ocorre sem a presença de oxigênio (O_2) e aeróbio que ocorre na presença de O_2 (Sperling, 1997). O tratamento anaeróbio elimina compostos orgânicos ou matéria carbonácea presente na água residuária. Entretanto o tratamento aeróbio é mais completo, pois elimina tanto os compostos orgânicos, quanto os compostos à base de fósforo e Nitrogênio (N_2). O tratamento aeróbio também proporciona a redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO) e da Demanda Biológica de

[1] População total de acordo com CENSO...(2012) é de 190.755.799 habitantes
[2] Agente biológicos causadores de doenças.
[3] Doenças causadas pelo contato ou ingestão de água não apropriada.

Oxigênio (DBO) sendo este último ser uma exigência da Resolução Nº 430 do CONAMA (Brasil, 2011).

A etapa final do tratamento de esgoto, seja aeróbio ou anaeróbio, é a eliminação de patógenos.

O processo aeróbio mais utilizado é o sistema de lodos ativados, o qual este trabalho aborda. O tratamento ocorre através da biomassa presente neste sistema responsável em consumir e degradar a matéria orgânica e nitrogenada presente na água residuária. A oxigenação ocorre ou por aeração mecanizada, agitando o licor misto no tanque de aeração (TA), ou por sopradores (Balku e Berber, 2006). Uma etapa do processo ocorre em um tanque de sedimentação, sem oxigenação[4], onde há formação de lodo, sendo uma parte dele devolvido para o tanque de aeração[5] (Sperling, 1997).

Durante a etapa aeróbia, ocorre a eliminação de amônio (NH_4^+) e a formação de nitrato NO_2^- em uma reação química de oxiredução, na presença de microrganismos aeróbios, conhecida como nitrificação[6] (Sperling, 1997; Mendonça, 2005). O mecanismo de aeração do ambiente deve proporcionar uma taxa de transferência de oxigênio (K_La) que, por sua vez, produzirá uma concentração de oxigênio dissolvido desejada no ponto de operação do processo.

A planta de uma estação de tratamento de esgoto (ETE) deste tipo é mais complexa por causa da geração de oxigênio e, por conseguinte, ocorre um alto gasto de energia elétrica (Mendonça, 2005; Balku e Berber, 2006). De acordo com o trabalho de Chernicharo (2000), estima-se que para uma cidade com população acima 200.000 habitantes, uma ETE de lodos ativados gasta em média com aeração de 10 a 22 Kw.h/hab.ano

A Figura 1.1 apresenta duas amostra de água residuárias não tratada (copo becker da direita) e tratada[7] (copo becker da esquerda) , cujo processo foi realizada em uma planta de tratamento de esgoto por lodos ativados em escala reduzida. Ao observar as amostras percebe-se a clara diferença no aspecto visual entras as mesmas. A água residuária não tratada, que foi coletada diretamente na rede de esgoto, é turva e possui partículas sólidas inerentes do ambiente o qual foi obtida. A amostra tratada é bastante limpa e sem nenhum tipo de partícula

[4] Apesar de não haver oxigenação direta nesta etapa, este processo é denominado de anóxico pois o efluente vertido do tanque traz consigo concentrações de OD.
[5] A planta de um sistema de lodos ativados será explicada no Capítulo 2.
[6] Processo de nitrificação que será explicado no Capítulo 2.
[7] A amostra é considerada tratada do ponto de vista do processo de lodos ativados e não passou pela etapa de eliminação de patógenos.

sólida visível sendo que o mais interessante, é que esta amostra tratada essencialmente pelo processo de lodos ativados e não recebeu nenhum tipo de pré ou pós tratamento como a filtragem, por exemplo.

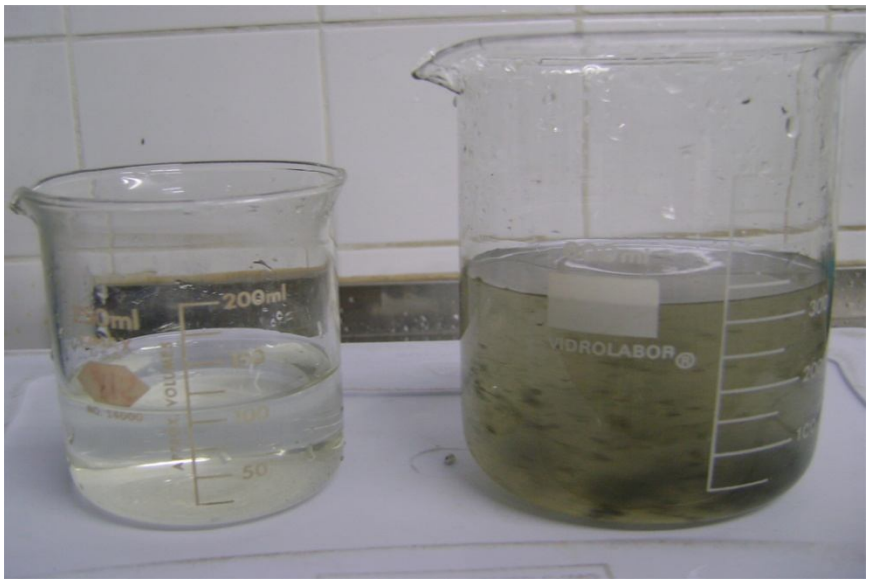

Figura 1.1 Amostras de águas residuárias tratada (esquerda) e não tratada (direita)
Fonte: (Oliveira Filho, 2010)

1.2 PROBLEMAS COM TRATAMENTO POR LODOS ATIVADOS

A nitrificação é a primeira etapa do processo de tratamento de esgoto por lodos ativados e ocorre no tanque de aeração (TA). O sucesso desta é imperativo para o resultado final esperado do processo como um todo. De acordo com Lindberg, (1997) a concentração de oxigênio dissolvido (OD) deverá ser suficiente para que a nitrificação ocorra, pois uma baixa concentração, além não proporcionar a nitrificação, gera desperdício de energia elétrica. Ainda segundo este autor, uma alta concentração não só causaria desperdício de energia elétrica como também prejudicaria etapas posteriores do processo.

Otimizar a oxigenação do (TA) para que a nitrificação ocorra com sucesso e proporcionando uma eficiência energética do processo é o que propõem os trabalhos de Lindberg (1997), Lara (2005), Sotomayor (2001), (Balku e Berber, 2006).

O trabalho de Lindberg (1997) projeta um controlador do tipo Proporcional Integrativo (PI) para uma ETE de lodos ativados. A estratégia de controle atua no mecanismo de oxigenação utilizando como variável de entrada o erro obtido entre a concentração de OD do valor medido no TA e um valor de referência pré-estabelecido. O controlador faz com que

o mecanismo de aeração proporcione um nível de oxigenação no ponto de operação para que ocorra a nitrificação.

Além do controlador PI proposto por Lindberg (1997), há trabalhos que utilizam estratégias de controle baseados em sistemas especialistas. Os autores Tomiello (1999) e (Statkai e King, 2007) utilizam, respectivamente, sistemas fuzzy e Redes Neurais Artificiais (RNA) no controle de operação de plantas de tratamento de esgoto por lodos ativados.

Os sistemas fuzzy são bastante utilizado em estratégias de controle devido processarem informações qualitativas inerentes à natureza humana. Um valor será considerado verdadeiro (ou falso) em um determinado percentual, segundo uma função de pertinência com intervalos contidos em um universo de discurso (Passino e Yurkovich, 1998). Os sistemas fuzzy também podem ser utilizados na modelagem e identificação de sistemas como sugere Wang, (1996).

Este trabalho propõe o projeto de um controlador fuzzy do tipo Takagi-Sugeno (TS) interpolando os ganhos proporcionais e integrativos de três controladores PI locais, projetados em pontos de operações distintos. O controlador atuará via mecanismo de aeração de uma ETE de lodos ativados. A implementação do projeto do controlador ocorreu em ambiente Matlab®/Simulink bem como as simulações.

Durante as simulações o desempenho do controlador fuzzy TS foi comparado a de um controlador fixo PI aplicando-se um degrau na vizinhança do ponto de operação pré-definido distinto do ponto o qual o controlador fixo foi projetado. Para avaliar o desempenhos dos controladores, quatro quesitos foram escolhidos: tempo de subida, sobressinal, tempo de acomodação e erro em regime.

O projeto dos controladores PI locais foi feito a partir da linearização de um modelo de balanço de massa apresentado por Bastin e Dochain (1990) apud Lindberg (1997) que descreve a dinâmica do oxigênio dissolvido no tanque de aeração de uma ETE por lodos ativados.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho está divido em seis capítulos, iniciando pela exposição dos motivos que corroboraram para iniciar a pesquisa, bem como uma revisão de literatura, metodologia utilizada e análise dos resultados obtidos.

O primeiro é a introdução que apresenta a problemática do tratamento de esgoto com foco no método por lodos ativados e questões inerentes para a definição da pesquisa.

O segundo capítulo é uma revisão de literatura de tratamento de esgoto por lodos ativados abordando os tipos de plantas para projeto de uma ETE, as variáveis químicas, físicas e microbiológicas do processo, o capítulo também apresenta os seguintes modelos matemáticos: o ASM#1 (principal modelo de tratamento de efluente por lodos ativados), de transferência de oxigênio e de balanço de massa de oxigênio dissolvido.

O terceiro capítulo explana sobre sistemas fuzzy conceituando os seus elementos, e explica as peculiaridades dos sistemas tipo Mandani e do tipo Takagi-Sugeno, que foi utilizado no projeto do controlador.

O quarto capítulo descreve o projeto do controlador. Inicialmente realizou-se uma linearização no modelo de balanço de massa de oxigênio dissolvido apresentado no Capítulo 2. Em seguida, projetam-se três controladores PI locais em pontos de operação distintos no intervalo da faixa de operação do processo para que o controlador fuzzy TS interpole os seus ganhos proporcionais e integrativos de acordo com o valor de entrada. E por fim, o projeto do controlador fuzzy TS definido as variáveis de entrada e saída e a base de regras.

O quinto capítulo trata da análise das simulações dos controladores PI locais e do controlador fuzzy do tipo TS de acordo com os critérios definidos.

O sexto capítulo são as considerações finais do trabalho, retomando os objetivos que foram propostos, discorrendo sobre os resultados obtidos e também sugestões para trabalhos futuros.

2. TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS

O sistema de lodos ativados surgiu no início do século XX no ano de 1914. Os pesquisadores Lockett e Arden descobriram que a areação de águas residuárias facilitava a remoção de matéria orgânica, e que durante este processo, flocos visíveis de microorganismos, denominados biomassa, se formavam e facilmente se decantavam quando o fluido estava estacionário como pode ser observado na Figura 2.1. No início, a aeração ocorria por um tempo, e em seguida no mesmo tanque ocorria a decantação sem oxigenação (Haandel, 1999).

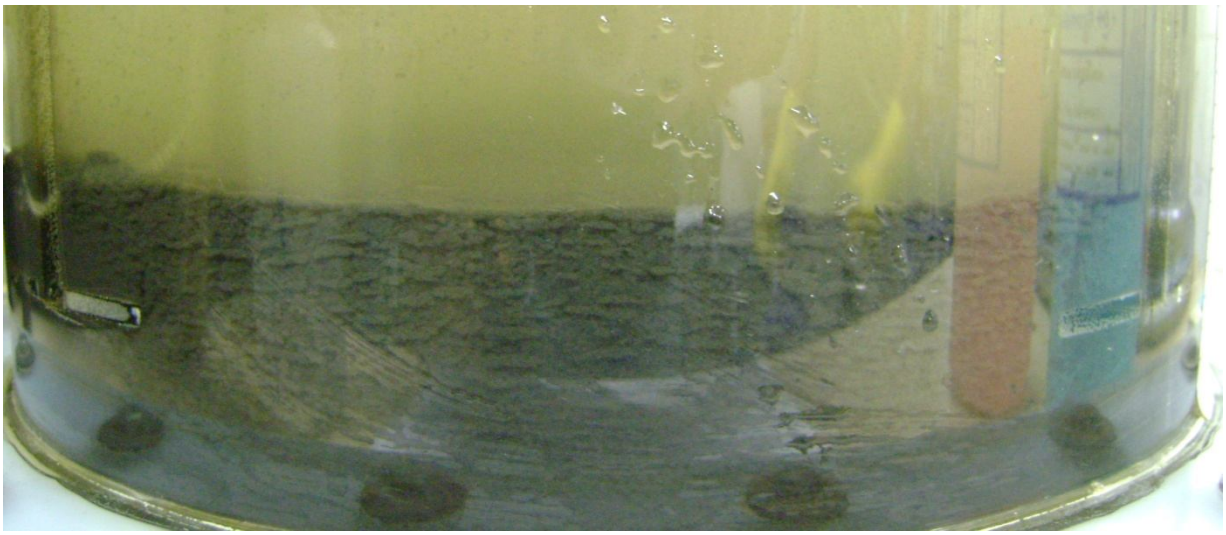

Figura 2.1 Flocos gelatinosos presentes no licor misto do lodo ativado
Fonte: (Oliveira Filho, 2010) com adaptações

O sistema de lodos ativados é mais utilizado em países desenvolvidos e que estão geograficamente localizados em zonas temperadas. Ao implantar este sistema no Brasil, não houve adaptação ao clima tropical predominante, ocasionando, assim, baixa qualidade do efluente tratado. A temperatura ideal é acima de 20º C, e em países de clima frio há estimulação por catalisadores. Mas a questão é que a capacidade de oxigenação instalada deve atender tanto a demanda do material orgânico quanto pela matéria nitrogenada, caso contrário haverá competição de O_2 tanto por bactérias heterotróficas quanto e por autotróficas sendo estas últimas responsáveis pela reação de nitrificação. Daí, a necessidade de se adaptar o sistema de acordo com o clima predominante tropical, como, por exemplo, nas regiões Norte, Nordeste e parte do Centro-Oeste, como também para as demais que possuem as quatro estações mais definidas (Haandel, 1999).

2.1 VARIÁVEIS DO PROCESSO

O sistema de lodos ativados, mesmo sendo considerado por Mendonça (2005) um processo biológico, possui também associadas a ele variáveis químicas, físicas além das biológicas. As variáveis físicas e químicas vão implicar no metabolismo, além de proporcionar o habitat dos microorganismos contidos na biomassa. A Tabela 2.1 apresenta as variáveis físicas, químicas e biológicas do processo que serão explicadas mais adiante.

Tabela 2.1 Variáveis físicas, químicas e biológicas do processo de tratamento de efluentes.

VARIÁVEIS FÍSICAS	VARIÁVEIS QUÍMICAS	VARIÁVEIS BIOLÓGICAS
- Resíduo total - Temperatura	- Demanda Biológica de Oxigênio - Demanda Química de Oxigênio - Fósforo total - Oxigênio Dissolvido - pH - Amônia - Nitrito - Nitrato - Nitrogênio orgânico - Alcalinidade	- Bactérias autotróficas - Bactérias heterotróficas

2.1.1 Variáveis físicas

2.1.1.1 Resíduo total

Em saneamento, sólidos nas águas correspondem a toda matéria que permanece como resíduo, após evaporação, secagem ou calcinação da amostra a uma temperatura pré-estabelecida durante um tempo fixado. Esta variável está relacionada aos níveis de concentração das diversas frações de sólidos e resultam em um quadro geral da distribuição das partículas com relação ao tamanho (sólidos em suspensão e dissolvidos) e com relação à natureza (fixos ou minerais e voláteis ou orgânicos). As concentrações de sólidos em suspensão voláteis nos lodos dos reatores têm sido utilizadas para se estimar a concentração de microrganismos decompositores da matéria orgânica (Sperling, 1995).

2.1.1.2 Temperatura

A temperatura influencia na sobrevivência dos microorganismos envolvidos no processo como também serve de catalisador para o processo da desnitrificação como foi explicado no início deste Capítulo (Sperling, 1995).

A legislação em vigor estabelece a temperatura inferior a 40°C, sendo que a variação do corpo receptor não deverá exceder a 3°C no limite da zona de mistura (Brasil, 2011).

2.1.2 Variáveis químicas

2.1.2.1 Demanda Química de Oxigênio

O cálculo da concentração de material orgânico a partir da quantidade de oxigênio consumido por agentes químicos é denominado de Demanda Química de Oxigênio (Mendonça, 2005). A determinação da DQO laboratorialmente ocorre através adição de substâncias oxidantes e catalisadoras (Haandel, 1999).

A legislação em vigor não menciona a DQO como indicador poluidor. Entretanto, algumas legislações de algumas Unidades da Federação a mencionam como indicador.

2.1.2.2 Demanda Biológica de Oxigênio

A Demanda Biológica de Oxigênio é quantidade matéria orgânica calculada através de consumo de oxidantes sendo que, neste caso, ocorre a ação de bactérias. Caso a quantidade de microorganismos seja muito baixa, deve-se adicioná-los ao efluente a ser examinado junto com material inorgânico (Mendonça, 2005).

A legislação em vigor exige que a concentração de $DBO_{5,20}$ não ultrapasse 120 mg/l de O_2 (Brasil, 2011)[8].

2.1.2.3 Fósforo total

O fósforo aparece em águas naturais devido principalmente às descargas de esgotos sanitários. Nestes, os detergentes superfosfatados empregados em larga escala domesticamente constituem a principal fonte, além da própria matéria fecal, que é rica em proteínas. Alguns efluentes industriais, como os de indústrias de fertilizantes, pesticidas, químicas em geral, conservas alimentícias, abatedouros, frigoríficos e laticínios, apresentam

8 Este limite somente poderá ser ultrapassado no caso de efluente de sistema de tratamento com eficiência de remoção mínima de 60% de DBO, ou mediante estudo de autodepuração do corpo hídrico que comprove atendimento às metas do enquadramento do corpo receptor

fósforo em quantidades excessivas. As águas drenadas em áreas agrícolas e urbanas também podem provocar a presença excessiva de fósforo em águas naturais (Sperling, 1995).

Assim como o nitrogênio, o fósforo constitui-se em um dos principais nutrientes para os processos biológicos, ou seja, é um dos chamados macro-nutrientes, por ser exigido também em grandes quantidades pelas células. Nesta qualidade, torna-se parâmetro imprescindível em programas de caracterização de efluentes industriais que se pretende tratar por processo biológico.

2.1.2.4 Oxigênio dissolvido

Oxigênio dissolvido é a concentração de moléculas de O_2 em mg/l dissolvida na água. O oxigênio da atmosfera se dissolve na água devido à diferença de pressão parcial. A temperatura é fator de importância, pois o nível de OD diminui à medida que a temperatura aumenta. A concentração de OD é importante para manter bactérias aeróbias vivas durante o tratamento (Sperling, 1995).

2.1.2.5 Potencial Hidrogeniônico

O Potencial Hidrogeniônico (pH) é uma importante variável neste processo. A estabilização do pH é o que garante as reações químicas de oxidação redução da amônia em nitrato, pois é o pH quem favorece o habitat para os microorganismos envolvidos no processo (Sperling, 1995).

A legislação em vigor estabelece faixa de pH entre 6 e 9 (Brasil, 2011).

2.1.2.6 Nitrogênio Orgânico

O nitrogênio orgânico é uma das formas de nitrogênio encontrado no esgoto sanitário. De acordo com Lara (2005) é um subdivisão do Nitrogênio Total de Kjeldahl (NTK), que por sua vez tem as seguintes subdivisões:

Nitrogênio orgânico solúvel não biodegradável, que na maioria das vezes é descartado.

Nitrogênio orgânico solúvel biodegradável, que se transforma em amônio através de bactérias heterotróficas.

Nitrogênio orgânico particulado que segundo Louro (2011) é encontrado na forma de bactérias, fitoplâncton, zooplâncton e detritos. Mas de acordo com Lara (2005), o nitrogênio orgânico particulado ainda se divide em biodegradável e não biodegradável.

Nitrogênio Amoniacal também conhecido como nitrogênio inorgânico pode ser encontrado na forma gasosa (amônia) e ionizado (amônio). De acordo com Haandel (1999) o nitrogênio amoniacal representa cerca de 75% dos nutrientes encontrados em esgoto sanitário, enquanto o nitrogênio orgânico 25%.

A atual legislação utiliza o nitrogênio amoniacal como um dos parâmetros inorgânicos para lançamento de efluente tratado. A concentração permitida é de 20,0 mg/L (Brasil, 2011).

2.1.2.7 Amônio

O íon amônio (NH_4^+) provém de um processo denominado amonificação através da ação de bactérias heterotróficas a partir do nitrogênio orgânico solúvel biodegradável (Lara, 2005).

2.1.2.8 Amônia

A amônia (NH_3^+) é a forma gasosa do nitrogênio amoniacal. Segundo Haandel (1999) este composto é apresenta-se na forma gasosa e é popularmente conhecido como gás amoníaco ou apenas amoníaco.

2.1.2.9 Nitrito

O nitrito (NO_2^-) é a forma oxidada do nitrogênio encontrada no esgoto sanitário e é obtido a partir do NH_4^+ em um processo conhecido como nitrificação (Sperling, 1995). A legislação vigente sobre descarte de efluentes tratados (Brasil, 2011) não menciona o nitrito, porém a Norma de Qualidade da Água para Consumo Humano estabelece como aceitável a concentração de NO_2^- de 1,0 mg/L (Brasil, 2004).

2.1.2.10 Nitrato

O nitrato (NO_3^-) é a forma oxidada do nitrogênio encontrada no esgoto sanitário e é obtido a partir do NO_2^- na segunda etapa da nitrificação (Sperling, 1995). A legislação vigente sobre descarte de efluentes tratados (Brasil, 2011) não menciona o nitrito, porém, a concentração de NO_2^- de 10,0 mg/L é aceitável para consumo humano (Brasil, 2004).

2.1.2.11 Alcalinidade

É a capacidade que um sistema aquoso tem para neutralizar ácidos sem perturbar de forma extrema as atividades biológicas que dele decorrem. A alcalinidade serve de parâmetro

de qualidade da água podendo ser influenciada por compostos como o fosfato e a NH_3^+, que estão presentes no efluente não tratado (Sperling, 1995).

2.1.3 Variáveis microbiológicas

2.1.3.1 Bactérias autotróficas

Bactérias são seres unicelulares que se reproduzem por fissão celular e sobrevivem apenas ambientes de pH neutro[9]. Bactérias que são capazes de produzir o próprio alimento são consideradas autotróficas (Mendonça, 2005). A autora também explica que as bactérias autotróficas se subdividem em fotossintetizantes (que produzem alimento a partir da energia da luz) ou quimiossintetizantes (que produzem alimento a partir da energia de uma reação química de oxiredução).

Os gêneros mais comuns de bactérias autotróficas encontrados em sistema de lodos ativados mencionados por Mendonça (2005) são: *Nitrosomonas*, *Nitrosocystis*, *Nitrosospira*, *Nitrobacter*, *Nitrococcus*, *Nitrosolobus*, *Bactoderma* e *Microderma*. A autora também ressalta que a predominância de uma ou mais espécie dependerá da concentração de nutrientes.

2.1.3.2 Bactérias heterotróficas

As bactérias heterotróficas, comumente encontradas em lodos ativados, são do gênero: *Achromobacterium*, *Chromobacterium* e *Pseudomonas*. Graças às bactérias heterotróficas ocorre no tanque de aeração a formação de flocos gelatinosos (Mendonça, 2005). De acordo com Sperling (1997), este floco nada mais é do que uma matriz gelatinosa formada não só por bactérias heterotróficas, mas também compõem a matriz: bactérias filamentosas e protozoárias. Este floco é separado da fase líquida no decantador secundário[10].

2.2 PLANTA DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS

O tratamento por lodos ativados possui uma etapa aeróbia e outra anóxica[11] e como regra básica necessita de dois tanques a priori sendo um para cada etapa (Sperling, 1997). Ainda de acordo com este autor, há três variações do processo de tratamento por lodos

[9] Acima de 4,0 e abaixo de 9,5
[10] Vide Figura 2.1
[11] Segundo Mendonça, (2005) trata-se de um ambiente caracterizado tradicionalmente pela ausência de OD na forma molecular e associado à presença de nitratos.

ativados: convencional, aeração prolongada e por batelada. Este trabalho fará a explanação de uma planta por aeração prolongada[12].

As Figuras 2.1, 2.2 e 2.3 representam em forma de fluxograma das três variações de tratamento por lodos ativados conforme apresenta Sperling, (1997):

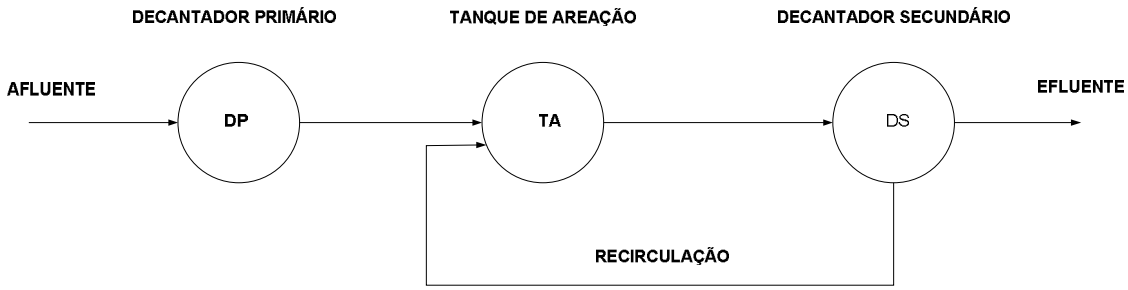

Figura 2.2 Primeira variação: Convencional (fluxo contínuo)
Fonte: (Sperling, 1997) com adaptações

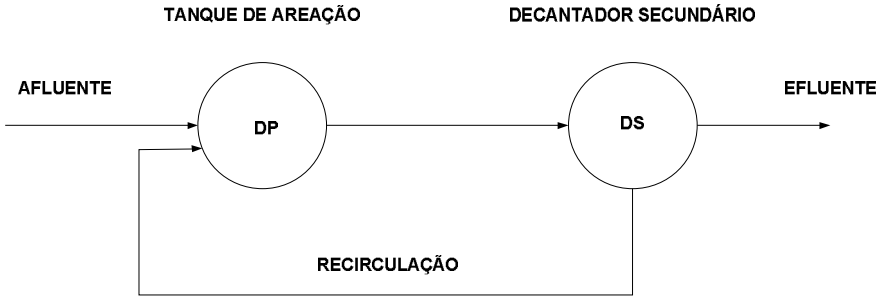

Figura 2.3 Segunda variação: Aeração Prolongada (fluxo contínuo)
Fonte: (Sperling, 1997) com adaptações

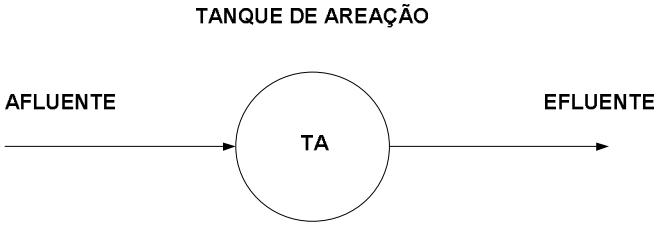

Figura 2.4 Terceira variação: Fluxo Intermitente (batelada)
Fonte: (Sperling, 1997) com adaptações

A planta de uma ETE por aeração prolongada possui as seguintes unidades principais como explica Sperling, (1997): decantador primário (DP), tanque de aeração (TA), decantador secundário (DS) e estação elevatória de lodo recirculante.

O DP serve apenas para que haja sedimentação de partículas mais densas que estão dissolvidas no efluente não tratado que, porventura, não foram eliminadas ou contidas no pré-

[12] Não são apresentados todos os elementos da ETE que fazem parte do pré-tratamento como: grade de retenção, caixa de areia entre outros.

tratamento. Parte do efluente neste tanque que está mais próximo da superfície é bombeada para o TA (Sperling, 1997).

A oxigenação do efluente ocorre no TA através de agitadores mecânicos ou sopradores. O O_2 proporcionará a eliminação da matéria carbonácea e o processo de nitrificação (Haandel, 1999). Nesta unidade, Sperling (1997) ressalta que os microrganismos envolvidos no processo se aglomeram em uma massa gelatinosa que irão se alimentar da matéria carbonácea contida no efluente não tratado que vem do DP. É nesta unidade que se inicia o tratamento por lodos ativados.

O DS ocorre a etapa anóxica do processo onde ocorre a separação da fase sólido-líquido do processo, recirculação do lodo sedimentado nesta unidade de volta ao TA, e finalmente o efluente mais próximo da superfície (sobrenadante) é vertido em calha coletadora para então ser encaminhado à etapa de desnitrificação (Haandel, 1999). O efluente vertido do DS já está tratado do ponto de vista do processo.

Antes de ser despejado no meio ambiente, faz-se necessário que o efluente passe por uma etapa posterior ao processo de lodos ativados para realizar a eliminação de patógenos que pode ser feita através de aplicação de cloro ou radiação ultravioleta. A Figura 2.5 ilustra uma planta simplificada de uma ETE de lodos ativados convencional indicando também quais variáveis físicas e químicas são auferidas em cada tanque.

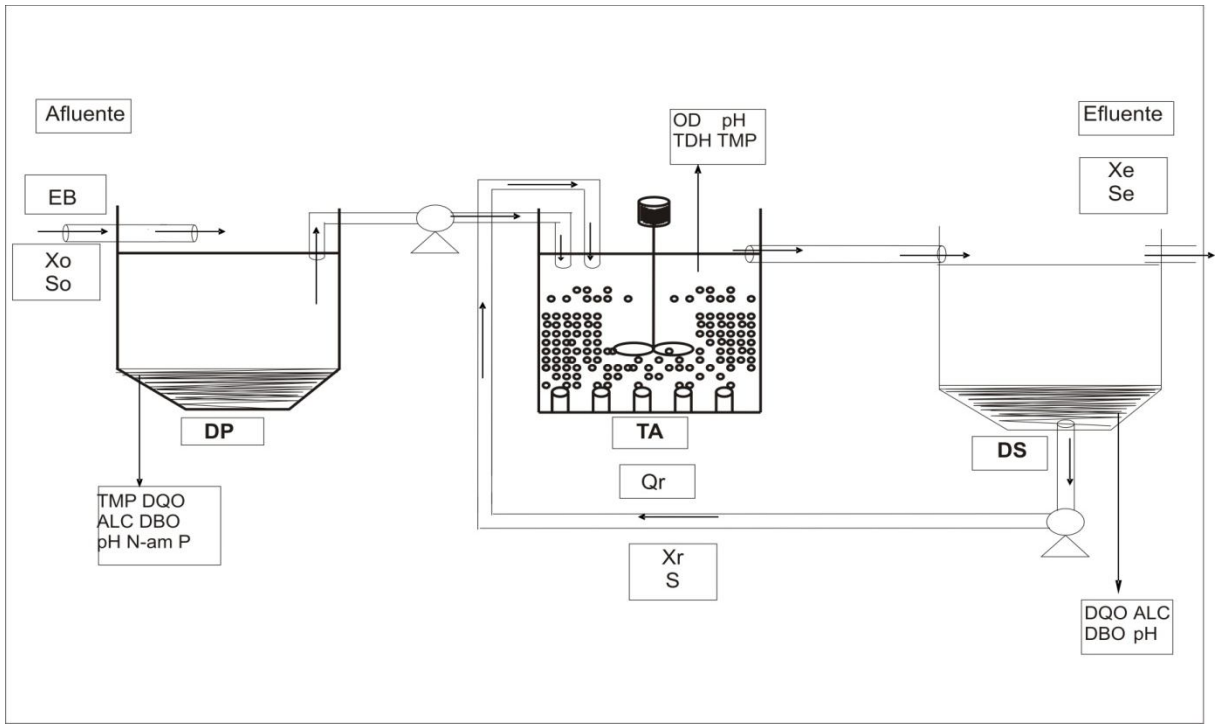

Figura 2.5ETE de lodos ativados convencional e as devidas variáveis físicas e químicas presentes no processo
Fonte: (Sperling, 1997) com adaptações.

2.1 PROCESSO DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E NITROGENADA

O tratamento de esgoto por lodos ativados proporciona durante o processo, a remoção da matéria orgânica ou carbonácea e compostos à base de Nitrogênio como explica Lindberg (1997). Ainda segundo este autor, o processo é dividido em duas etapas: nitrificação e desnitrificação, ambas com o propósito de eliminar matéria nitrogenada.

2.1.1 Nitrificação

É a transformação do amônio (NH_4^-) em nitrato (NO_3^-) em presença de oxigênio dissolvido com auxílio de bactérias autótrofas qumiossintetizantes (Mendonça, 2005; Machado et al, 2005).

A nitrificação trata-se de uma reação química de oxiredução em que o (NH_4^-) é transformado primeiramente em nitrito (NO_2^-) e em seguida em NO_3^- como mostra a Equação 2.1 (Haandel, 1999). De acordo com Mendonça (2005) a nitrificação ocorre com concentração de OD a partir de 0,5 mgO_2/L[13]. Porém, Lara (2005) ressalta que o processo ocorre em concentração de OD a partir de 2,0 mgO_2/l onde ocorre formação de NO_2^- e a partir de 5,5 mgO_2/L de OD para formação de NO_3^+. As bactérias envolvidas na nitrificação são do gênero *Nitrossomonas* e *Nitrobacter* (Mendonça, 2005; Machado et al, 2005). Ainda de acordo com Mendonça (2005) as bactérias *Nitrossomonas* atuam na obtenção do nitrito (NO_2^-) enquanto as bactérias *Nitrobacter* atuam na obtenção de (NO_3^-)

$$2\,NH_4^+ + 3\,O_2 \rightarrow 2\,NO_2^- + 4\,H^+ + 2\,H_2O + \text{Energia} \qquad (2.1)$$

$$2\,NO_2^- + O_2 \rightarrow 2\,NO_3^- + \text{Energia}$$

É imperativo para o sucesso do processo como um todo que a nitrificação ocorra sem anomalias. Caso isso não seja possível, a desnitrificação, etapa final do processo, poderá ser comprometida (Oliveira Filho, 2011).

2.1.2 Desnitrificação

A Desnitrificação é o processo que transforma o nitrato em nitrogênio (N_2) livre (Mendonça, 2005). Ainda segundo a autora, o processo ocorre na ausência de OD além é claro da presença do nitrato.

[13] Bactérias *Nitrobacter* são mais sensíveis a baixas concentrações de OD (Mendonça, 2005).

Havendo nutrientes inorgânicos como NO_2^- ou NO_3^-, bactérias do gênero *Achromobacterium* ou e *Pseudomonas* (a mais comuns) oxidam para liberar o nitrogênio na forma gasosa como mostra a equação 2.2.

$$4NO_3^- + 5CH_2O \rightarrow 2N_2 + 5CO_2 + 7H_2O \quad (2.2)$$

O composto $5CH_2O$ que aparece na equação 2.2, segundo Haandel (1999), é a matéria orgânica que o mesmo representa na seguinte forma genérica: $C_nH_nO_n$.

A desnitrificação é a etapa final do processo no qual prepara o efluente para ser despejado de volta ao meio ambiente. Em Lindberg (1997) alerta-se que devido esta etapa ocorrer em meio anaeróbio, a concentração de OD vertida do TA para o DS não pode ser muita elevada, pois poderá prejudicar o processo como um todo.

2.2 MODELOS DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO

2.2.1 Taxa de Transferência de Oxigênio

Os mecanismos de aeração do TA são os responsáveis em injetar O_2 elevando assim a concentração de OD. Se o mecanismo de aeração for um soprador, por exemplo, suas bolhas são quem transferirão O_2 para o meio[14]. De acordo com a vazão de ar do soprador e o volume do TA o ambiente obterá uma determinada concentração de OD. A relação estabelecida entre o mecanismo de aeração e a concentração de OD é chamada de Função de Transferência de Oxigênio ou Taxa de Transferência de Oxigênio (K_La) (Lindberg, 1997).

Segundo Lindberg (1997) em uma planta real de uma ETE de lodos ativados fatores como, por exemplo, o tipo de mecanismo de aeração, a composição do lodo, projeto do tanque entre outros influenciam o K_La. Entretanto, o referido autor ressalta que o fator principal de influência é a taxa de vazão de ar em função do tempo (u(t)). Sendo assim, é o K_La que proporciona os níveis de OD ao TA para que ocorra tanto a remoção da matéria carbonácea quanto a nitrificação.

Os trabalhos de Lindberg (1997) e Sotomayor (2001) apresentam modelos de aproximação do K_La devido não haver recursos para se auferir o mesmo diretamente na planta. Segundo Bennett (1980) apud Lindberg (1997), os modelos de aproximação do K_La são de natureza não linear.

[14] Idêntico ao que é realizado por um compressor de ar em aquários de peixes ornamentais.

A Equação 2.3 apresenta o modelo exponencial de aproximação do K_La utilizado por Lindberg (1997).

$$K_La = K_1 \cdot [1 - \exp(-K_2 \cdot u)] \quad (2.3)$$

O Anexo C deste trabalho apresenta uma tabela com diversos modelos de aproximação de K_La.

2.2.2 Modelo de Dinâmica de Oxigênio Dissolvido

O O_2 é utilizado por microrganismos em suas bioatividades que por sua consomem a matéria biodegradável durante o tratamento por lodos ativados. A concentração dos microrganismos presentes no licor misto aumenta ou diminui de acordo com a concentração de OD. Esta, por sua vez dependerá de fatores como, por exemplo: a taxa de transferência de oxigênio fornecida pelo mecanismo de aeração, o volume do TA, a vazão de entrada do efluente não tratado via de regra possui baixíssimos níveis de OD.

Os autores (Bastin e Dochain, 1990) apud Lindberg (1997) apresentam um modelo contínuo de balanço de massa de oxigênio dissolvido apresentado pela Equação 2.3. Neste modelo é possível compreender melhor a dinâmica do OD que recebe influência do K_La, do volume do TA, a vazão de efluente não tratado e a bioatividade durante processo.

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{Q}{V} \cdot \left(y_{in}(t) - y(t)K_La(u(t))\right) \cdot \left(y_{sat} - y(t)\right) - R(t) \quad (2.4)$$

em que:

y(t) – Concentração de OD em mgO_2/l.

y_{in} – OD do efluente bruto ao entrar no tanque de aeração em mgO_2/l.

y_{sat} – OD de saturação em mgO_2/l.

$K_La(u)$ – taxa de transferência de em O_2 1/h

R(t) – taxa de consumo de O_2 em mgO_2/l.

u(t) – taxa de vazão de ar em função do tempo para oxigenar o TA.

Q(t) – vazão de entrada do efluente bruto no tanque de aeração em l/h

V – volume do tanque de aeração em l (sempre constante)

Segundo Lindberg (1997, p.85), *y(t)*, y_{in}, *Q(t)* e *u(t)* podem ser auferidos por sensores e que y_{sat} sempre possuirá valor constante conhecido.

O modelo possui como uma de suas entradas o *R(t)* o que representa o quanto de O_2 está sendo consumido pelos microrganismos. Trata-se de uma entrada no sistema e comporta-se como uma pertubação. Sua concentração dependerá muito da concentração de biomassa existente no lodo. De acordo com Lindberg (1997), não há como medir a *R(t)* em tempo de uso no instante t. Na obra de Haandel (1999) a determinação da taxa de consumo de oxigênio seria a variação da concentração de OD em um dado instante t_1 com o lodo em plena aeração e um instante t_2 sem aeração como mostra a Equação 2.4.

$$R = \frac{OD_2 - OD_1}{t_2 - t_1} \tag{2.5}$$

em que:

OD_1 – Concentração de OD no instante t_1.

OD_2 – Concentração de OD no instante t_2.

Para poder utilizar o *R(t)* no modelo apresentado pela equação 2.3, os autores Lindberg (1997) e Sotomayor (2001) propõem o uso de modelos de aproximação do R(t). Os modelos: caminhada aleatória e caminhada aleatória filtrada, são apresentados, respectivamente, pelas Equações 2.5 e 2.6 apresentados por Lindberg (1997)

$$R(t) = \frac{1}{1 - q^{-1}} \cdot e_{rw}(t) \tag{2.6}$$

$$R(t) = \frac{1}{(1 - f \cdot q^{-1}) \cdot (1 - q^{-1})} \cdot e_{rw}(t) \tag{2.7}$$

em que:

R(t) – Taxa de consumo de oxigênio.

e_{rw} – Ruído branco de média zero.

f – Polo do filtro

Um caso especial de caminhada aleatória filtrada (Equação 2.6) apresentada em Lindberg (1997), é obtido quando ajusta-se $f = 1$. Por conseguinte, a Equação 2.6 é reescrita na Equação 2.7

$$R(t) = (1 + f) \cdot R(t - 1) - f \cdot R(t - 2) + e_{rw}(t) \tag{2.8}$$

2.3 MODELO DE TRATMANTO DE ESGOTO POR LODOS ATIVADOS ASM1

O tratamento de águas residuárias por lodos ativados surgiu no inicio do Século XX, entretanto foi na década de cinquenta que surgiram os primeiros trabalhos de propostas de modelos para o sistema. O modelo experimental Eckenfelder, (1955) apud Huo, (2005) consiste na relação da carga da planta de tratamento de esgoto por lodos ativados com a qualidade da água, estudando o crescimento de microorganismo em um reator de bateladas.

Outro modelo de referência é o de Lawrence-McCarty, (1971) apud Huo, (2005) que conseguiu identificar a independência entre o tempo de residência do sólido[15] e o tempo de residência hidráulica[16].

Os dois modelos de Eckenfelder (1955) apud Huo (2005) e o de Lawrence-McCarty (1971) apud Huo (2005) serviram de base a concepção de outros. Entretanto no ano de 1986 a IWA – International Water Association reuniu diversos especialistas da área para estudar um modelo de referência de lodos ativados sendo o primeiro resultado apresentado por Henze et al (2000), o modelo ASM1 - Activated Sludge Model No.1.

O ASM1 - Activated Sludge Model No.1 é o modelo de referência mais utilizado por profissionais aplicado em projetos e operações de estações de tratamento de esgoto que foi proposto por Henze et al (2000). O modelo consiste em uma matriz de oito processos (linhas) e treze componentes (colunas)[17]. Os componentes numerados de um a oito são expressos em unidades de DQO, os componentes numerados de nove a doze são unidades de nitrogênio e o componente treze, a alcalinidade é uma unidade molar. Estes trezes componentes são classificados como: biomassa, substrato, componentes inertes, restos e oxigênio dissolvido (Huo, 2005).

Os oitos processos presentes no ASM1 são descritos abaixo por Huo (2005):

Processo 1 – Crescimento aeróbico de heterótrofos: este processo representa a degradação de substrato solúvel, resultando em biomassa heterótrofa. Ocorre também a remoção do nitrogênio da amônia.

[15] É a razão entre o volume de sólido do sistema e o volume de sólido retirado do sistema por unidade de tempo (Sperling, 1997).
[16] É a razão entre o volume de líquido do sistema e o volume de líquido retirado do sistema por unidade de tempo (Ibidem).
[17] O modelo ASM1 está na íntegra no Apêndice A.

Processo 2 – Crescimento anaeróbio de heterótrofos: compara-se com o crescimento aeróbico. O substrato biodegradável, durante o processo, atuará como receptador de elétrons, assim como o nitrogênio também recebe elétrons em condições anaeróbias.

Processo 3 – Crescimento aeróbio de autótrofos: este processo demonstra o crescimento de autótrofos (nitrificantes) ocorrendo com a energia da transformação da amônia em nitrato (nitrificação). Parta da amônia é incorporada pela biomassa. Vale ressaltar que nesta modelagem, a nitrificação ocorre sem que a NH_4^- seja transformada em NO_2^- para depois se transformar em NO_3^-. Graças à ação das bactérias envolvidas o nitrito é consumido quase que imediatamente. Alerta-se que o ASM1 não é apropriado para altíssimas concentrações de nitrogênio.

Processo 4 – Morte e quebra[18] de heterótrofos: este processo caracteriza-se pela reação de perda de heterótrofos, os quais também foram modelados com as quebras destas bactérias, ou seja, com ressurgimento de novas bactérias. Os produtos finais deste processo são: detrito de biomassa, substrato lentamente biodegradável e partículas de nitrogênio orgânico biodegradável.

Processo 5 – Morte e quebra de autótrofos: de forma idêntica ao processo quatro, a morte e a quebra de autótrofos (ressurgimentos) são modelados em conjunto. A diferença entre os processos é que o coeficiente de decaimento bacteriano é menor em relação às heterótrofas.

Processo 6 – Amonificação de nitrogênio solúvel: durante este processo ocorre a liberação de amônia em compostos de nitrogênio orgânico. A expressão é empírica, entretanto, mostrou-se muito eficaz para a conversão da modelagem conforme explicam (Dold e Marais, 1986) apud Huo (2005).

Processo 7 – Hidrólise de partículas orgânicas: este processo converte o substrato lentamente biodegradável em substrato facilmente biodegradável.

Processo 8 – Hidrólise de partículas de nitrogênio orgânico: durante o último processo, ocorre a conversão de partículas de nitrogênio orgânico biodegradável em nitrogênio biodegradável solúvel.

[18] Quebra, divisão das células, forma pela qual as bactérias se multiplicam.

3. SISTEMAS FUZZY

Atribuir valores numéricos a uma informação qualitativa pode possuir um valor relativo do ponto de vista de um observador ou especialista. Um engenheiro sanitarista, especialista em tratamento de esgoto por lodos ativados, por exemplo, pode classificar a concentração de OD de 2,5 mgO_2/l como "satisfatória" para que o processo ocorre na etapa aeróbia. Bem como outro engenheiro, também especialista neste processo, pode considerar a concentração de OD de 0,5 mgO_2/l como "satisfatória"[19]

Diante desta situação, estabelecer um valor numérico de concentração de OD satisfatória para o processo de tratamento de esgoto por lodos ativados torna-se impreciso, ou difuso. Uma solução para informações qualitativas inerentes à natureza humana é a utilização de sistemas fuzzy.

Os sistemas fuzzy utilizam termos linguísticos que é a forma com que um observador ou especialista expressa estes valores de caráter qualitativo e até seu conhecimento.

Um valor numérico possuirá um percentual que varia de 0% a 100% para representar determinado termo qualitativo denominado grau de pertinência. Ainda se referindo ao exemplo da concentração de OD, o especialista em tratamento de esgoto por lodos ativados pode estabelecer que a concentração de 2,5 mgO_2/l pode ter 100% de grau de pertinência para classificá-la como "satisfatória", enquanto a concentração de 0,5 mgO_2/l pode ter apenas 10% de grau de pertinência para classificá-la também como "satisfatória".

3.1 ELEMENTOS DE UM SISTEMA FUZZY

Todo sistema fuzzy possui alguns elementos essenciais para processar as informações qualitativas expressas em termos linguísticos em numéricos. Entre os elementos primordiais, pode-se citar: o universo de discurso, as variáveis lingüísticas, os valores linguísticos, a função de pertinência e as regras linguísticas (Wang, 1996).

3.1.1 Universo de discurso

Universo de discurso é o conjunto, ou intervalo de valores numéricos tanto de variáveis de entrada quanto de saída no qual o observador ou especialista utilizará para representar os valores qualitativos (Passino e Yurkovich, 1998). Exemplo: um engenheiro

[19] Esta suposição é feita com base em fatores climáticos que determinarão a faixa de concentração de OD satisfatória para o processo (vide Capítulo 2).

sanitarista especialista em tratamento de esgoto por lodos ativados poderá utilizar os termos: “insuficiente”, “satisfatória” e “super saturada” para qualificar a concentração de OD para o processo. O Universo de Discurso será o intervalo numérico [0, 10.0] mgO_2/l. Assim sendo, o especialista poderá estabelecer quais valores poderão representar uma concentração “satisfatória” de OD

3.1.2 Variáveis Linguísticas

A variável lingüística é um tipo de variável no qual o seu valor pode ser representado por palavras em uma linguagem natural, sendo que tais palavras são caracterizadas pelos conjuntos fuzzy definidos em um universo de discurso onde a variável lingüística é definida (Wang, 1996).

Suponha que se desejasse regular a velocidade de um agitador mecânico que irá proporcionar a oxigenação do TA com base na medição da concentração de OD, uma variável lingüística de entrada poderia ser “*OD*”, enquanto a variável lingüística de saída poderia ser “*RPM*” (rotações por minuto). Um especialista que fosse regular a velocidade do agitador mecânico poderia definir como universo de discurso para a variável lingüística *OD* o exemplo do sub tópico 3.1.1: [0; 10,0], e para a variável linguística RPM o universo de discurso [100; 300]. Cada entrada e saída de um sistema fuzzy, independente da quantidade que o mesmo apresente, terá uma variável linguística associada, que por sua vez, estará associada a um universo de discurso.

3.1.3 Valores Linguísticos

Os valores lingüísticos descrevem as características das variáveis lingüísticas (Wang, 1996). No exemplo do tópico 3.1.1, a variável linguística concentração de OD poderá possuir três valores linguísticos: “insuficiente”, “satisfatório” e “super saturado”, e para variável linguística RPM do exemplo do tópico 3.1.2, o especialista poderá definir os valores linguísticos: “marcha lenta”, “marcha plena” e “marcha rápida”, por exemplo. Os valores linguísticos, por sua vez, serão representados por intervalos de valores numéricos contidos no universo de discurso da variável linguística.

Dado o universo de discurso da variável linguística concentração de OD U = [0; 10,0] mgO_2/l, os valores linguísticos: insuficiente (U_1), satisfatória (U_2) e super saturada (U_3) deverão ser representados numericamente em intervalos fechados contidos em U. Suponha que um especialista defina então U_1 = [0;2,0], U_2 = [1,5; 7,5] e U_3 = [7,0; 10,0]. Para a variável lingüística velocidade, o especialista poderia representar o universo de discurso Y =

[100; 300] RPM, e os valores linguísticos marcha lenta, marcha plena e marcha rápida são definidos, respectivamente, a_1 = [100; 180], a_2 = [160; 250] e a_3 = [220; 300].

3.1.4 Funções de Pertinência

A função de pertinência atribui um grau de verdade ou falsidade de um valor lingüístico a partir de um valor numérico pertencente ao universo de discurso (Wang, 1996). Este grau de certeza é denominado de grau de pertinência e varia no intervalo [0;1]. De acordo com Passino e Yurkovich, (1998), dado o universo de discurso *U*, e um valor numérico U_i, tal que $U_i \in U$, e *i* o total de elementos de *U*, a função de pertinência μ, em função de U_i é dada por $\mu y_n(U_i)$, sendo *a* variável linguística e *n* o total de variáveis linguísticas declaradas em *U*.

As funções de pertinências são representadas por funções matemáticas que por sua vez, irão definir no universo de discurso, ou seja, o intervalo numérico de uma variável lingüística. Este intervalo será o domínio de uma função de pertinência, e a imagem o intervalo [0;1] independente da função matemática que a defina. Em um plano cartesiano[20], as funções de pertinência representam graficamente os valores lingüísticos de forma linear ou não linear. As funções de pertinências mais utilizadas são do tipo **triangular** e **gaussiana** (Passino e Yurkovich, 1998), mas há também do tipo trapezoidal[21].

Utilizando como exemplo a variável linguística velocidade do sub tópico 3.1.3, a Figura 3.1 apresenta as possíveis funções de pertinência gaussiana, triangular e trapezoidal para representar, respectivamente, as variáveis linguísticas a_1, a_2 e a_3.

Como pode se observar na Figura 3.1, um valor numérico pertencente a U poderá ter diferentes graus de pertinência, dependendo do intervalo de definição da variável linguística e da função de pertinência. Utilizando como exemplo o universo de discurso e as variáveis lingüísticas da figura 3.1, seja U_1 = 226, tal que $U_1 \in U$, pode-se observar que este valor pertence aos intervalos de definição das três variáveis linguísticas e assim possui um grau de pertinência de acordo com este intervalo e a função de pertinência como mostra a Tabela 3.1.

O especialista pode personalizar uma função de pertinência de natureza tanto linear quanto não linear para qualquer variável lingüística, observando sempre seu intervalo de definição deverá está contido no universo de discurso.

---

[20] Eixo *x* é o universo de discurso e o eixo *y* é o intervalo [0;1].

[21] A função triangular é um caso particular de função trapezoidal, como um trapézio possui quatro vértices (*a*, *b*, *c*, *d*) em um plano, para formar um triangulo basta que dois vértices sejam iguais então os vértices do triangulo seriam, por exemplo, (*a*, *b* = *c*, *d*) ou (*a*, *b*, *c* = *d*).

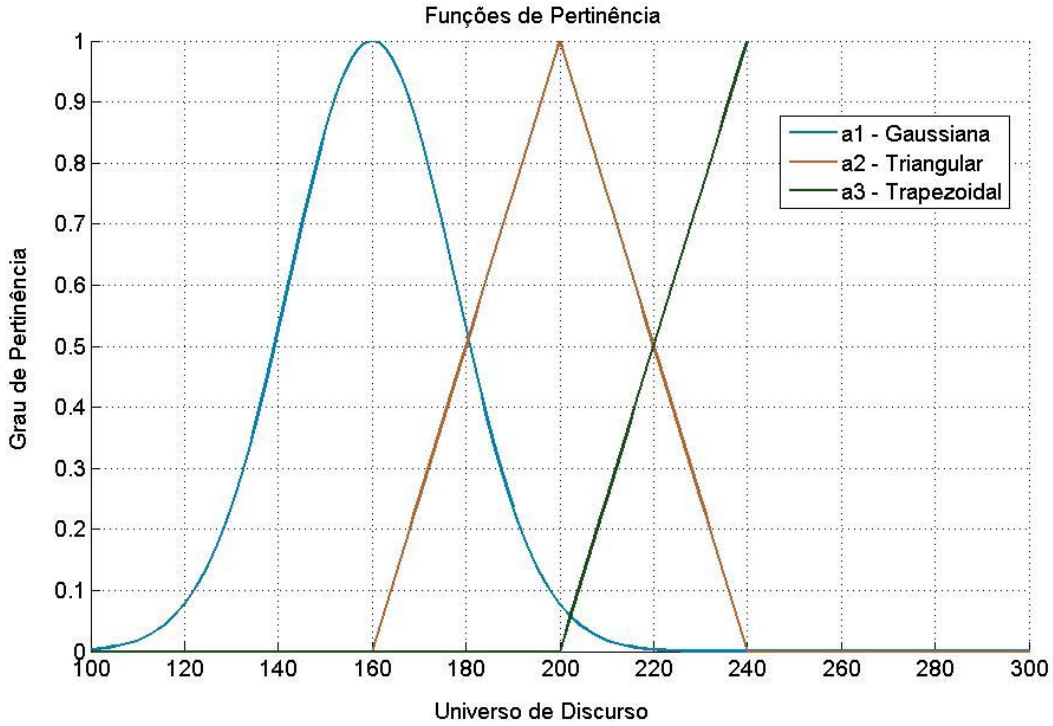

Figura 3.1 Funções de pertinência da variável linguística RPM que definem os valores lingüísticos: marcha lenta, marcha plena e marcha rápida

Tabela 3.1 Variáveis lingüísticas e seus respectivos intervalos de definição, tipo de função de pertinência e grau de pertinência

VARIÁVEL LINGÜÍSTICA	INTERVALO DE DEFINIÇÃO	TIPO DE FUNÇÃO DE PERTINÊNCIA	GRAU DE PERTINÊNCIA
Marcha Lenta (a_1)	[100; 240]	Gaussiana ($\mu a_1(u)$)	0,007
Marcha Plena (a_2)	[160; 240]	Triangular ($\mu a_2(u)$)	0,600
Marcha Rápida (a_3)	[200; 300]	Trapezoidal ($\mu a_3(u)$)	0,120

3.1.5 Regras Lingüísticas

O mapeamento dos valores numéricos de entrada e saída de um sistema fuzzy é realizado por um conjunto de regras condição → ação ou na forma SE-ENTÃO, onde SE é a premissa e o ENTÃO o conseqüente. É praxe que os valores de entrada sejam associados à premissa e os de saída ao consequente. Dependendo da quantidade de conjuntos de entrada e saída de um sistema fuzzy as regras SE-ENTÃO podem ser representadas em várias formas (Passino e Yurkovich, 1998).

De acordo com a combinação de entradas e saídas há quatro tipos de sistemas:

SISO – Uma entrada e uma saída

SIMO – Uma entrada e múltiplas saídas

MISO – Múltiplas entradas e uma saída

MIMO – Múltiplas entradas e várias saídas

Se um especialista desejasse controlar a velocidade do agitador mecânico responsável pela oxigenação no TA com base na medida da concentração de OD utilizando termos linguísticos, a variável linguística de entrada seria "concentração de OD" (premissa) e a variável linguística de saída seria RPM (consequente). Os valores linguísticos estão associados às suas variáveis lingüísticas e para cada condição da premissa, há um consequente. Exemplo para um sistema fuzzy SISO:

SE *concentração de OD* é "insuficiente", ENTÃO a *RPM* é "marcha rápida"

SE *concentração de OD* é "satisfatória", ENTÃO a *RPM* é "marcha plena"

Utilizando o mesmo exemplo, se o especialista desejasse regular a velocidade do agitador mecânico levando em consideração agora duas variáveis de entrada "*concentração de OD*" e "*pH*". Suponha que os valores linguísticos: "ácido", "neutro" e "básico" sejam atribuídos para a variáveis linguísticas "*pH*" e que a variável linguística de saídam *RPM*, possua os mesmos valores linguísticos do exemplo acima, obtém-se então um sistema fuzzy MISO com duas possíveis regras:

SE *concentração de OD* é "insuficiente" E *pH* é "ácido", ENTÃO a *RPM* é "marcha rápida"

SE *concentração de OD* é "satisfatória" E *pH* é "neutro", ENTÃO a *RPM* é "marcha lenta"

Segundo Passino e Yurkovich, (1998), se todas as premissas são utilizadas em cada regra, e esta por sua vez é formada pelas possíveis combinações de elementos da premissa, obtém-se a base de regras com regras. No exemplo do sistema MISO acima, há duas entradas (n = 2) e ambas com três valores lingüísticos (N_i = 3). Logo, o número de combinações possíveis para cobrir tidas as condições será 3 x 3 = 9, como mostra a Equação 3.1

$$\prod_{i=2}^{n} = N_1 \cdot N_2 \cdot \ldots \cdot N_n \tag{3.1}$$

3.1.6 Conjuntos Fuzzy

Os conjuntos fuzzy são pares de valores numéricos formados entre os valores do universo de discurso e seus respectivos graus de pertinências (Passino e Yurkovich, 1998).

Utilizando o exemplo do sub tópico 3.1.4, seja *A* o conjunto fuzzy formado pelos pares resultantes do mapeamento entre o valor U_1 = 226 e os graus de pertinência obtidos das funções de pertinência $\mu a_1(U_1)$, $\mu a_2(U_1)$ e $\mu a_3(U_1)$:

$$A = \{(226;0,007), (226; 0,600), (226; 0,1200)\} \quad (3.2)$$

3.2 SISTEMA FUZZY DO TIPO MANDANI

O sistema fuzzy do tipo Mandani é o mais comum e mais utilizado inclusive em controle como propõem os autores Wang, (1996), Passino e Yurkovich, (1998). O sistema fuzzy do tipo Mandani possui quatro elementos: fuzzificador, base de regras fuzzy, máquina de inferência e defuzzificador[22], como mostra a Figura 3.2.

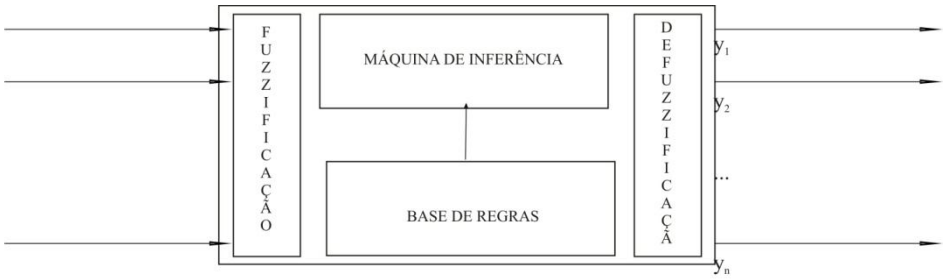

Figura 3.2 Esquema de um sistema fuzzy do tipo Mandani.
Fonte: (Passino e Yurkovich, 1998) (com adaptações)

3.2.1 fuzzificador

A fuzzificação consiste no mapeamento de um número U_i no universo de discurso de entrada *U*, em um conjunto fuzzy (Wang, 1996). Segundo Passino e Yurkovich, (1998), através de fuzzificação é que o valor U_i poderá ser processado no sistema fuzzy. Os fuzzificadores mais utilizados são: *singleton*, gaussiana e triangular, sendo o primeiro o mais utilizado porque os demais demandam um custo computacional maior (Wang, 1996).

3.2.2 Base de Regras Fuzzy

A base de regras consiste em um conjunto de regras SE-ENTÃO. Exemplo: dado o universo de discurso *U* e os valores numéricos de uma variável lingüística de entrada U_1, U_2, U_3, tal que U_1, U_2, U_3 pertencem a *U* e a_1, a_2 e a_3 valores linguísticos de entrada (conjuntos fuzzy), e y_1 um valor numérico da variável linguística de saída, que por sua vez pertence a um

[22] Devido este trabalho não utilizar sistema fuzzy do tipo Mandani será feita uma sucinta explicação sobre estes elementos.

universo de discurso Y e b_1, o valor linguístico de saída (conjunto fuzzy). Uma base de regras fuzzy é definida como (Wang, 1996):

SE (U_1 é a_1) E (U_2 é a_2) E (U_3 é a_3) ENTÃO (y_1 é b_1) (3.3)

3.2.3 Máquina de Inferência

A máquina de inferência é quem determina qual das regras, do conjunto de regras fuzzy definidas, será ativada de acordo com os valores das entradas (Passino e Yurkovich, 1998), vide a Figura 3.2. Os cinco tipos de máquinas de inferência mais conhecidas são segundo Wang, (1996): Produto, Mínimo, Zadeh, Lukasiewicz e Dienes-Rescher.

3.2.4 Defuzzificador

O defuzzificador mapeia o conjunto fuzzy obtido na saída da máquina de inferência em um valor numérico de saída, o qual pertencente a um universo de discurso da variável de saída. Os três tipos mais utilizados de defuzzificadores são de acordo com Wang, (1996): Máximo Valor, Centro Ponderado e Centro de Gravidade, que por sua vez, é o mais utilizado.

3.3 SISTEMA FUZZY DO TIPO TAKAGI-SUGENO

O sistema fuzzy do tipo Takagi-Sugeno é um caso especial de “sistema fuzzy funcional”. O sistema fuzzy do tipo Mandani é denominado de “sistema fuzzy padrão” (Passino e Yurkovich, 1998).

Ambos os tipos de sistemas: funcional e padrão no que tange à entrada de valores são idênticos, pois assumem valores linguísticos com função de pertinência definidas. A diferença está na saída onde não há função de pertinência. O conseqüente da base de regras possui uma função definida como $y = g_i(.)$, sendo i = 1, 2, 3, ..., n e n o total de saídas, y a variável de saída, g a função associada à saída e (.) o argumento da função conforme explica Passino e Yurkovich, (1998). Ainda de acordo com estes autores, a função g pode qualquer função, inclusive, um outro sistema fuzzy ou até mesmo um mapeamento por redes neurais artificiais.

Exemplo: um sistema fuzzy funcional MISO com fuzzificador singleton e variáveis linguísticas de entrada U_1, U_2 e U_3, y variável liguística de saída, a_1, a_2 e a_3 os valores fuzzy de entrada, b_1 o valor numérico de saída e g_1 uma função associada à saída y, a base de regras fuzzy seria definida na seguinte forma:

SE (U_1 é a_1) E (U_2 é a_2) E (U_3 é a_3) ENTÃO ($y = g_1(.)$) (3.4)

É importante, em um sistema fuzzy funcional, a definição de operadores adequados como por exemplo (Passino e Yurkovich, 1998): a máquina de inferência seja Produto ou Mínimo, e a defuzzificação seja pelo Centro Ponderado. Neste caso um sistema fuzzy de Mandani se equivale ao de takagi-sugeno, com função de saída constante.

3.3.1 Interpolação entre Mapeamentos Lineares

Um sistema fuzzy Takagi-Sugeno pode realizar uma interpolação não linear entre mapeamentos lineares. O mapeamento linear ocorre com funções lineares, mas por conveniência mapeamento afim (de função afim) é denominado também de mapeamento linear (Passino e Yurkovich, 1998).

Exemplo, um sistema fuzzy TS com uma entrada U_1 com dois conjuntos fuzzy de entrada a_1 e a_2 definidas, respectivamente, nos intervalos [-10; 6] e [-6; 10] e ambas os conjuntos com funções de pertinência trapezoidal $\mu 1$ e $\mu 2$ representando, respectivamente, a_1 e a_2 conforme mostra a Figura 3.3. Sejam y_1 e y_2 os valores reais de saída, e g_1 e g_2 as funções de saída de y_1 e y_2 respectivamente.

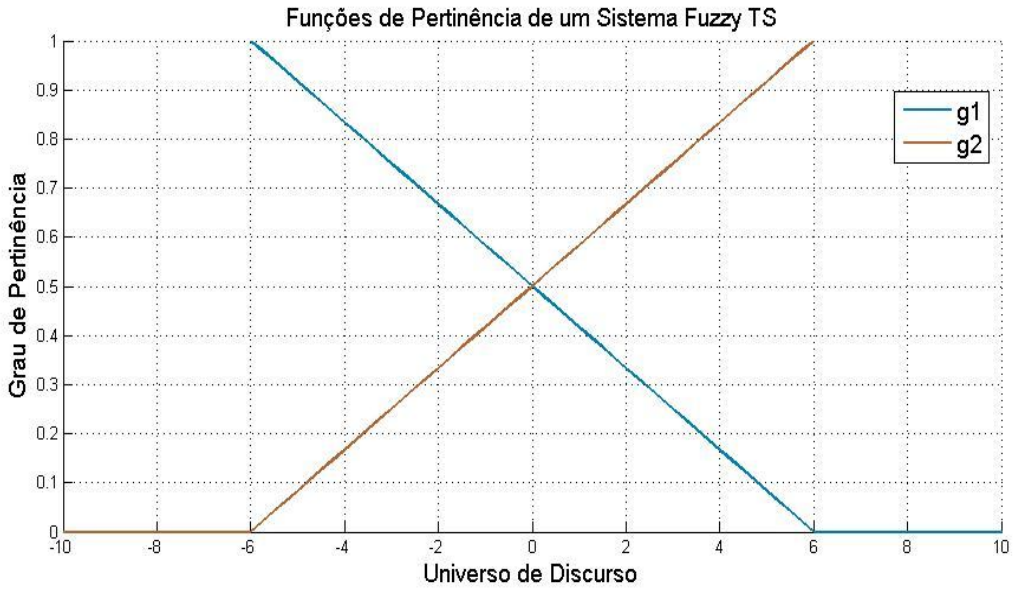

Figura 3.3 Representação de um sistema fuzzy TS com um entrada e funções de pertinência trapezoidal

A base de regras do sistema fuzzy TS é definida na seguinte forma:

SE (U_1 é a_1) ENTÃO ($y_1 = g_1(.) = 2 + U_1$) (3.5)

SE (U_2 é a_2) ENTÃO ($y_2 = g_2(.) = 1 + U_2$)

Analisando a base de regras e as funções de pertinência da Figura 3.3, se, por exemplo, $U_1 = -8$, $\mu_1 = 0$ e $\mu_2 = 1$, então $y_1 = 2 + U_1$ e $y_2 = 0$, e se $U_1 = 8$, e se $U_1 = 8$, $\mu_1 = 1$ e $\mu_2 = 0$, então $y_1 = 0$ e $y_2 = 1 + U_1$. Entretanto, se $U_1 = 0$, $\mu 1 = 0.5$ e $\mu 2 = 0.5$, logo saída do sistema fuzzy TS será uma interpolação de y_1 e y_2.

3.3.2 Interpolação entre Sistemas Lineares

Um sistema fuzzy TS pode ter qualquer tipo de mapeamento como função de saída. Entretanto outra aplicação bem prática e de sua saída ser um interpolador não linear para funções lineares (Passino e Yurkovich, 1998).

Exemplo, ainda utilizando a Figura 3.3, um sistema fuzzy TS com uma entrada U_1 com dois valores lingüísticos de entrada a_1 e a_2 definidas, respectivamente, nos intervalos [-10; 6] e [-6; 10] e ambos com funções de pertinência trapezoidal μ_1 e μ_2 representando, respectivamente, a_1 e a_2 conforme mostra a Figura 3.3. Sejam y_1 e y_2 os valores reais de saída, e g_1 e g_2 as funções de saída de y_1 e y_2 respectivamente.

Analisando a base de regras e as funções de pertinência da Figura 3.3, se, por exemplo, $U_1 = -8$, $\mu_1 = 0$ e $\mu_2 = 1$, então $y_1 = -x_1 + 2\ U_1$ e $y_2 = 0$, e se $U_1 = 8$, e se $U_1 = 8$, $\mu_1 = 1$ e $\mu_2 = 0$, então $y_1 = 0$ e $y_2 = -2x_1 + U_1$. Entretanto, se $U_1 = 0$, $\mu_1 = 0{,}5$ e $\mu_2 = 0{,}5$, logo saída do sistema fuzzy TS será uma interpolação de y_1 e y_2.

4. PROJETO DO CONTROLADOR

A planta de lodos ativados, para qual propõe-se projetar uma estratégia de controle, foi apresentada no Capítulo 2 e ilustrada na Figura 2.4. A ação de controle atuará via mecanismo de aeração. Uma vez projetado o controlador, as simulações para averiguação de desempenho serão realizados em ambiente Matlab/Simulink.

Serão projetados três controladores locais do tipo PI em três pontos de operações: para concentrações de OD a 2,0 mgO_2/l, 3,75 mgO_2/l e 5,5 mgO_2/l, pois é nesta faixa de operação que ocorre o processo de nitrificação (Lara, 2005). Em seguida, projetar-se-á um controlador fuzzy do tipo TS o qual irá interpolar os ganhos proporcionais e integrais dos controladores locais à medida que a diferença entre o valor medido e o valor de referência para controle se aproxime do ponto de operação para o qual cada ganho foi projetado.

O projeto dos controladores PI será realizado a partir da linearização do modelo contínuo de Oxigênio Dissolvido apresentado pela Equação 2.3 (Bastin e Dochain, 1990) apud (Lindberg, 1997). Em seguida o controlador fuzzy TS será projetado a partir de parâmetros do ponto de vista de um especialista.

4.1 CONTROLADOR PROPORCIONAL E INTEGRATIVO

O controlador proporcional e integativo é todo aquele que possui uma ação de controle proporcional acrescida da ação de controle integral, gerando a seguinte ação de controle (Ogata,1982):

$$u(t) = K_P \cdot \mathrm{e(t)} + K_i \cdot \int_0^t e(t)dt \qquad (4.1)$$

Através da ação de controle integral, o controlador pode gerar um sinal de controle finito a partir de um sinal de erro nulo. Outro ponto importante de se registrar é que o controle integral reduz ou elimina o erro de estado estacionário, entretanto, a estabilidade pode ser reduzida.

4.2 O MODELO CONTÍNUO DE OD

O projeto dos controladores PI será realizado a partir do modelo contínuo de OD apresentado no sub-tópico 2.7 que será linearizado pelo método de Expansão por Séries de

Taylor (Ogata, 1982). A partir da linearização será possível projetar os controladores PI para os três pontos de operação definidos neste projeto.

O modelo contínuo de OD utiliza, como entrada do sistema, três elementos principais: a razão entre vazão de entrada do efluente não tratado e a o volume do TA ($\frac{Q}{V}$), o $K_L a$ e o *R(t)*[23]. O K_La possui diversos modelos de aproximação[24]. Este trabalho utilizará o modelo arco tangente apresentado no Anexo C (Nakajima et al 1996) apud (Sotomayor, 2001), (Lindberg e Carlsson, 1996) apud (Sotomayor, 2001), (Lindberg, 1997).

Em relação à entrada *R(t)* que também possui mais de um modelo de aproximação[25], por simplificação, o R(t) será considerado, neste trabalho, como uma constante na linearização.

4.3 A LINEARIZAÇÃO DO MODELO CONTÍNUO DE OD

A linearização do modelo contínuo de OD apresentado no Capítulo 2, sub tópico 2.7 será realizada usando Expansão de Séries de Taylor (Ogata, 1982). O primeiro passo será reescrever a equação do modelo de balanço de massa de OD[26] (Equação 4.1), em espaço de estados como mostra a Equação 4.2:

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{Q}{V}.\left(y_{in}(t) - y(t)K_L a(u(t))\right).\left(y_{sat} - y(t)\right) - R(t) \tag{4.1}$$

Para linearizar a Equação 4.1, em torno de um ponto de equilíbrio, pode-se denominar as variáveis *y, u* e *R* como, respectivamente, *x, u_1* e *u_2* e reescrever a equação na forma

$$\dot{x} = \frac{Q}{V} \cdot [y_{in} - x] + K_L a(u) \cdot [y_{sat} - x] - R \tag{4.2}$$

Assim, fazendo a Expansão de Séries Taylor para a Equação 4.2, obtém-se (Khalil, 2002):

$$f(x, u_1, u_2) \cong f(x^0, u_1^0, u_2^0) + a \cdot \delta x + a_1 \cdot \delta x_1 + a_2 \cdot \delta x_2 \tag{4.3}$$

$$a = \left.\frac{\partial f}{\partial x}\right|_{x^0, u_1^0, u_2^0} = \frac{-Q}{V} - K_L a(u^0) \tag{4.4}$$

[23] Vide Equações 2.5 e 2.6
[24] Vide Capítulo 2, sub tópico 2.4.1
[25] Ibdem
[26] As definições das variáveis encontram-se no Capítulo 2, sub tópico2.4.1

$$b_1 = \left.\frac{\partial f}{\partial u_1}\right|_{x^0,u_1^0,u_2^0} = [y_{sat} - x^0] \cdot \left.\frac{\partial K_L a(u_1)}{\partial u}\right|_{x^0,u_1^0,u_2^0} \quad (4.5)$$

$$b_2 = \left.\frac{\partial f}{\partial u_2}\right|_{x^0,u_1^0,u_2^0} = -1 \quad (4.6)$$

No sistema em estudo, *R* é um constante, logo $\delta u_2 = 0$, e as variáveis restantes são δx e δu. Como (x^0, u_1^0) é um ponto de equilíbrio, então:

$$f(x^0, u_1^0, u_2^0) = 0 \quad (4.7)$$

$$f(x, u_1, u_2) = \delta\dot{x} \therefore \delta\dot{x} = a \cdot \delta x + b_1 \cdot \delta u_1 \quad (4.8)$$

$$s \cdot \Delta\dot{X} = a \cdot \Delta X(s) + b_1 \cdot \Delta u_1(s) \quad (4.9)$$

$$(s - a) \cdot \Delta X = b_1 \cdot \Delta u_1(s)$$

$$\Delta X(s) = \frac{b_1}{(s - a)} \cdot \Delta u_1(s)$$

Assim, retomando as variáveis originais, chega-se à seguinte relação:

$$\Delta y(s) = \frac{b_1}{(s - a)} \cdot \Delta u_1(s) \quad (4.10)$$

Definindo-se $\alpha \triangleq -a$ e $\beta \triangleq b_1$, obtém-se o seguinte modelo linearizado:

$$G(s) = \frac{\beta}{(s + \alpha)} = \frac{K}{(\tau_s + 1)} \quad (4.11)$$

Onde $\tau = \frac{1}{\alpha}$ é a constante de tempo e $\tau = \frac{\beta}{\alpha}$ é o ganho estático do sistema.

Como foi definido no sub tópico 4.2, o modelo de aproximação escolhido é o do arco tangente, assim sendo, substituindo o $K_L a$ da Equação 4.14 pelo modelo escolhido, obtém-se o novo valor de como mostra a Equação 4.17

$$\beta = (y_{sat} - x^o) \cdot \frac{\partial}{\partial u_1} \cdot [k_1 \cdot \arctan(u_1 \cdot k_2)] \quad (4.12)$$

$$\beta = (y_{sat} - x^o) \cdot \frac{\partial}{\partial u_1} \cdot [k_1 \cdot \frac{\partial \arctan(u_1 \cdot k_2)}{\partial u_1 \cdot k_2}] \quad (4.13)$$

$$\beta = (y_{sat} - x^o) \cdot \frac{\partial}{\partial u_1} \cdot [\frac{k_1 \cdot k_2}{1 + (u_1 \cdot k_2)^2}] \quad (4.14)$$

4.4 PROJETO DOS CONTROLADORES PI LOCAIS

Os controladores PI foram calculados utilizando os seguintes valores utilizados em Lindberg (1997) conforme mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 Valores atribuídos às variáveis da equação 2.3

VARIÁVEL	VALORES
y_{in}	0 mgO_2/l
y_{sat} [27]	10 mgO_2/l
Q	1000 l/h
V	630 l
K_1	15
K_2	15/1000
R	20

A função de transferência de um controlador PI foi obtida em Landau, (1990) conforme mostra a equação 4.15:

$$PI(s) = k_p + \frac{k_I}{s} \tag{4.15}$$

Os controladores PI serão projetados de forma que a constante de tempo para o sistema em malha fechada (τ_0) seja metade da constante de tempo do sistema em malha aberta (τ) conforme equação 4.16 (Landau, 1990):

$$\tau_0 = \frac{\tau}{2} \therefore \tau_0 = \frac{\tau}{2 \cdot \alpha} \tag{4.16}$$

Os ganhos proporcionais K_P e K_I são descritos, respectivamente, pelas equações 4.20 e 4.21, também obtidas em (Landau, 1990):

$$k_p = \frac{2 \cdot \alpha}{\beta} \tag{4.17}$$

$$k_I = \frac{2 \cdot \alpha^2}{\beta} \tag{4.18}$$

A Tabela 4.2 apresenta os valores de α e β, K_P e K_I para os dois pontos de operação definidos.

4.5 PROJETO DO CONTROLADOR FUZZY

O controlador fuzzy TS será projetado para interpolar os ganhos K_P e K_I dos controladores PI projetados nos três pontos de operação definidos no início deste Capítulo como mostra a Tabela 4.2. O sistema fuzzy TS possuirá o oxigênio dissolvido (*OD*) como a única variável linguística de entrada. O universo de discurso da entrada será definido no intervalo [0 ; 7,5], baseando-se no que foi explicado no Capítulo 2 sobre as concentrações de

[27] Conforme explica Lindberg, (1997) no capítulo 2 e sub tópico 2.7, o valor de Y_{sat} é constante e conhecido

OD, onde o processo de remoção da matéria carbonácea e de nitrificação são iniciados (Lara, 2005).

Tabela 4.2 Valores de, K_P e K_I calculados para os dois pontos de operação x° = 2,00 mgO2/l, x° = 3,75 mgO2/l e x° = 5,50 mgO2/l

	x° = 2,00 mgO_2/l	x° = 3,75 mgO_2/l	x° = 5,50 mgO_2/l
α	-4,484	-5.7397	-7,972
β	0,267	0,2028	0,187
K_P	41,383	55,1379	85,424
K_I	185,568	316,4741	680,979

4.5.1 Variável de Entrada

A variável de entrada *OD* possui em seu universo de discurso, três valores linguísticos: *BAIXO, MEDIO* e *ALTO*. Estes valores linguísticos são representados nos conjuntos fuzzy cujas funções de pertinências são mostradas na Figura 4.1.

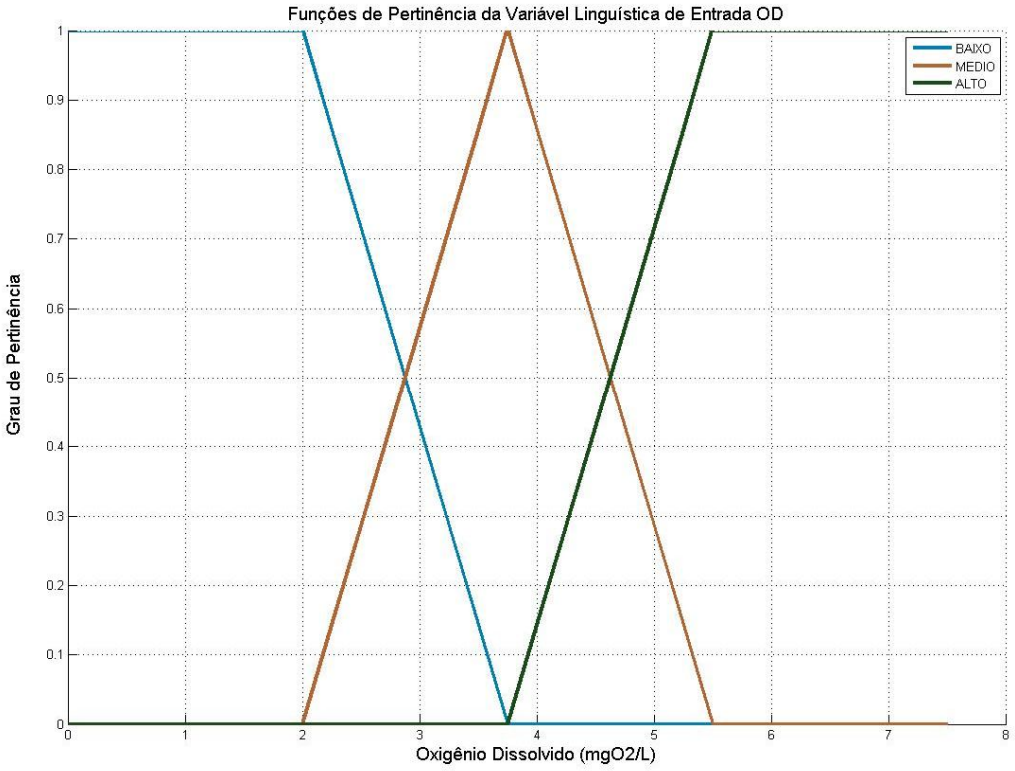

Figura 4.1 Universo de discurso e funções de pertinência da variável de entrada do sistema fuzzy TS

4.5.2 Variáveis de Saída

O sistema fuzzy TS proposto neste trabalho possui duas variáveis de saída: K_P e K_I. A variável K_P possui três valores: *BAIXO*, *MEDIO* e *ALTO*, cujos valores numéricos são definidos na Tabela 4.2, para os pontos de operação $x°$ = 2,00 mgO2/l, $x°$ = 3,75 mgO2/l e $x°$ = 5,50 mgO2/l, respectivamente.

A saída K_I, também possui três valores: *BAIXO*, *MEDIO* e *ALTO*, cujos valores numéricos são definidos na Tabela 4.2, para os pontos de operação $x°$ = 2,00 mgO2/l, $x°$ = 3,75 mgO2/l e $x°$ = 5,50 mgO2/l, respectivamente.

A Tabela 4.3 sintetiza os valores linguísticos e numéricos de suas respectivas variáveis de saída por ponto de operação.

Tabela 4.3 Valores lingüísticos e valores numéricos das variáveis de saída do controlador fuzzy TS

VARIÁVEL DE SAÍDA	VALORES LINGUÍSTICOS	VALORES NUMÉRICOS	PONTO DE OPERAÇÃO
KP	BAIXO	41,383	2,00 mgO_2/l
KP	MEDIO	55,1379	3,75 mgO_2/l
KP	ALTO	85,424	5,50 mgO_2/l
KI	BAIXO	185,568	2,00 mgO_2/l
KI	MEDIO	316,4741	3,75 mgO_2/l
KI	ALTO	680,979	5,50 mgO_2/l

4.5.3 Base de Regras

O objetivo do controlador fuzzy TS deste trabalho é interpolar os ganhos K_P e K_I de três controladores fixos PI projetados para três pontos de operação definidos no início deste Capítulo. Para tal, a base de regra deve indicar os valores de K_P e K_I projetados para os três pontos e operação definidos neste trabalho, conforme o grau de pertinência dos valores de entrada de *BAIXO*, *MEDIO* e *ALTO*.

A base de regra do controlador será definida como:

SE (OD é BAIXO) ENTÃO (K_P = BAIXO E K_I = BAIXO) (4.24)
SE (OD é MEDIO) ENTÃO (K_P = MEDIO E K_I = MEDIO)
SE (OD é ALTO) ENTÃO (K_P = ALTO E K_I = ALTO)

4.6 PLANTA EM MALHA FECHADA

A partir do projeto dos controladores PI locais e do controlador Fuzzy TS, implementou-se em Matlab/Simulik a planta em malha fechada de uma ETE de lodos ativados, como mostra a Figura 4.2.

A planta ilustrada na Figura 4.2 irá testar o desempenho do controlador (CTS) aplicando-se um degrau na vizinhança do ponto de operação. Como foi explicado, de acordo com o valor de entrada, a base de regras irá interpolar os ganhos K_P e K_I. Cada um destes valores será multiplicado pelo erro entre o valor de referência (*OD*) e o valor de saída na planta (*y*). Em seguida, estes produtos são somados resultando na ação de controle que atuará no modelo de Balanço de Massa de OD (*u(t)*).

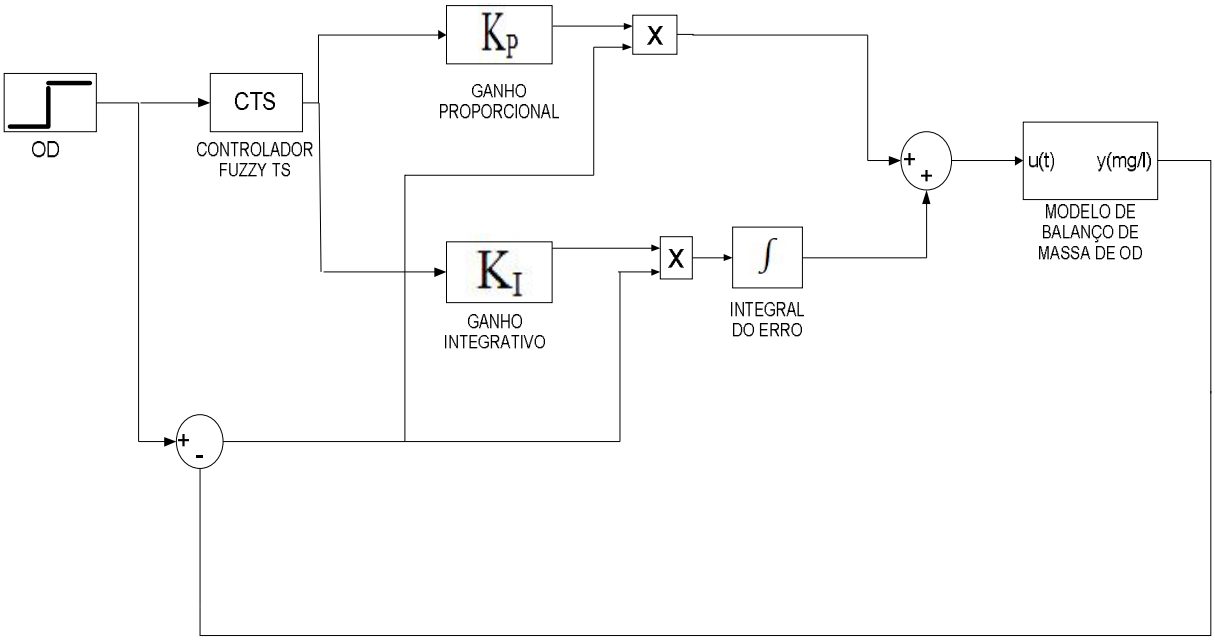

Figura 4.2 Planta em malha fechada da ETE de tratamento de esgoto por lodos ativados

5. RESULTADOS DE ESTUDO E SIMULAÇÃO

A simulação analisou quatro itens de desempenho: sobre sinal (em %), tempo de acomodação (em segundos), tempo de subida (em segundos) e erro em regime (em mgO_2/l) a partir de um degrau aplicado na vizinhança do ponto de operação.

5.1 ENSAIOS PRELIMINARES

Inicialmente foi realizado três ensaios entre três controladores fixos projetados para os valores de referência $x° = 2{,}00\ mgO_2/l$, $x° = 3{,}75\ mgO_2/l$ e $x° = 5{,}50\ mgO_2/l$. Cada ensaio foi realizado utilizando como ponto de operação os mesmos valores para qual os controladores fixos foram projetados e aplicando um degrau (5% de x^0) (*YREF*) apenas para averiguar o desempenho destes controladores nos pontos para o qual foram projetados.

5.1.1 Análise do Ensaio para o Ponto de Operação $x° = 2{,}00\ mgO_2/l$

O primeiro quesito a ser analisado no ensaio para o ponto de operação $x° = 2{,}00\ mgO_2/l$, é o tempo de subida. O controlador PI 1 foi mais rápido entre os três, pois seu tempo de subida foi de aproximadamente 7,42% a menos em relação ao tempo do controlador PI 3 (projetado para o ponto de operação $x° = 3{,}75\ mgO_2/l$), e foi aproximadamente quatorze vezes mais rápido em relação controlador PI 2 (projetado para o ponto de operação $x° = 5{,}50\ mgO_2/l$) .

Analisando o tempo de acomodação, o controlador PI 1 também obteve desempenho um pouco superior aos demais. A diferença entre o controlador PI 1 e o controlador PI 2 foi de 0,115 s e a diferença em relação ao controlador PI 3 foi de apenas 0,165 s.

O sobressinal foi nulo para os controladores PI 1 e PI 3. Mas o controlador PI 2 apresentou um valor ínfimo 0,2000%. Desta forma, pode-se afirmar que os três controladores obtiveram um desempenho equivalente.

Por fim, em relação ao quesito erro em regime, o valor foi nulo para os três controladores e assim, obtiveram o mesmo desempenho.

O desempenho do controlador PI 1 em relação aos demais foi superior aos demais no quesitos tempo de subida e tempo de acomodação devido ter sido projetado na vizinhança do pronto de operação do ensaio.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.1 e as curvas de desempenho na Figura 5.1.

Tabela 5.1 Desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 2,00 aplicando um degrau de 5% de x°

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI 1	0,0650	0,0000%	7,1850	0,0000
PI 2	0,9000	0,2000%	7,3000	0,0000
PI 3	0,0700	0,0000%	7,3500	0,0000

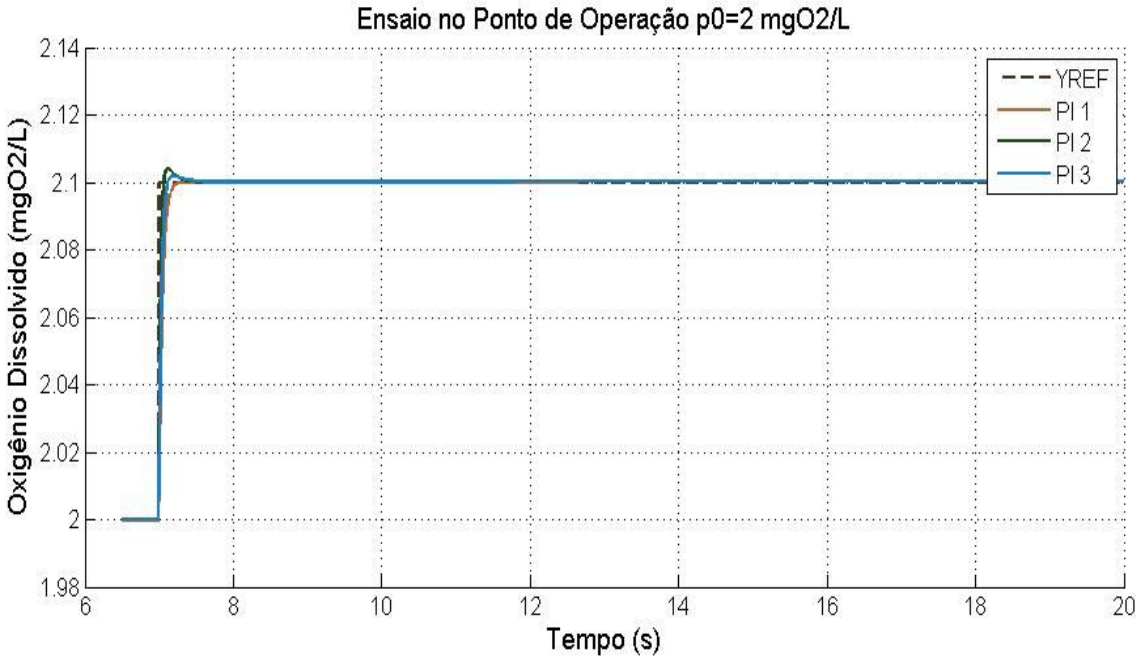

Figura 5.1 Curvas de desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 2,0 mgO2/l aplicando um degrau de 5% de x°

5.1.2 Análise do Ensaio para o Ponto de Operação x° = 3,75 mgO_2/l

Iniciando a análise do ensaio para o ponto de operação *x*° = 3,75 mgO2/l pelo tempo de subida, constatou-se que o controlador PI 3 foi mais rápido em relação ao controlador PI 1. O tempo de subida de PI 1 foi aproximadamente três maior que o tempo de subida de PI 3. Entretanto com se comparar o controlador PI 2, tanto este controlador quanto o controlador PI 3 obtiveram o mesmo desempenho.

Analisando o quesito tempo de acomodação, observou-se que o controlador PI 3 obteve o melhor desempenho entre os três. A diferença de tempo entre o controlador PI 1 foi de 0,2350 s e de 0,1770 s em relação ao tempo do controlador PI 2.

Observando o quesito sobressinal, constatou-se que o valor foi nulo para os controladores PI 1 e PI 3. Apenas o controlador PI 2 apresentou um valor 0,1700% que é bastante ínfimo.

Por fim, para o quesito erro em regime, os três controladores obtiveram os mesmos desempenhos, pois os valores de seus erros foram nulos.

O desempenho do controlador PI 3 em relação aos demais foi superior aos demais no quesitos tempo de subida e tempo de acomodação devido ter sido projetado na vizinhança do pronto de operação do ensaio.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.2 e as curvas de desempenho na Figura 5.2.

Tabela 5.2 Desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 3,75 aplicando um degrau de 5% de x°

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI 1	0,2550	0,0000%	7,6000	0,0000
PI 2	0,0750	0,1700%	7,540	0,0000
PI 3	0,0750	0,0000%	7,3650	0,0000

5.1.3 Análise do Ensaio para o Ponto de Operação x° = 5,50 mgO_2/l

Iniciando a análise do ensaio para o ponto de operação *x*° = 5,50 mgO2/l pelo tempo de subida, constatou-se que o controlador PI 2 foi mais rápido em relação aos demais controladores. A diferença de tempo entre o controlador PI 1 e PI 2 foi 3,4950 s, e a diferença de tempo entre o controlador PI 3 e PI 1 foi de apenas 1,5310 s.

Analisando o quesito tempo de acomodação, constatou-se que o controlador PI 2 também obteve o melhor desempenho entre os três. A diferença de tempo entre o controlador PI 1 foi de 0,9350 s e a diferença de tempo em relação ao controlador PI 3 foi de 0,3950 s em relação ao tempo do controlador PI 2.

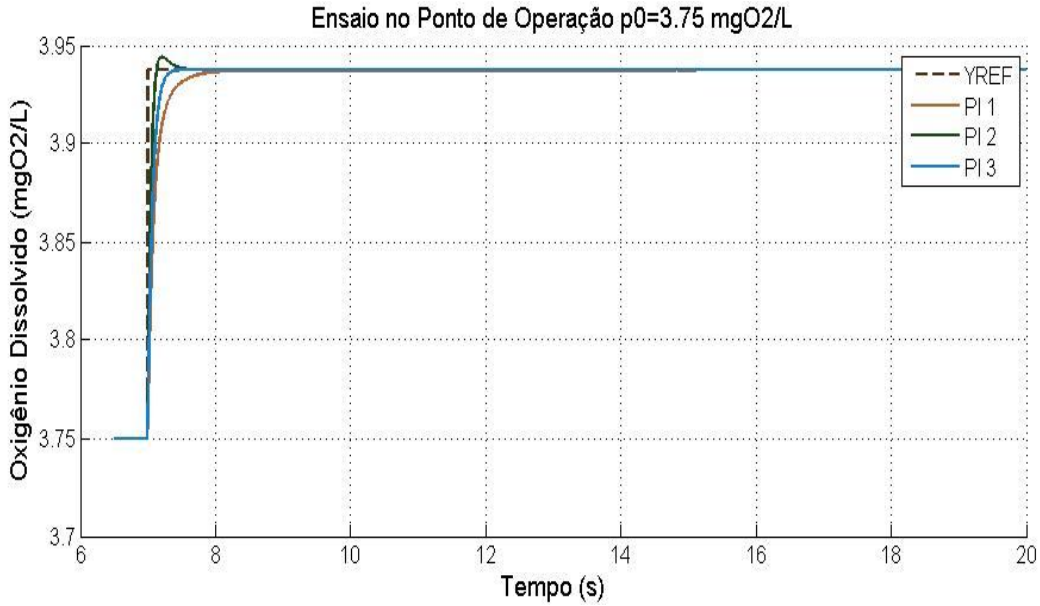

Figura 5.2 Curvas de desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 3,75 mgO2/l aplicando um degrau de 5% de x°

Observando o quesito sobressinal, constatou-se que os três controladores obtiveram o mesmo desempenho, pois o valor para os três controladores foi 0,0000%.

Por fim, para o quesito erro em regime, os controladores PI 2 e PI 3 o valor foi nulo. Apesar do controlador PI 1 ter apresentado um valor de erro em regime de 0,0018, por ser ínfimo, pode-se afirmar que os três controladores obtiveram desempenho equivalente.

O desempenho do controlador PI 2 em relação aos demais foi superior aos demais no quesitos tempo de subida e tempo de acomodação devido ter sido projetado na vizinhança do pronto de operação do ensaio.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.3 e as curvas de desempenho na Figura 5.3.

Tabela 5.3 Desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 5,50 aplicando um degrau de 5% de x°

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI 1	4,7150	0,0000%	8,3000	0,0018
PI 2	1,1200	0,000%	7,3650	0,0000
PI 3	2,7510	0,0000%	7,7600	0,0000

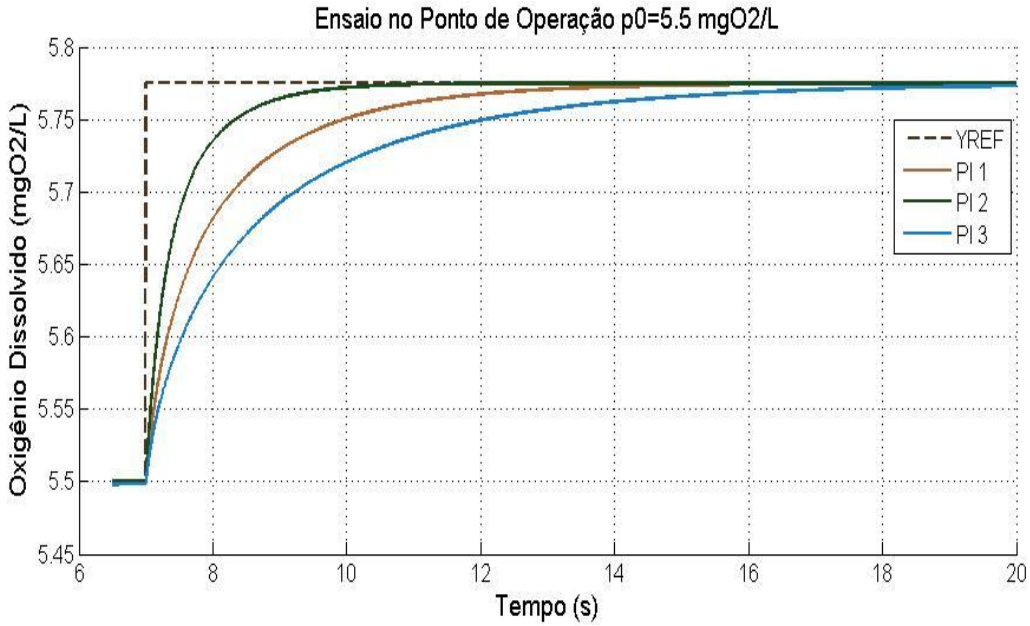

Figura 5.3 Curvas de desempenho dos controladores para o ponto de operação x° = 5,5 aplicando um degrau de 5% de x°

5.2 ENSAIOS DO CONTROLADOR FUZZY TAKAGI-SUGENO

Devido a nitrificação ocorrer em um intervalo definido entre 2,0 mgO_2/l e 5,5 mgO_2/l[28] o controlador fuzzy TS projetado no Capítulo 4, em tese, terá melhor desempenho operando nesta faixa de operação ao invés de um único controlador fixo, Exceto quando este controlador operar na vizinha do ponto de operação pelo qual foi projetado. Para analisar o desempenho do controlador fuzzy TS (*CTS*), foram concebidos quatro cenários para ensaio comparando o desempenho CTS em relação a um dos três controladores fixos projetados acima (PI). Em cada ensaio, escolheu-se um ponto de operação diferente daquele para o qual o controlador fixo foi projetado e aplicou-se um degrau (5% de x^0) (*YREF*) utilizando os mesmos quesitos de análise do sub-tópico anterior.

A Tabela 5.4 apresenta para todos os cenários os parâmetros escolhidos para os ensaios.

Tabela 5.4 Cenários e seus parâmetros para ensaios

CENÁRIOS	PONTO DE OPERAÇÃO DO PROJETO DO CONTROLADOR PI (mgO_2/l)	PONTO DE OPERAÇÃO DE ANÁLISE ($mgO_2/$)
1	2,00	5,50
2	5,50	2,00
3	3,75	2,00
4	3,75	5,50

[28] Vide Capítulo 2, subitem 2.3.1

5.2.1 Análise do Ensaio do Cenário 1

O primeiro quesito a ser analisado no ensaio do cenário 1, é o tempo de subida. O controlador CTS foi mais rápido, pois seu tempo de subida aproximadamente quatro vezes mais rápido em relação controlador fixo.

Analisando o tempo de acomodação, o controlador CTS também obteve desempenho um pouco superior. A variação em relação ao controlador fixo foi de 11,26% menor.

Ambos os controladores, para o quesito sobressinal, apresentaram valores nulos.

Por fim, constatou-se que o erro em regime foi nulo para o controlador CTS e de 0,0018 para o controlador fixo. Por ser uma diferença pequena, pode-se afirmar que o desempenho de ambos foi idêntico

O desempenho do controlador fuzzy TS em relação fixo foi superior nos quesitos tempo de subida e tempo de acomodação, pois quando operou na vizinhança do ponto de operação e $x° = 5{,}50$ mgO_2/l, este controlador interpolou os ganhos proporcional e integrativo do controlador fixo que foi projetado neste mesmo ponto.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.5 e as curvas de desempenho na Figura 5.4.

Tabela 5.5 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 1

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI	4,7150	0,0000	8,3000	0,0018
CTS	1,220	0,0000	7,3650	0,0000

5.2.2 Análise do Ensaio do Cenário 2

Analisando o tempo de subida de ambos os controladores neste cenário, o controlador CTS foi um pouco mais rápido que o controlador fixo. A diferença de tempo entre ambos foi de apenas 0,0250 s.

Analisando o quesito tempo de acomodação, constatou-se que o controlador CTS também obteve desempenho um pouco superior. A diferença de tempo em relação ao controlador fixo foi de 0,1146 s.

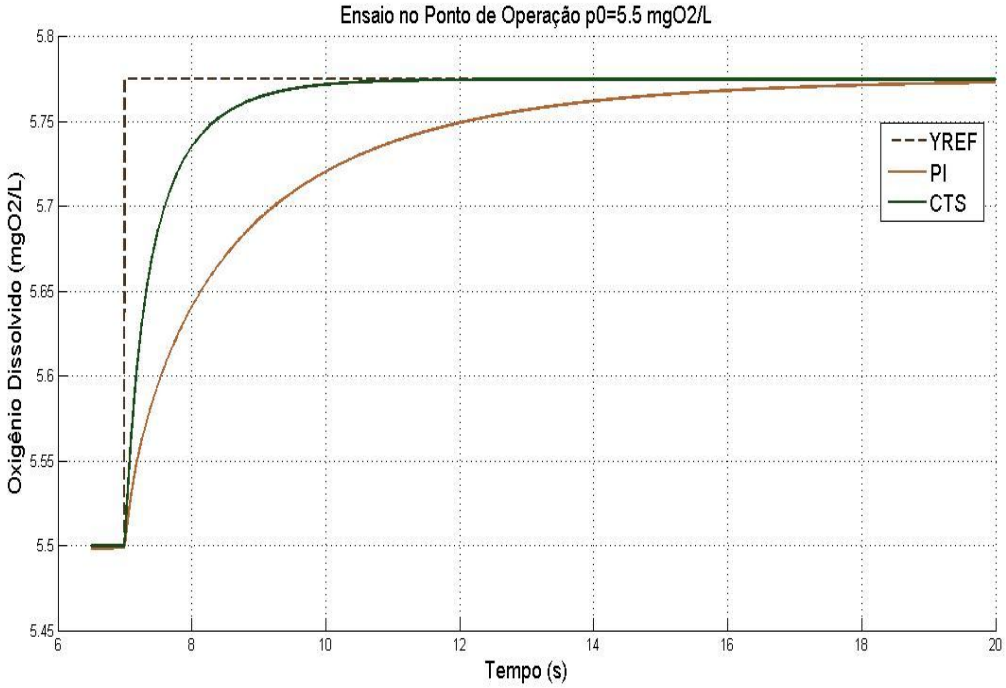

Figura 5.4 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 1

O controlador CTS obteve valor nulo para o quesito sobressinal. Entretanto o controlador fixo apresentou um pequeno valor, 0,0020% e por ser um valor ínfimo, pode-se afirmar que ambos os controladores apresentaram resultados idênticos.

Por fim, para o quesito erro em regime, o valor de ambos os controladores foi nulo, logo conclui-se que eles obtiveram o mesmo desempenho.

O desempenho do controlador fuzzy TS em relação fixo foi superior nos quesitos tempo de subida e tempo de acomodação, pois quando operou na vizinhança do ponto de operação de $x°$ = 2,00 mgO_2/l, este controlador interpolou os ganhos proporcional e integrativo do controlador fixo que foi projetado neste mesmo ponto.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.6 e as curvas de desempenho na Figura 5.5.

Tabela 5.6 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 2

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI	0,9000	0,0020	7,3000	0,0000
CTS	0,6500	0,0000	7,1854	0,0000

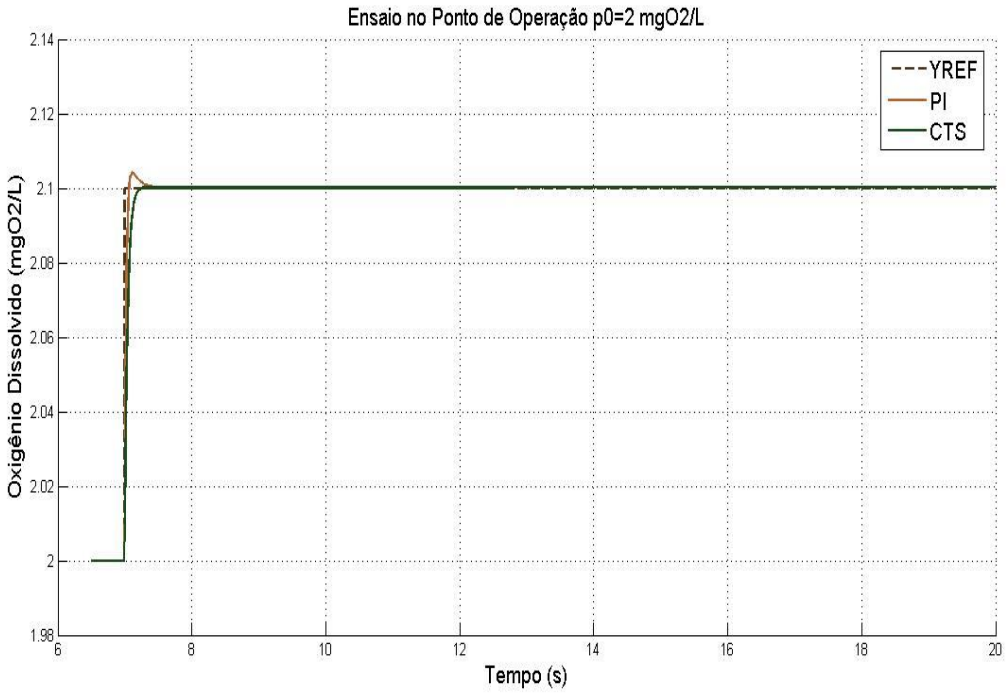

Figura 5.5 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 2

5.2.3 Análise do Ensaio do Cenário 3

Analisando os resultados do ensaio do cenário 3, constatou-se que ambos os controladores obtiveram os mesmos resultados para os quesitos, sobressinal (0,0000%) e erro em regime (0,0000).

Observando os resultados para o quesito tempo de subida, constatou-se que a diferença entre o controlador fixo e o CTS foi de apenas 0,0050. Por ser um valor muito pequeno, pode-se afirmar que ambos os controladores obtiveram um desempenho equivalente neste quesito.

Por fim, para o quesito tempo de acomodação, o controlador CTS foi um pouco superior em relação ao controlador fixo. A diferença de tempo entre ambos foi de 0,1646 s.

O desempenho do controlador fuzzy TS em relação fixo foi superior no quesito tempo de acomodação, pois quando operou na vizinhança do ponto de operação e $x°$ = 2,00 mgO_2/l, este controlador interpolou os ganhos proporcional e integrativo do controlador fixo que foi projetado neste mesmo ponto. Entretanto, mesmo atuando em um ponto de operação diferente daquele pelo qual foi projetado, o controlador fixo desempenhou uma ação de controle bastante satisfatória.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.7 e as curvas de desempenho na Figura 5.6.

Tabela 5.7 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 3

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI	0,0700	0,0000	7,3500	0,0000
CTS	0,0650	0,0000	7,1850	0,0000

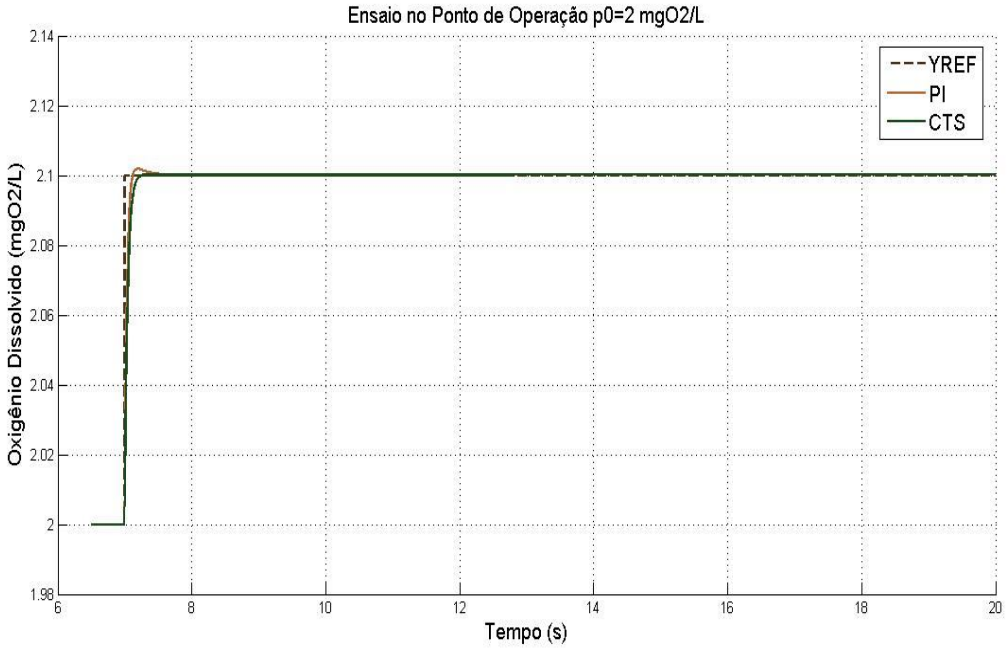

Figura 5.6 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 3

5.2.4 Análise do Ensaio do Cenário 4

Analisando inicialmente o tempo de subida de ambos os controladores para cenário 4, constatou-se que o controlador CTS foi mais rápido em relação ao controlador fixo. O tempo de subida do controlador fixo foi aproximadamente duas vezes maior que o tempo do CTS.

O controlador CTS também obteve desempenho um pouco superior no quesito tempo de acomodação. A variação entre ambos foi de apenas 0,3950 s.

Constatou-se analisando este cenário, que para ambos os controladores obtiveram o mesmo desempenho para os quesitos sobressinal (0,0000%) e erro em regime (0,0000).

O desempenho do controlador fuzzy TS em relação fixo foi superior nos quesitos tempo de subida e tempo de acomodação, pois quando operou na vizinhança do ponto de operação e $x°$ = 5,50 mgO_2/l, este controlador interpolou os ganhos proporcional e integrativo do controlador fixo que foi projetado neste mesmo ponto.

Os valores da análise do ensaio estão apresentados na Tabela 5.8 e as curvas de desempenho na Figura 5.7.

Tabela 5.8 Desempenho dos controladores para o ensaio do cenário 4

CONTROLADOR	TEMPO DE SUBIDA (s)	SOBRESSINAL (%)	TEMPO DE ACOMODAÇÃO (s)	ERRO EM REGIME (mgO_2/l)
PI	2,7510	0,0000	7,7600	0,0000
CTS	1,2200	0,0000	7,3650	0,0000

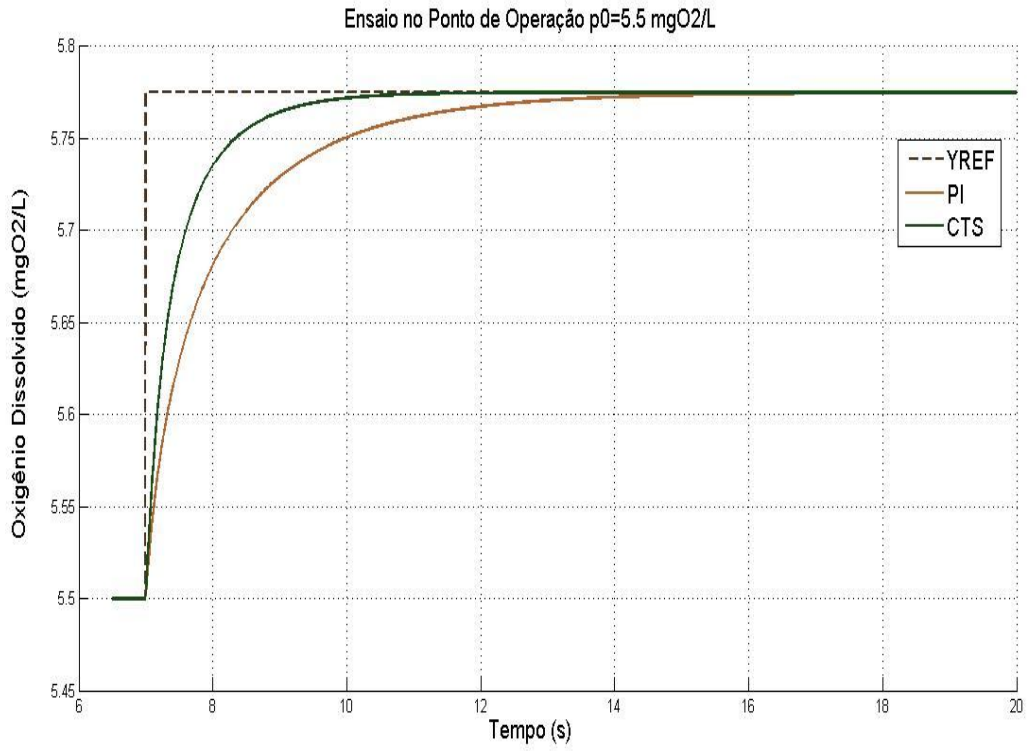

Figura 5.7 Curva de desempenho dos controladores no ensaio do cenário 4

6. CONSIDERAÇÃOES FINAIS

O trabalho apresentado objetivou projetar uma estratégia de controle para uma planta de tratamento de esgoto por lodos ativados com foco na etapa aeróbia do processo. Por mais que o controlador tenha sido testado apenas em simulações computacionais, obteve-se êxito nesta fase, haja vista a complexidade do processo. O controlador fuzzy Takagi-Sugeno, projetado neste trabalho, foi mais apropriado para a problemática devido a faixa de operação do processo de tratamento de efluentes.

Em projetos tradicionais de uma ETE de lodos ativados, calcula-se uma estimativa de quanto de oxigênio dissolvido será necessário injetar no ambiente. Ao entrar em operação, o mecanismo de aeração da planta será ajustado de acordo com a concentração inicial de OD do efluente não tratado. É praxe que este ajuste seja feito manualmente.

Entretanto, não basta apenas oxigenar o licor misto para tratar o efluente. Conforme explicara Lindberg (1999), a concentração de OD deve ser baixa o suficiente para a cinética do processo para realizar a remoção de matéria carbonácea e a nitrificação. O autor também ressalta que elevadas concentrações de OD poderão comprometer a etapa anóxica do processo e nunca se deve esquecer de que, em ambos os casos, poderá ocorrer um dispêndio elevado de energia elétrica.

6.1 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O trabalho de Lindberg, (1997) foi muito útil ao nortear esta pesquisa[29], devido ter projetado um controlador PI para o mecanismo de aeração a partir do modelo de balanço de massa de oxigênio dissolvido apresentado na Equação 2.3. O controle da concentração de OD é essencial para que ocorra a nitrificação e, por conseguinte, o sucesso do tratamento do efluente como um todo.

O trabalho de Lara, (2005) seguiu a mesma estratégia do trabalho de Lindberg, (1997), também projetando um controlador para o mecanismo de aeração. O diferencial do trabalho desse autor é a identificação de modelos para controle preditivo tanto na etapa aeróbia por conta da nitrificação, quanto para a etapa da desnitrificação.

[29] Mediante as revisões de literaturas realizadas durante a pesquisa, presume-se que este foi o primeiro trabalho a projetar uma estratégia de controle para uma ETE de lodos ativados.

Este trabalho focou também no controle da concentração de OD para que a nitrificação, etapa mais importante do processo, ocorra com sucesso. Entretanto, durante a pesquisa, identificou-se faixa de operação da etapa aeróbia do processo responsável pela eliminação da matéria carbonácea e da nitrificação. A concentração mínima de OD (na faixa de operação) é responsável pela formação de (NO_2^-) e a concentração alta, pela formação de (NO_3^-) (Lara, 2005). Desta forma, surge a necessidade de projetar mais de um controlador fixo no intervalo da faixa de operação do processo.

Assim sendo, pode-se ressaltar como contribuição o projeto de um controlador fuzzy Takagi-Sugeno interpolando ganhos proporcionais e integrativos dos controladores fixos projetados para pontos de operações propostos. Portanto, conforme concentração de OD do efluente não tratado varie na entrada da planta, haverá uma ação de controle mais adequada na faixa de operação da etapa aeróbia.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou resultados através de simulações computadorizadas, mas poderá servir de base para trabalhos futuros com por exemplo o projeto de um controlador fuzzy TS, interpolando ganhos proporcionais e integrativos de controladores PI em uma planta de escala reduzida, para fins didáticos, ou até mesmo em planta de escala real.

Em futuros trabalhos, pode-se realizar a sintonia do controlador fuzzy TS aperfeiçoando as funções de pertinências e/ou base de regras, utilizando o princípio de algoritmos genéticos (Nagai e Arruda, 2001).

Ainda referenciando ao trabalho de Lindberg, (1997), após projetar o controlador PI para o mecanismo de aeração da ETE de lodos ativados, o autor projetou um controlador para o valor de referência do OD, em cascata ao primeiro controlador projetado. Este segundo controlador utiliza como valor de entrada a concentração de NH_4^+, e a partir do erro obtido entre o valor medido no TA de NH_4^+ e um valor de referência do mesmo, obtém-se um valor de referência adequado de OD para o segundo controlador. Esta estratégia de controle também pode servir de sugestões de trabalhos futuros em que este controlador de valor de referência de OD seja também um controlador fuzzy TS.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALKU, Sazive. BERBER. Ridvan. Dynamics of an activated sludge process with nitrification and denitrification: Start-up simulation and optimization using evolutionary algorithm. **Computers and Chemical Engineering**. Estados Unidos, v.30, p.490-499, 2006.

BRASIL. Resolução n° 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n° 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 16 mai. 2011. Disponível em: < http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?jornal=1&pagina=89&data=16/05/2011>. Acessado em: 20 jan. 2011.

_____. Portaria n° 518 de 25 de março de 2004 Ministério da Saúde. Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 36 mar. 2004. Disponível em: < http://www.in.gov.br/visualiza/index.jsp?data=26/03/2004&jornal=1&pagina=266&totalArquivos=332>. Acessado em: 20 jan. 2011.

CENSO-2012, Censo Demográfico ano 2012. Disponível em: < ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/tabelas_pdf/tab1.pdf>. Acessado em: 01 nov. 2012.

CHERNICHARO, C. A. L. (Org). **Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores Anaeróbios: Coletânea de Trabalhos Técnicos**. Belo Horizonte: FINEP, 2000. v.1.

HAANDEL, A., MARAIS, G. **O Comportamento do Sistema de Lodos Ativados – Teoria e Aplicação para Projetos e Operações**. Campina Grande: Epigraf, 1999

HENZE, Mogens et al. **Activated Sluge Models ASM1, ASM2 and ASM3**. Londres: IWA Publishing, 2000.

HUO, Jinsheng. **Application of Statistical Methods and Process Models for Desing and Analysis of Activated Sludge Wastewater**. Knoxville, Tennessee: 2005. Originalmente apresentada como tese de PhD. University of Tennessee.

IDB-2011, Indicadores e Dados Básicos do Brasil edição de 2011 – cobertura de esgotamento sanitário. Disponível em: <http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/idb2011/f18.htm>. Acessado em: 01 nov. 2012.

KHALIL, H.K. **Nonlinear Systems**. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

LANDAU, I. D. **System Identification and System Design using P.I.M.+ Software**. New Jersey: Prentice Hall, 1990.

LARA, José Maria Vargas. **Identificação de Modelos para Controle Preditivo: Aplicação a uma Planta de Lodos Ativados.** Campinas, SP: 2005. Originalmente apresentada como tese de doutorado. UNICAMP.

LOURO, Marianna de Querioz. **Respostas Relacionadas entre Nitrato, Ortofosfato e Biomassa Fitoplanctônica da Lagoa de Cima (RJ): uma Abordagem Experimental**. Campo dos Goytacazes, RJ: 2011. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado. UENF.

MACHADO, I. A. et al. Análise da nitrificação biológica em processo de lodos ativados com aeração prolongada realizada visando o reuso de água para "make up" em torres de resfriamento. In: 23° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, Campo Grande. Anais do 23° CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. ABES 2005. p. 1-8.

MENDONÇA, Luciana Coelho. **Microbiologia e Cinética de Sistema de Lodos Ativados com Pós-Tratamento de Efluente de Reator Anaeróbio de Leito Extendido**. São Carlos, SP: 2002.Originalmente apresentada como tese de doutorado. USP.

MILLENIUM, Millenium Development Goals – goal 7: ensure environmetal sustantability . Disponível em: < ftp://ftp.ibge.gov.br/Censos/Censo_Demografico_2010/Resultados_do_Universo/tabelas_pdf/tab1.pdf>. Acessado em: 01 nov. 2012.

NAGAI, E. Y. S., ARRUDA, L. V. R. Geração Automática da Base de Regras de Modelos Fuzzy Utilizando Algoritmos Genéticos. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 1. 2001, Canela. Anais do V Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Canela: SBA 2001. p. 1-6.

NOZAKI, Victor Toyoji de. **Análise do Setor de Saneamento Básico no Brasil**. Ribeirão Preto, SP: 2007. Originalmente apresentada como dissertação de mestrado. USP.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Rio de Janeiro: Prentice Hall,1992

OLIVEIRA FILHO, J. H. S. et al Controlador Fuzzy Takagi-Sugeno Aplicado a uma Planta de Tratamento de Esgoto por Lodos Ativados. In: X SIMPÓSIO BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE, 10. 2011, São João del-Rei. Anais do X Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. São João del-Rei: SBA 2011. p. 1137-1142.

OLIVEIRA FILHO, J. H. S. **Ensaio em uma bancada didática de tratamento de esgoto por lodos ativados**. 2010. 1 álbum (43 fot.): color.; 10 cm x 15 cm. Registros realizados no Laboratório de Controle de Processos do CEFET/PA durante um ensaio do tratamento de efluentes pelo método de lodos ativados por batelada.

PASSINO, K. M., YURKOVICH, S. **Fuzzy Control**. Menlo Park: Addison-Wesley, 1998.

PAULINO, Rosangela C.; CASTRO, Edilene A. and THOMAZ-SOCCOL, Vanete. Tratamento anaeróbio de esgoto e sua eficiência na redução da viabilidade de ovos de helmintos**. Revista da Sociedade Brasileira de Medicina Tropical**. Uberaba, v. 34, n° 5, 2001.

SPERLING, M. **Princípio do Tratamento Biológico de Água Residuárias – Introdução à Qualidade da Água e ao tratamento de esgoto**. Belo Horizonte: SEGRAC,1995. 1 v.

_____. **Princípio do Tratamento Biológico de Água Residuárias – Lodos Ativados**. Belo Horizonte: SEGRAC,1997. 4 v.

STATHAKI, A. KING, R. E. An intelligent decision support system for wasterwater treatment plant management. **International Journal of Engineering Simulation**. Reino Unido, v. 8, n° 1, 2007.

WANG, Xi-Li. **A Course in Fuzzy System and Control**. Nova Iorque: Prentice-Hall, 1996.

ANEXO A

MODELO ASM #1

Componente→		i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	Fator do Processo
J	Processo ↓		X I	XS	$X_{B,H}$	$X_{B,A}$	X_D	S_I	S_S	S_O	S_{N0}	S_{NH}	S_{NS}	X_{NS}	S_{ALK}	
1	Crescimento aeróbico de heterótrofos				1				$-1/Y_H$	$\frac{1-Y_H}{Y_H}$		$-i_{N/XB}$			$\frac{-i_{N/XB}}{14}$	$\hat{\mu}_H(\frac{S_S}{K_S+S_S})\cdot(\frac{s_O}{K_{O.H}+s_O})\cdot X_{B.H}$
2	Crescimento anóxico de heterótrofos					1			$-1/Y_H$		$-\frac{1-Y_H}{2.86.Y_H}$	$-i_{N/XB}$			$\frac{1-Y_H}{14.(2{,}86.Y_H)}-i_{N/XB}/14$	$\hat{\mu}_H(\frac{S_S}{K_S+S_S})\cdot(\frac{K_{OH}}{K_{OH}+s_O})(\frac{s_{NO}}{K_{NO}+s_O})\eta X_{BH}$
3	Crescimento aeróbico de autrótofos									$\frac{4.57-Y_H}{Y_H}$	$\frac{1}{Y_A}$	$-i_{N/XB}$				$\hat{\mu}_H(\frac{S_S}{K_S+S_S})\cdot(\frac{K_{O.H}}{K_{O.H}+s_O})\cdot X_{B.A}$
4	Morte e quebra de heterótrofos			1-f'$_D$	-1		f'$_D$							$i_{NXB}-f_D x i_{NXB}$		$b_{1,H}.X_{1,H}$
5	Morte e quebra de autótrofos			1-f'$_D$		-1	f'$_D$							$i_{NXB}-f_D x i_{NXB}$		$b_{L,A}.X_{B,A}$
6	Amonificação do nitrogênio orgânico solúvel														1/14	$K_a S_{NS} X_{B,H}$
7	Hidrólise de partículas orgânicas			-1					1							$k_h.(\frac{X/X_{B,H}}{K_X+X_S/X_{B,H}})][(\frac{S_O}{K_{O,H}+S_O})\eta_h(\frac{K_{O,H}}{K_{O,H}+S_O})]X_{B,H}$
8	Hidrólise de partículas de nitrogênio orgânico												1	-1		$r_7(X_{NS}/X_S)$

Fonte: Huo (2005)

ANEXO B

POPULAÇÃO SERVIDA POR ESGOTO POR REGIÃO

REGIÃO	POPULAÇÃO SERVIDA POR ESGOTO	PERCENTUAL DA POPULAÇÃO SERVIDA POR ESGOTO
Região Norte	4.907.626	4%
Região Nordeste	22.856.765	19%
Região Sudeste	68.449.603	56%
Região Sul	19.190.368	16%
Região Centro-Oeste	7.082.228	6%

Fonte: IDB...(2012)

ANEXO C

MODELOS DE APROXIMAÇÃO DO K_La

MODELO	EQUAÇÃO	REFERÊNCIAS
Degrau	$K_La = [0,k_1]$	(Catunda et al, 1996, apud Sotomayor, 2001)
Linear A	$K_La = k_1.u$	(Cook e Jowitt, 1985, apud Sotomayor, 2001), (Ko, 1082 apud Sotomayor, 2001), (Marsili-Libellis, 1989, apud Sotomayor, 2001)
Linear B	$K_La = k_1.u + k_2$	(Holmberg, 1981, apud Sotomayor, 2001)
Raiz Quadrada	$K_La = k_1.\sqrt{u}$	(Holmberg et al, 1989, apud Lindberg, 1997)
Arco Tangente	$K_La = k_1.\tan^{-1}.(k_2.u)$	(Nakajima et al 1996, apud, Sotomayor, 2001), (Lindberg e Carlsson, 1996, apud Sotomayor, 2001), (Lindberg, 1997)
Exponencial	$K_La = k_1.[1 - \exp(-k_2.u)]$	(Nakajima *et al* 1996) apud (Sotomayor, 2001), (Lindberg e Carlson, 1996 apud Sotomayor, 2001), (Lindberg, 1997)
Polinomial	$K_La = k_1.u + k_2.\sqrt{u} + k_3$	(Lindberg e Carlson, 1996 apud Sotomayor, 2001), (Lukasse et al, 1996, apud Sotomayor, 2001)
Linear Piecewise	$K_La = (k_1 + k_2.t).u$	(Marsili-Libelli e Vaggi, 1997, apud Sotomayor, 2001), (Marsili-Libelli, 1990, apud Sotomayor, 2001), (Lindberg e Carlson, 1993 apud Sotomayor, 2001)
Spline Cúbico	$K_La = f(u)$	(Lindberg, 1997), (Lindberg e Carlson 1993, apud Sotomayor, 2001)