



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

SISTEMA ESPECIALISTA DIFUSO PARA CONTROLE DE
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PELO
PROCESSO DE LODOS ATIVADOS

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA

(BU)



UFSC-BU

FLÁVIO RUBENS LAPOLLI

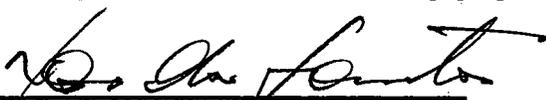
FLORIANÓPOLIS
FEVEREIRO - 1993

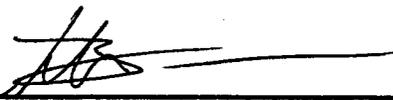
**SISTEMA ESPECIALISTA DIFUSO PARA CONTROLE DE
ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTOS PELO
PROCESSO DE LODOS ATIVADOS**

FLÁVIO RUBENS LAPOLLI

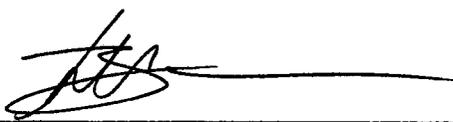
**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA"**

**ESPECIALIDADE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**


Prof. Neri dos Santos, Dr. Ing.
Coordenador do Curso


Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D
Orientador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Ricardo Miranda Barcia, Ph.D
Presidente


Prof.ª Rejane H. R. Costa, Dra.


Fernando A. O. Gauthier, M. Eng.
Co-orientador

**À Édís,
à Juliana e à Mariana**

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Ricardo Miranda Barcia, pela orientação e amizade.
- Ao Fernando A. O. Gauthier, pela co-orientação, que com suas sugestões muito colaborou no desenvolvimento deste trabalho.
- À professora Rejane H. R. Costa, pela participação e sugestões prestadas para o desenvolvimento deste trabalho.
- Aos professores Rogério C. Bastos, Lia C. Bastos e Alceu R. Alves, pelas sugestões e colaboração no desenvolvimento desta dissertação.
- Aos técnicos da CASAN e da CELESC, pelas informações, o que possibilitou a aplicação prática do modelo.
- Ao bolsista Rodrigo Becke Cabral pela colaboração prestada na implementação computacional do modelo.
- À Édis pelo incentivo, colaboração e compreensão.
- A todos que, direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema especialista difuso para controle de estações de tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados.

Os responsáveis pelo controle operacional dessas estações, encontram sérias dificuldades. Em vista disso, torna-se necessário a pesquisa e o desenvolvimento de novos métodos, com o intuito de descrever o mais corretamente possível a situação da operação.

Inicialmente, é feito um estudo das técnicas de Inteligência Artificial, da Teoria dos Conjuntos Difusos e do Tratamento de Esgotos, especificamente, pelo processo de lodos ativados.

A seguir, é construído um modelo baseado em lógica difusa, no qual se determinam as relações difusas entre as variáveis de estado e de controle. Essas relações são implementadas numa base de conhecimento.

Finalmente, é feita uma aplicação prática do modelo e sua implementação computacional, sendo verificada sua operacionalidade e avaliados os resultados obtidos.

ABSTRACT

The purpose of this work is to develop a fuzzy expert system for sewage treatment plants operational control, specially for an activated sludge system

In this activity operators often have difficulties in its operational control.

New techniques for better solve this problem have been proposed.

Initially, artificial intelligence, techniques, fuzzy sets theory and sewage treatment are reviewed.

A fuzzy logic based model is constructed in which fuzzy relations between state and control variables are determined. This relations are implemented in a knowledge base.

Finally, an application and computational implementation of the model and its results are evaluated.

SUMÁRIO

	pág.
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Origem do Trabalho	1
1.2 Objetivos do Trabalho	1
1.3 Importância do Trabalho	2
1.4 Estrutura do Trabalho	2
1.5 Limitações	3
2. TRATAMENTO DE ESGOTOS - PROCESSO DE LODOS ATIVADOS	5
2.1 Introdução	5
2.2 Considerações Iniciais	5
2.3 Caracterização dos Esgotos	7
2.4 Tratamento de Esgotos	8
2.5 O Processo de Lodos ativados	9
2.6 Controle Operacional do Processo de Lodos Ativados	15
2.6.1 Controle pelos Sólidos em Suspensão no Tanque de Aeração	15
2.6.2 Idade do Lodo	16
2.6.3 Carga da Estação	17
2.6.4 Sedimentabilidade do Lodo	18
2.6.5 Recirculação do Lodo	19
2.7 Pontos Relevantes no Controle Operacional	21
2.8 Conclusão	22
3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL	24
3.1 Introdução	24
3.2 Conceitos Fundamentais	24

3.3	Sistemas Especialistas	27
3.4	Organização de um Sistema Especialista	28
3.5	Aquisição e Representação do Conhecimento	30
3.6	Conhecimento impreciso em Sistemas Especialistas	33
3.7	Sistemas Especialistas aplicados à Engenharia Ambiental	35
3.8	Conclusão	38
4.	TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS	39
4.1	Introdução	39
4.2	Conceitos	39
4.3	Definições Básicas	41
4.4	Estimação de Funções de Pertinência	44
4.4.1	Método baseado em Histograma	45
4.4.2	Método baseado no Consenso de Especialistas	46
4.5	Raciocínio Difuso	46
4.6	Teoria dos Conjuntos Difusos aplicada no Controle Operacional	47
4.7	Conclusão	48
5.	MODELO PROPOSTO	49
5.1	Introdução	49
5.2	Descrição do Problema	49
5.3	Organização de um Sistema Difuso para Lodos Ativados	50
5.3.1	Base de Conhecimento	51
5.3.2	Mecanismos de "Fuzzificação"	54
5.3.3	Mecanismo de Inferência	55
5.3.4	Processo de "Desfuzzificação"	58
5.4	Conclusão	59
6.	APLICAÇÃO PRÁTICA	60

6.1	Introdução	60
6.2	Descrição da Estação de Tratamento de Esgotos da CELESC	60
6.3	Parametrização do Sistema	62
6.4	Base de Conhecimento	65
6.5	Implementação Computacional	66
6.6	Resultados obtidos e Validação do Modelo	68
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	70
7.1	Conclusões	70
7.2	Recomendações para Futuras Pesquisas	71
8.	BIBLIOGRAFIA	72

LISTA DE FIGURAS

	pág.	
FIG 2.5.1	Processo Típico de Lodos Ativados	10
FIG 2.5.2	Processo Convencionai de Lodos Ativados	12
FIG 2.5.3	Aeração Escalonada	12
FIG 2.5.4	Aeração Derivada	13
FIG 2.5.5	Aeração Prolongada	14
FIG 2.5.6	Mistura Completa	14
FIG 3.2.1	Sistemas Especialistas são Sistemas baseados em Conhecimento	26
FIG 3.4.1	Estrutura de um Sistema Especialista	29
FIG 4.2.1	Grau de Pertinência dos Números Reais próximos a 10	41
FIG 5.3.1	Configuração Básica do Modelo Proposto	51
FIG 6.3.1	Função de Pertinência de IVL	63
FIG 6.3.2	Função de Pertinência de θ_c	63
FIG 6.3.3	Função de Pertinência de F/M	64
FIG 6.3.4	Função de Pertinência de ΔQ_W	64
FIG 6.3.5	Função de Pertinência de ΔQ_R	65
FIG 6.5.1	Estrutura do Sistema Computacional	67

LISTAS DE TABELAS

		pág.
Tabela 6.2.1	Estimativa de Vazão Diária da CELESC	61
Tabela 6.4.1	Matriz de Relações	65
Tabela 6.6.1	Conjunto Teste de Situações Idealizado	68
Tabela 6.6.2	Matriz - Confusão para Q_R	69
Tabela 6.6.3	Matriz - Confusão para Q_W	69

1. INTRODUÇÃO

1.1 Origem do Trabalho

O sistema de lodos ativados tem sido muito utilizado atualmente nas estações de tratamento de esgotos. O seu controle operacional é considerado difícil, devido à complexidade dos componentes dos esgotos (compostos orgânicos, matéria inorgânica e microrganismos) e também devido à variação do esgoto afluente (quantidade e componentes). Por exemplo, os esgotos industriais podem aumentar a concentração de um determinado componente dentro de um curto período de tempo, e uma forte chuva pode reduzir a concentração e aumentar a quantidade do afluente. O controle operacional também é considerado difícil, devido ao ajustamento de erros no processo.

Em vista disso, toma-se necessário a pesquisa e o desenvolvimento de novos métodos, utilizando técnicas mais avançadas, no intuito de descrever o mais corretamente possível a situação da operação, permitindo a sua utilização pelos operadores com uma relativa facilidade.

Com a ideia básica de propor uma melhoria operacional dos sistemas de lodos ativados, de forma a aumentar sua eficiência, teve origem este trabalho.

1.2 Objetivos do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um sistema especialista difuso para o controle de estações de tratamento de esgotos pelo processo de lodos ativados.

Concomitantemente, apresenta como objetivos específicos:

- construir um modelo;
- determinar relações e estabelecer bases de conhecimento;
- implementar uma solução computacional;
- fornecer subsídios ao tomador de decisões, responsável pela operação do sistema.

1.3 Importância do Trabalho

Atualmente, as estações de tratamento de esgoto, através do processo de lodos ativados, têm encontrado grandes dificuldades no seu controle operacional. Muitas vezes, a pouca experiência do operador, aliada à falta de equipamentos e laboratórios adequados para a execução de uma rotina de controle, tem resultado em ajustamentos indevidos, aumentando assim os custos operacionais do sistema.

A maioria das estações de tratamento de esgotos adota modelos para obter os ajustamentos necessários no processo de controle. Entretanto, pelas razões acima apresentadas, é difícil afirmar se estas formulações realmente refletem as relações corretas e efetivas entre as variáveis e parâmetros de controle.

Desse modo, ressalta-se a importância deste trabalho, no fato de o mesmo propor uma abordagem para o controle operacional de um sistema de lodos ativados, descrevendo adequadamente o seu estado e, conseqüentemente, possibilitando o aumento de seu desempenho.

1.4 Estrutura do Trabalho

O trabalho foi dividido em oito capítulos.

No presente capítulo, descrevem-se os objetivos e a motivação da pesquisa. Seu caráter é introdutório e nele também é mostrada a sua importância.

No segundo capítulo, apresenta-se uma abordagem teórica sobre tratamento de esgotos, especificamente o processo de lodos ativados convencional, bem como suas variações.

Técnicas de inteligência artificial, especificamente sistemas especialistas, através de uma fundamentação teórica, são apresentadas no terceiro capítulo.

No quarto capítulo, conceitos fundamentais da teoria dos conjuntos difusos são apresentados, conceitos estes necessários para modelagem do problema em discussão.

O modelo proposto é apresentado no quinto capítulo, onde inicialmente descreve-se o problema para, posteriormente, formular-se um modelo e, finalmente, desenvolvê-lo.

No sexto capítulo, apresenta-se uma aplicação prática do modelo proposto e sua implementação computacional, sendo verificada sua operacionalidade e avaliados os resultados obtidos.

O capítulo seguinte, o sétimo, apresenta as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

Finalmente, no último capítulo, é apresentada a bibliografia utilizada, bem como a citada neste trabalho.

1.5 Limitações do Trabalho

O trabalho desenvolvido apresenta um modelo de controle operacional para um dos diferentes tipos de estação de tratamento de esgotos através do processo

de todos ativados existentes. A aplicação do modelo proposto a outros tipos é, porém, perfeitamente viável. Nesses casos, deve-se considerar as variáveis de estado relevantes e proceder as alterações necessárias na base de dados do programa computacional.

O modelo desenvolvido não incorpora um processo de aprendizado. Assim, o processo de ajuste da base de conhecimento deve ser realizado iterativamente.

Finalmente, um acompanhamento "on-line" do sistema na estação a ser controlada não foi possível, dado que não se dispunha de condições de hardware necessárias para tal. Além disso, o acompanhamento "on-line" demandaria um longo período de tempo, pois para cada alteração das variáveis de controle, o tempo de resposta do sistema real varia entre 48 a 60 horas, ou seja, para um número de respostas em torno de 100 alterações - 6 a 8 meses.

2. TRATAMENTO DE ESGOTOS - PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta uma abordagem da teoria do tratamento de esgotos sanitários, mais especificamente do processo de lodos ativados e suas modificações.

Também é feita uma revisão do processo de controle operacional nas estações de tratamento, através do processo de lodos ativados.

Por questões de uniformidade, adotou-se a terminologia da NB 570/90 - ABNT, que trata da Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários.

2.2 Considerações Iniciais

O desenvolvimento industrial e o crescimento das comunidades urbanas criaram o problema de altos volumes de despejos líquidos para serem dispostos dentro de áreas confinadas, sem destruir significativamente o ambiente.

Desde o começo deste século, quando o campo da Engenharia Ambiental estava iniciando nos Estados Unidos, tem havido uma constante evolução nos métodos utilizados para tratamento dos esgotos.

Várias técnicas foram desenvolvidas, em resposta à preocupação com a saúde pública e com as condições adversas causadas pela descarga dos esgotos no meio ambiente.

De maneira geral, os tratamentos foram realizados com os seguintes propósitos:

- remoção de materiais flutuantes;
- tratamento da matéria orgânica biodegradável;
- eliminação de organismos patogênicos.

Desde a década de sessenta, entretanto, maiores esforços têm sido realizados para tornar o tratamento dos esgotos mais efetivo e difundido. Colaboraram com estes esforços:

- a compreensão dos efeitos ambientais causados pela descarga dos esgotos não tratados ou tratados parcialmente;
- o conhecimento dos efeitos adversos de longo termo causados pelas descargas de alguns constituintes específicos encontrados nos esgotos;
- a conscientização da população nas questões referentes à proteção ambiental;
- o aumento do conhecimento científico, especialmente nas áreas de química, bioquímica e microbiologia;
- a necessidade de conservar os recursos naturais;
- a expansão da área de conhecimento e da capacidade dos vários métodos utilizados para tratamento dos esgotos.

Segundo AZEVEDO NETTO (1977), o tratamento das águas de esgotos é feito com a finalidade de evitar, tanto quanto possível ou desejável, os inconvenientes da poluição.

As razões que recomendam o tratamento das águas de esgotos podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- a) Razões de Saúde Pública: para evitar a contaminação de águas receptoras e as consequências perigosas para os abastecimentos situados à jusante, e também para evitar a contaminação direta de usuários das águas receptoras (banhistas, desportistas, habitantes ribeirinhos, etc.) e indireta (verduras, leite e outros alimentos);
- b) Razões Ecológicas: para que sejam mantidas condições adequadas para o meio natural, evitando alterações prejudiciais e a degradação do meio ambiente e protegendo a fauna e a flora;

c) **Razões Econômicas:** relacionadas com o valor das terras e demais propriedades situadas à jusante, e com prejuízos para a pesca, caça, instalações e estruturas fixas e flutuantes, pecuária e indústria do leite e, ainda, para as indústrias localizadas à jusante que se abastecem com águas dos rios receptores. Nestes últimos casos, prejuízos consideráveis podem ser causados, aumentando o custo do tratamento das águas para abastecimento;

d) **Razões Estéticas e de Conforto:** para evitar mau aspecto, desprendimento de gases, mau cheiro, presença de sujeiras, etc. Os cursos de água muito poluídos causam problemas de corrosão, descoloração de pinturas, alteração de metais, irritação dos olhos, etc;

e) **Razões Legais:** relacionadas às exigências legais, para proteção ao homem, à propriedade, aos bens naturais, aos direitos das comunidades e aos proprietários marginais prejudicados pelo lançamento de despejos (poluição crescente das águas).

O tratamento dos esgotos sanitários pode incluir vários processos e deve ser realizado na medida das necessidades, de maneira a assegurar um grau de depuração compatível com as condições locais.

2.3 Caracterização dos Esgotos

Esgotos sanitários são os despejos líquidos de residências e prédios, podendo-se incluir quantidades menores de águas de chuva, de superfícies e de lençóis subterrâneos, que não são admitidas intencionalmente, bem como quantidades inexpressivas de despejos industriais (ABNT, 1975). Os esgotos provenientes de lavatórios e chuveiros são predominantemente sabão e água, contendo pequenas quantidades de materiais insolúveis; esgotos de cozinha contêm sabão, partículas de alimentos e água, enquanto que os esgotos dos vasos sanitários contêm fezes, urina e papel. Estes materiais podem ser separados de acordo com o seu tamanho e solubilidade. Partículas maiores podem flutuar, mas com tendências para sedimentar. Este grupo inclui: plásticos, papéis, pó, madeira, etc. Há também materiais em solução, os quais incluem compostos orgânicos e inorgânicos solúveis. Observa-se, ainda, a

presença de colóides, incluindo partículas muito pequenas de origem orgânica e inorgânica (BARNES e WILSON,1976).

2.4 Tratamento dos Esgotos

Uma Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários, abreviadamente E.T.E., é um conjunto de unidades de tratamento, equipamentos, órgãos auxiliares, acessórios e sistemas de utilidades, cuja finalidade é a redução das cargas poluidoras do esgoto sanitário e condicionamento da matéria residual resultante do tratamento (ABNT, 1990).

A principal finalidade do tratamento dos esgotos antes de seu lançamento nos corpos receptores é a proteção do meio ambiente (DEGREMONT, 1989).

O tratamento dos esgotos é realizado por meios físicos, químicos e biológicos. Os métodos individuais são normalmente classificados como unidades de operação física, processos unitários químicos e processos unitários biológicos. Embora, muitas vezes, estas operações e processos ocorram em uma variedade de combinações nos sistemas de tratamento, vantagens têm sido encontradas para estudar suas bases científicas separadamente.

METCALF e EDDY (1979) classificam as unidades de tratamento em:

- unidades de operação física: métodos de tratamento nos quais a aplicação de forças físicas predomina. Foram estes os primeiros métodos utilizados em resposta à observação da natureza pelo homem. Grades, mistura, floculação, sedimentação, flotação e filtração são exemplos típicos destas unidades de operação;
- unidades de operação química: métodos de tratamento onde é utilizada a adição de produtos químicos ou reações químicas para tratamento dos esgotos. Precipitação, transferência de gás, adsorção e desinfecção são os exemplos mais comuns utilizados no tratamento de esgotos;

- unidades de processos biológicos: o tratamento biológico é usado primariamente para remover substâncias orgânicas biodegradáveis (coloidal ou dissolvida) contidas no esgoto. Basicamente, estas substâncias são convertidas em gases e em massa biológica, para que possam ser posteriormente removidas através da sedimentação.

O tratamento biológico pode também ser utilizado para remoção de nitrogênio do esgoto.

Com um controle adequado, o esgoto pode ser biologicamente tratado, na maioria dos casos.

AZEVEDO NETTO (1977) classifica os processos de tratamento biológico dos esgotos em:

- processos biológicos anaeróbios:
 - tanques sépticos e lagoas anaeróbias;
- processos biológicos aeróbios:
 - clássicos: filtração biológica e lodos ativados
 - variações econômicas: lagoas de estabilização aeróbias, lagoas aeradas e valos de oxidação.

2.5 O Processo de Lodos Ativados

O processo de lodos ativados foi desenvolvido na Inglaterra em 1913, e vem sendo largamente utilizado para o tratamento de esgotos domésticos e/ou industriais, tanto em sua forma original como em várias de suas formas modificadas (GRAY, 1990). Basicamente, o processo envolve o crescimento de microorganismos que atuam na matéria orgânica contida no esgoto. Esses microorganismos utilizam a maior parte da matéria em suspensão e a matéria dissolvida encontrada no esgoto, como sua fonte de alimento. Os microorganismos são aeróbios e, portanto, requerem uma fonte de ar ou oxigênio. As necessidades de alimentos e ar ou oxigênio são similares às necessidades de outros animais.

O sistema de lodos ativados é basicamente composto por duas unidades: um tanque de aeração e uma unidade de separação de sólidos, de onde o lodo é separado e recirculado para o tanque de aeração ou descartado do sistema, enquanto o líquido tratado deixa o sistema (FIG. 2.5.1).

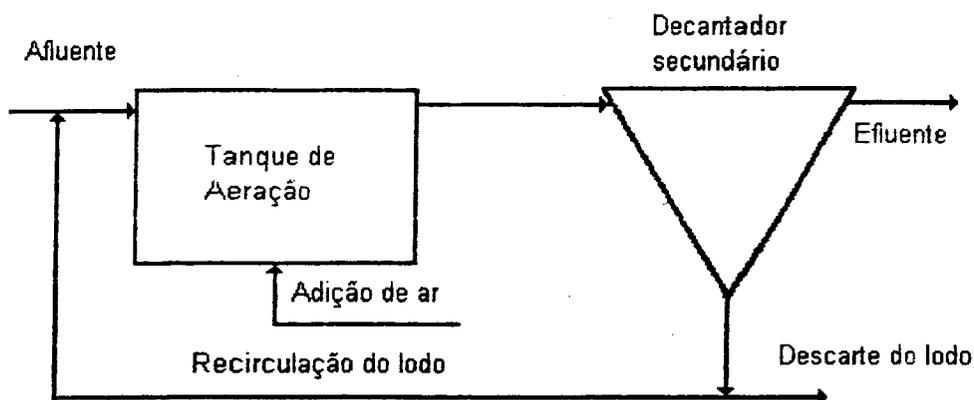


FIG. 2.5.1 Processo Típico de Lodos Ativados
 FONTE: ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 1977

O processo de lodos ativados envolve o crescimento de microorganismos que atuam na matéria orgânica contida nos esgotos, formando os flocos biológicos. Esses flocos são insolúveis, exercendo uma demanda de oxigênio. No decantador, são removidos os flocos biológicos. A esses flocos biológicos dá-se o nome de lodos ativados. Parte dos flocos biológicos retorna ao tanque de aeração, misturando-se com o esgoto afluente, e formando o que se convencionou chamar de "liquor".

O lodo de retorno é um excelente acelerador do processo de estabilização da matéria orgânica, pois, além de ser um inoculador ao afluente do tanque de aeração, é portador de alta capacidade de depuração.

O líquido misturado normalmente é aerado por um período de algumas horas. Durante este período, parte da matéria orgânica do esgoto é convertida em microorganismos e parte é convertida em vários outros produtos, incluindo dióxido de carbono. Uma parte do lodo decantado é descartado.

O descarte é necessário, para manter a quantidade de microorganismos desejável no processo, porque os microorganismos crescem e se multiplicam de acordo com a quantidade de alimento (substrato) disponível no esgoto. A idéia básica para alcançar o sucesso na operação de um sistema de lodos ativados é manter um balanço entre a quantidade de microorganismos e a quantidade de alimento. Uma operação adequada proporcionará um equilíbrio entre a quantidade de microorganismos, nutrientes e oxigênio. Caso contrário, poderá ocorrer uma perda na eficiência do sistema (GRAY, 1990).

Parte do lodo sedimentado é retornado ao tanque de aeração, para manter o balanço com a matéria orgânica contida no esgoto afluente. Este balanço é geralmente relacionado à carga do processo, que é expressa pela taxa F/M (alimento/biomassa).

Muitos trabalhos publicados têm apresentado diferentes variações do processo de lodos ativados.

Normalmente, os processos encontrados são: convencional, aeração escalonada, mistura completa, aeração derivada, aeração prolongada e estabilização por contato (QASIN, 1985).

O sistema convencional constitui-se de um tanque de aeração e um decantador secundário. O lodo recirculado é misturado com o esgoto decantado afluente, na extremidade inicial do tanque de aeração. O período de aeração varia de 4 a 8 horas. A razão de recirculação do lodo varia entre 25 e 50% (QASIN, 1985).

Na figura 2.5.2, mostra-se o esquema do processo convencional de lodos ativados.

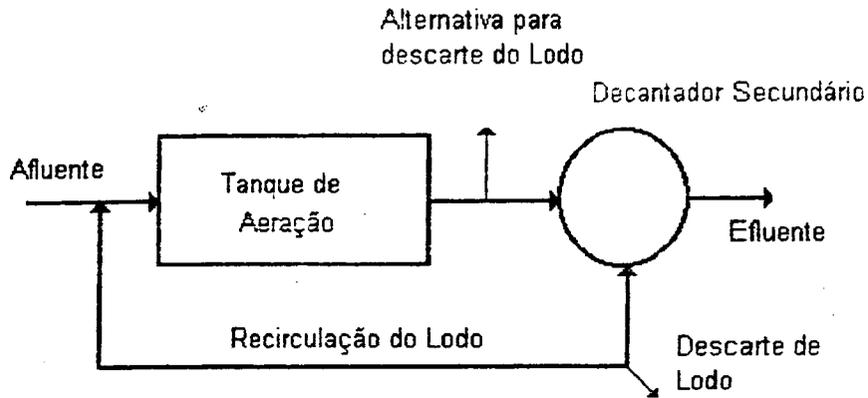


FIG. 2.5.2 Processo Convencional de Lodos Ativados
FONTE: QASIN, 1985

A aeração escalonada é uma modificação do processo convencional, onde o lodo recirculado é misturado com o esgoto afluente do tanque de aeração, em pelo menos três pontos distintos e igualmente espaçados no tanque de aeração. O período de aeração fica compreendido entre 3 e 5 horas. A razão de recirculação de lodo varia de 25 a 75% (QASIN,1985).

Na figura 2.5.3, mostra-se o esquema do processo de aeração escalonada.

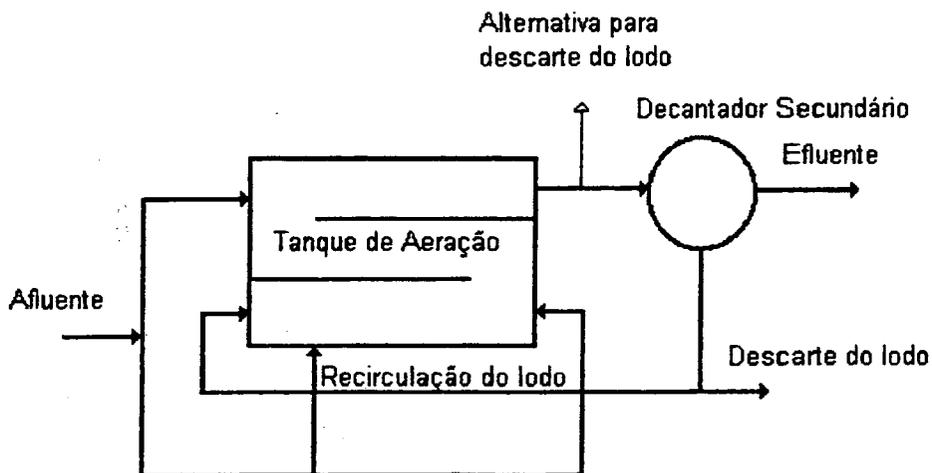


FIG. 2.5.3 Aeração Escalonada
FONTE: QASIN, 1985

Na aeração derivada, o tanque de aeração deve ser retangular e deve funcionar como um reator do tipo "plug flow". No início do reator, os aeradores são menos espaçados do que na extremidade oposta. O período de aeração varia entre 4 e 8 horas. A taxa de recirculação do lodo está compreendida entre 25 a 50% (QASIN, 1985).

Na figura 2.5.4, mostra-se o esquema do processo de aeração derivada.

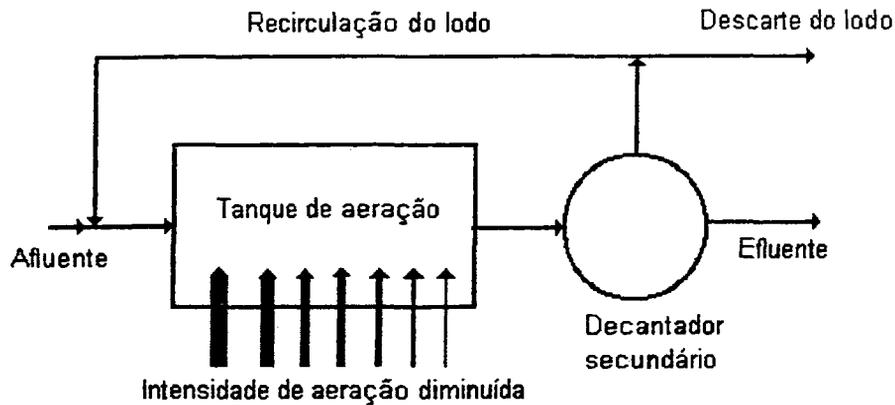


FIG. 2.5.4 Aeração Derivada

FONTE: GRAY, 1990

A aeração prolongada ou aeração estendida se caracteriza por apresentar valores elevados para a idade do lodo e pelo excesso de oxigênio no tanque de aeração. O período de aeração é estimado entre 18 e 36 horas. Recircula-se uma quantidade de lodo sedimentado equivalente a 50 até 200% da vazão de entrada (QASIN, 1985).

A figura 2.5.5 mostra o esquema do processo de aeração prolongada.

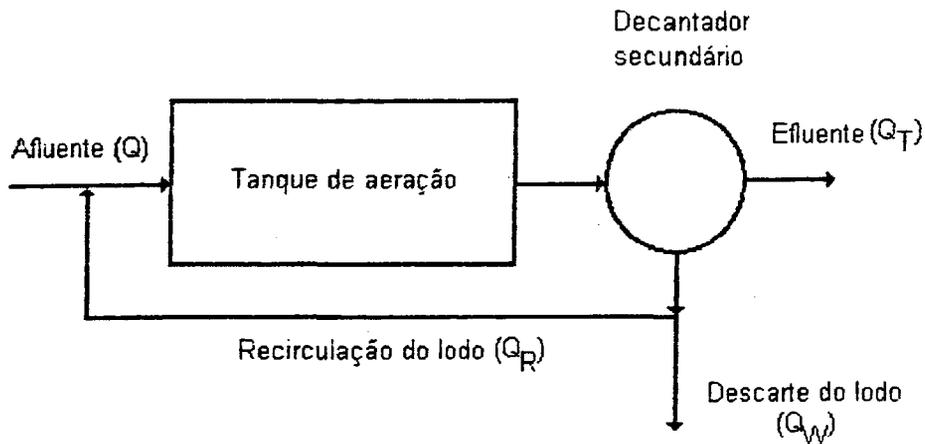


FIG. 2.5.5 Aeração Prolongada
FONTE: PESSÔA, 1982

Na mistura completa, a mistura do esgoto afluente, juntamente com o lodo recirculado, é distribuída uniformemente por toda extensão do tanque de aeração.

O efluente do tanque de aeração é coletado lateralmente e daí conduzido ao decantador secundário. O período de aeração está compreendido entre 3 e 5 horas. A taxa de recirculação de lodo é de 25 a 100% (QASIN, 1985). A figura 2.5.6. mostra um esquema do processo mistura completa.

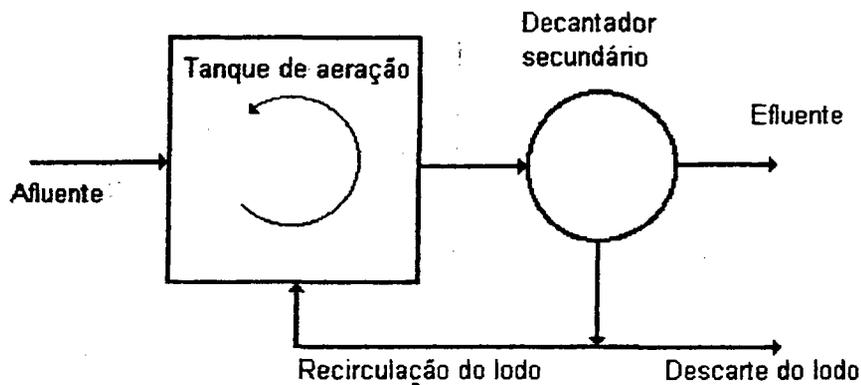


FIG. 2.5.6 Mistura Completa
FONTE: GRAY, 1990

2.6 Controle Operacional do Processo de Lodos Ativados

A operação e o controle apropriado do processo de lodos ativados é essencial para alcançar um desempenho ótimo, evitando-se assim problemas operacionais.

O controle do processo de lodos ativados pode ser efetuado de várias formas distintas. O responsável pela operação do sistema deve estudar cada uma delas e aplicar aquela ou aquelas que melhor se adaptem à sua instalação, e que irá proporcionar um efluente final de melhor qualidade.

A seguir, serão descritas as formas mais utilizadas no controle do processo de lodos ativados.

2.6.1 Controle pelos Sólidos em Suspensão no Tanque de Aeração

A concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração (SSTA) é uma medida bruta da biomassa no tanque de aeração. O SSTA é um parâmetro básico utilizado nos cálculos de vários outros parâmetros de operação, sendo expresso normalmente em mg/l. Parte dos sólidos em suspensão podem ser inorgânicos e, nestas condições, isto pode representar uma significativa proporção de sólidos presentes. Para solucionar este problema, pode-se estimar a fração orgânica da biomassa, medindo-se os sólidos em suspensão voláteis presentes no tanque de aeração (SSVTA). Para o controle operacional do dia a dia da estação de tratamento que utiliza o processo de lodos ativados, o SSTA é uma medida adequada (GRAY, 1990).

A concentração de SSTA no processo de lodos ativados convencional é da ordem de 1500 a 3500 mg/l (GRAY, 1990). Para o processo modificado "aeração prolongada", os valores se situam entre 3000 e 6000 mg/l (QASIN, 1985).

A grande desvantagem deste tipo de controle é de se obter o valor de SSTA somente após algumas horas da retirada de amostras do sistema. Na maioria das vezes, quando se obtêm os resultados, as condições no tanque de aeração são diferentes daquelas existentes no momento da coleta da amostra.

2.6.2 Idade do Lodo (θ_c)

A idade do lodo é definida como sendo o tempo de permanência médio dos sólidos em suspensão no tanque de aeração. A idade do lodo é calculada através da relação entre a quantidade de sólidos no tanque de aeração dividida pela taxa de perda do lodo do sistema.

A equação simplificada é:

$$\theta_c = \frac{V \cdot X}{(Q_w \cdot X_w) + (Q_e \cdot X_e)} \quad (1)$$

onde:

θ_c = idade do lodo, em dias

V = volume do tanque de aeração, em m^3

X = Concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração (SSTA), em mg/l

Q_w = vazão de descarte do lodo, em m^3 /dia

Q_e = vazão do efluente, em m^3 /dia

X_e = concentração de sólidos suspensos no efluente, em mg/l

O processo de lodos ativados convencional opera com idade do lodo entre 5 e 15 dias, enquanto que o processo modificado "aeração prolongada", trabalha com valores da ordem de 20 a 30 dias (QASIN, 1985).

O controle do processo pela idade do lodo é bem mais simples que o dos sólidos em suspensão. Consiste na retirada de um certo volume de lodo do sistema, de modo a se manter uma determinada idade do lodo fixada anteriormente. Este tipo de controle é um dos mais utilizados nas estações de lodos ativados.

2.6.3 Carga da Estação

Três fatores de carga são utilizados no projeto e na operação do processo de lodos ativados: a carga volumétrica, a carga orgânica e a carga de lodos.

a) Carga Volumétrica

A carga volumétrica ou tempo de detenção hidráulico relaciona a vazão do sistema e o volume do tanque de aeração

$$t = \frac{V \cdot 24}{Q} \quad (2)$$

onde:

t = carga volumétrica ou tempo de detenção hidráulico, em horas (h)

V = volume do tanque de aeração, em m^3

Q = vazão do sistema em m^3 /dia

O processo de lodos ativados convencional opera com tempo de detenção hidráulico da ordem de 4 a 8 horas, sendo que o processo modificado "aeração prolongada" opera com valores entre 18 e 36 horas (QASIN, 1985).

b) Carga Orgânica

A carga orgânica é expressa em Kg de DBO_5 por unidade de volume do tanque de aeração por unidade de tempo (dia)

$$\text{Carga Orgânica} = \frac{Q \cdot DBO_5}{V \cdot 1000} \quad (3)$$

onde:

DBO_5 = demanda bioquímica de oxigênio em 5 dias do esgoto afluente, em mg/l

Q = vazão do esgoto afluente, em m^3 /dia

V = volume do tanque de aeração, em m^3

O processo de lodos ativados convencional opera com cargas orgânicas com valores entre 0,3 e 0,6 Kg DBO₅/m³.dia, enquanto que o processo modificado "aeração prolongada" trabalha com valores entre 0,1 e 0,4 Kg DBO₅/m³.dia (QASIN, 1985).

c) Carga de Lodo

A carga de lodo, também referida como F/M (alimento/biomassa), é calculada como segue:

$$F/M = \frac{Q \cdot DBO_5}{V \cdot X} \quad (4)$$

onde:

F/M = carga de lodo, em kg DBO₅/kg SSTA.dia

Q = vazão do sistema, em m³/dia

DBO₅ = demanda bioquímica de oxigênio do esgoto afluente, em mg/l

V = volume do tanque de aeração, em m³

X = sólidos em suspensão no tanque de aeração, em mg/l

O processo convencional de lodos ativados opera com cargas de lodo entre 0,2 e 0,4 kg DBO₅/kgSSTAxdia. O processo modificado "aeração prolongada" opera com valores entre 0,05 e 0,15 kg DBO₅/kg SSTA.dia (QASIN, 1985).

2.6.4 Sedimentabilidade do Lodo

A maioria dos problemas associados com o processo de lodos ativados envolve a sedimentabilidade do lodo. Um método rápido para avaliação da sedimentabilidade do lodo é vital, para que uma boa separação do lodo seja mantida no decantador secundário, incluindo uma adequada recirculação do lodo e um efluente final com baixa concentração de sólidos suspensos.

A determinação do índice volumétrico de lodo (IVL), ou índice Mohlman, é amplamente utilizada para avaliar a qualidade do lodo sedimentado (GRAY, 1990).

O IVL é definido como o volume, em mililitros (ml), ocupado por uma grama de lodo ativado, após um período de sedimentação de 30 minutos. Matematicamente, o índice volumétrico de lodo é expresso pela relação:

$$IVL = \frac{IL \cdot 1000}{SSTA} \quad (5)$$

onde:

IVL = índice volumétrico de lodo, em ml/g

IL = volume sedimentado em 30 min. na proveta graduada de 1000ml, em ml/l

SSTA = sólidos suspensos no tanque de aeração, em mg/l

2.6.5 Recirculação do Lodo

O lodo é recirculado para o tanque de aeração, para manter uma massa microbiana suficiente para oxidação do esgoto.

Entre os métodos para controlar a taxa de recirculação do lodo, pode-se destacar:

- a) Modelo de balanço de massa do sistema
- b) Modelo através da determinação da sedimentabilidade do lodo
- c) Modelo do índice volumétrico de lodo

- a) Modelo de balanço de massa do sistema

Este modelo é uma ferramenta útil para calcular a taxa de recirculação do lodo. Entretanto, ele assume que o nível do manto de lodo no clarificador é constante.

Dados necessários:

- vazão afluente, em m³/dia (Q)
- concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração, em mg/l (SSTA)
- concentração de sólidos em suspensão no lodo recirculado, em mg/l (RAS_{SS})

A taxa de recirculação de lodo (R), será:

$$R = \frac{Q \cdot SSTA}{RAS_{SS} - SSTA} \quad (6)$$

b) Modelo do teste de sedimentabilidade do lodo

Este modelo é menos preciso do que o modelo de balanço de massa, tendo em vista que as condições do teste não refletem totalmente as condições reais de sedimentação no decantador secundário.

Dados necessários:

- vazão afluente, em m³/dia (Q)
- teste do lodo sedimentado (IL) em 30 minutos no cilindro graduado de 1000 ml, em ml/l

A taxa de recirculação do lodo (R) será:

$$R = \frac{IL}{1000 - IL} * 100 \quad (7)$$

c) Modelo do índice volumétrico de lodo (IVL)

Este método é baseado no teste do índice volumétrico de lodo para estimar a concentração de sólidos suspensos no lodo recirculado.

Dados necessários:

- índice volumétrico de lodo, em ml/g (IVL)
- vazão afluente, em m³/dia (Q)
- concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração, em mg/l (SSTA)

Determinação da concentração de sólidos em suspensão no lodo recirculado (RAS_{SS}), em mg/l

$$RAS_{SS} = \frac{10^6}{IVL} \quad (8)$$

A taxa de recirculação (R) será:

$$R = \frac{Q \cdot SSTA}{RAS_{SS} - SSTA} \quad (9)$$

2.7 Pontos Relevantes no Controle Operacional

O processo de lodos ativados pode ser afetado tanto pela natureza do esgoto, como pelos fatores ambientais, climáticos ou hidrológicos.

Utilizando combinações diversas dos principais parâmetros de operações, diferentes taxas e graus de tratamento são possíveis. Esta flexibilidade permite que o sistema seja operado em uma larga faixa de cargas, tornando-se a principal vantagem do processo de lodos ativados em relação aos demais tipos de tratamento (GRAY, 1990).

O controle operacional do processo de lodos ativados pode ser estabelecido em função das variáveis que constituem o objetivo da ação de controle. Estas variáveis podem ser avaliadas diretamente, pela qualidade do efluente final, ou podem ser estados ou indicadores que indiretamente reflitam o desempenho do processo. Como exemplo, pode-se citar o controle das variáveis de estado, como o Índice Volumétrico de Lodo (IVL), Relação Alimento/Biomassa (F/M) e Idade do Lodo (θ_C), as quais são normalmente controladas através da manipulação das variáveis Vazão de Recirculação (Q_R) e Vazão de Descarte do Lodo (Q_W).

Atualmente, o controle operacional do processo de lodos ativados é realizado, principalmente, através:

- da experiência do operador do sistema;
- dos métodos clássicos de controle.

No primeiro caso, a experiência e o conhecimento do operador do sistema são a base para a maior parte das ações de controle necessárias ao processo. A intervenção no sistema é feita, somente, quando da detecção de queda na qualidade do efluente. Isso caracteriza, entretanto, uma forma intuitiva de controle. Essa forma de controle de processo pode levar muitas vezes a ajustes desnecessários.

Nos métodos clássicos, as variáveis de estado ou indicadores são controlados. Como exemplo, pode-se citar o controle: da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) do efluente, do nitrogênio do efluente, da relação Alimento/Biomassa (F/M), da idade do lodo (θ_c), da concentração de sólidos em suspensão no tanque de aeração (SSTA), etc.

O bom desempenho deste método de controle depende fundamentalmente de resultados de análises laboratoriais e da manipulação desses resultados, exigindo do operador conhecimento sobre a modelação do sistema.

Estratégias de controle baseadas em algoritmos de otimização têm sido estudadas. Entretanto, a maioria desses estudos utiliza técnicas de simulação, com poucas implementações em escala real (SPERLING E LUMBERS, 1991).

2.8 Conclusão

Foi apresentada uma abordagem da teoria do tratamento de esgotos sanitários, especificamente o processo de lodos ativados. Por serem os mais utilizados, foram abordados com mais detalhes o processo de lodos ativados convencional e o processo modificado "aeração prolongada".

O controle operacional do sistema de lodos ativados é considerado complexo, devido aos componentes e à variação dos esgotos, sendo caracterizado

como um processo dinâmico. Para realizá-lo, deve-se levar em consideração o conhecimento do especialista em tratamento de esgotos, o conhecimento contido nas normas técnicas, o conhecimento empírico dos operadores, etc. Para o gerenciamento desses conhecimentos, podem-se utilizar técnicas de Inteligência Artificial.

O próximo capítulo será destinado à apresentação das técnicas de Inteligência Artificial, dando uma maior ênfase aos sistemas especialistas.

3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

3.1 Introdução

O sistema de lodos ativados é um processo dinâmico. Portanto, para o seu controle operacional, deve-se ter um processo também dinâmico. É necessário levar em consideração o conhecimento do especialista em tratamento de esgotos, o conhecimento contido nas normas técnicas, o conhecimento empírico adquirido com os anos de experiência dos operadores, etc.

Para gerenciar estas fontes de conhecimento, pode-se utilizar uma das técnicas de inteligência artificial, especificamente, sistemas especialistas. Essa técnica possibilita combinar, em um único sistema, conhecimentos de naturezas diferentes. Além disso, a separação do conhecimento do processo de raciocínio permite que a sua aquisição continue além da conclusão do sistema, facilitando a sua adaptação a novas situações.

3.2 Conceitos Fundamentais

De acordo com BARR e FEIGENBAUM (1986), "Inteligência Artificial" é a parte da Ciência da Computação preocupada com projetos de sistemas computacionais inteligentes, que são sistemas que exibem as características que são associadas com a inteligência no comportamento humano: entendimento, linguagem, aprendizado, raciocínio, solução de problemas e assim por diante.

Para BODEN (1977), "Inteligência Artificial significa o uso de programas de computadores e técnicas de programação para clarificar os princípios da inteligência em geral e do pensamento humano em particular".

LIMA e BARRETO (1987) definem "Inteligência Artificial como o ramo da ciência da computação que trata das maneiras de representar o conhecimento por meio de símbolos, em lugar de números, e de regras práticas ou heurísticas em lugar dos métodos tradicionais de processamento de informação".

LEVINE, DRANG e EDELSON (1988) afirmam que "Inteligência Artificial é simplesmente uma maneira de fazer o computador pensar inteligentemente".

Para RICH (1988), "Inteligência Artificial é o estudo de como fazer os computadores realizarem tarefas em que, no momento, as pessoas são melhores".

De acordo com ARARIBÓIA (1988), "Inteligência Artificial é o ramo do conhecimento que trata, entre outras coisas, do projeto e da construção de computadores e robôs inteligentes. Um computador é inteligente se possui qualquer uma das habilidades mentais para que uma pessoa possa ser considerada inteligente".

GAUTHIER, RODRIGUES FILHO E BARCIA (1989), afirmam que "Inteligência Artificial significa fazer o computador apresentar o desempenho de um ser humano no que se refere à aprendizagem, raciocínio, compreensão, etc.; ou seja, as faculdades relacionadas com inteligência".

Para OWEN (1987), o campo de Inteligência Artificial pode ser dividido em três áreas de pesquisa:

1. Desenvolvimento de robôs inteligentes, ou fabricação de máquinas capazes de ver, ouvir e usar outros sentidos para reconhecer padrões, atuar e solucionar problemas em um ambiente físico em mudança.

2. Desenvolvimento de processamento de linguagem natural, ou dando ao computador a habilidade para ler, falar e entender a linguagem humana usada na conversação diária e na comunicação.

3. Desenvolvimento de sistemas baseados em conhecimentos inteligentes, ou criando computadores que podem simular o comportamento, conhecimento e habilidades de seres humanos.

Segundo FROST (1986), "Sistema Baseado em Conhecimento é um conjunto de recursos - hardware, software e possivelmente um ser humano - cujas responsabilidades coletivas incluem armazenamento da base de conhecimento, mantendo a segurança e integridade, e fornecendo aos usuários as rotinas requeridas de entrada/saída, incluindo facilidades de recuperação, tal que a base de conhecimento possa ser acessada como requerida".

WATERMAN (1986) diz "sistema que é organizado de forma que separa o conhecimento sobre o domínio do problema de outro conhecimento do sistema, como conhecimento geral sobre como solucionar problemas ou conhecimento sobre como interagir com o usuário, é um Sistema Especialista". A coleção do domínio de conhecimento é chamada base de conhecimento e o conhecimento para solucionar problemas é chamado máquina de inferência. Ele afirma ainda que: "Um programa com conhecimento organizado desta forma é um Sistema Baseado em Conhecimento".

Através da figura 3.2.1, pode-se verificar que todos os sistemas especialistas são sistemas baseados em conhecimento, enquanto que o inverso nem sempre é verdadeiro.

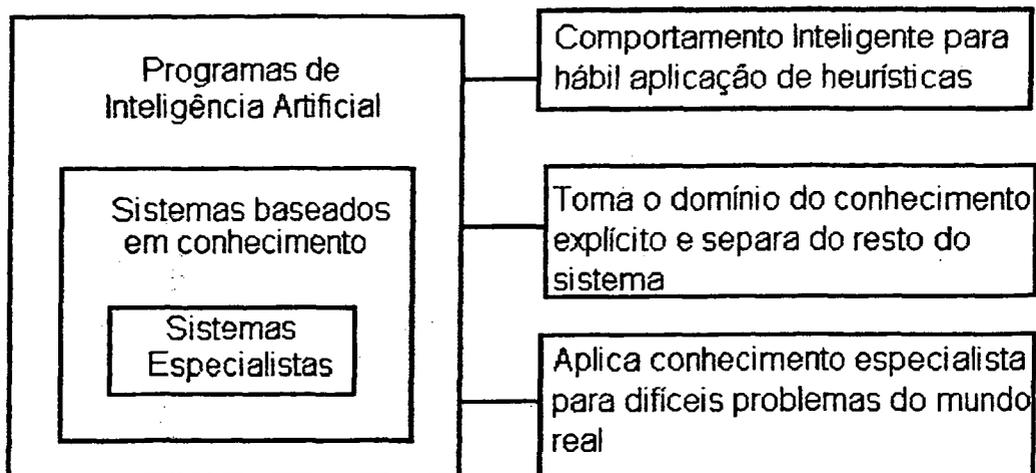


FIG. 3.2.1 Sistemas Especialistas são Sistemas baseados em Conhecimento.

FONTE: WATERMAN, 1986.

Segundo STEFIK et al in DUARTE (1987), "Sistemas Especialistas são programas utilizados para solução de problemas, geralmente considerados complexos, e que, portanto, requerem "sabedoria". Tais programas são "baseados em conhecimento" porque seu desempenho depende crucialmente do uso de fatos e heurísticas, utilizados por especialistas".

ORTOLANO e PERMAN (1990), classificaram os sistemas especialistas em cinco grupos:

1. Interpretação
2. Diagnóstico e Prescrição
3. Projeto e Planejamento
4. Monitoramento e Controle
5. Instrução

A maioria dos sistemas descritos na literatura existente pertence às classes de interpretação, diagnóstico e prescrição, instrução, monitoramento e controle.

3.3 Sistemas Especialistas

As aplicações de Sistemas Especialistas na ciência, engenharia e negócios estão crescendo rapidamente. No campo da engenharia ambiental, várias aplicações de Sistemas Especialistas têm sido verificadas (ROSSMAN e SILLER, 1987).

Os Sistemas Especialistas não representam o verdadeiro processo do raciocínio humano, mas sim imitam as ações e as decisões de um especialista humano, usando uma representação do conhecimento e do processo de raciocínio do especialista.

Os Sistemas Especialistas diferem significativamente das técnicas tradicionais, as quais estão principalmente voltadas para soluções algorítmicas de problemas numéricos bem definidos. Por outro lado, os Sistemas Especialistas se adaptam aos problemas mal definidos e que são difíceis de formalizar, mas que podem ser resolvidos através de um esboço adequado da representação do conhecimento disponível (TRAPPL in NIX, COLLINS e TSAY, 1989).

Os algoritmos utilizam procedimentos e cálculos para resolver um problema, cujos resultados devem ser analisados por um especialista. Os Sistemas Especialistas utilizam inferência, raciocínio, heurística e interpretação, bem como fatos e procedimentos algorítmicos.

3.4 Organização de um Sistema Especialista

O conhecimento de um Sistema Especialista é organizado de tal forma que separa o conhecimento de domínio do problema de outros tipos de conhecimento do sistema, tais como os procedimentos de resolução de problemas ou interação com o usuário. Estes conhecimentos especializados são chamados de "Base de Conhecimento", enquanto os procedimentos gerais de solução do problema são chamados de "Motor de Inferência"(WATERMAN, 1986).

A Base de Conhecimento de um Sistema Especialista contém fatos e regras (ou outras representações) e usa os fatos como base para tomada de decisão.

A Base de Conhecimento é geralmente organizada através de sistemas de produção, redes semânticas, frames ou por uma combinação destas técnicas (DYM, SCOWN, MULLARKEY, ORTOLANO e PERMAN, in NIX, COLLINS e TSAY, 1989).

O Motor de Inferência contém um interpretador, que decide como aplicar as regras para inferir novos conhecimentos, e um sequenciador, que decide a ordem na qual as regras devem ser aplicadas.

A organização de um Sistema Especialista é mostrada na figura 3.4.1 a seguir:

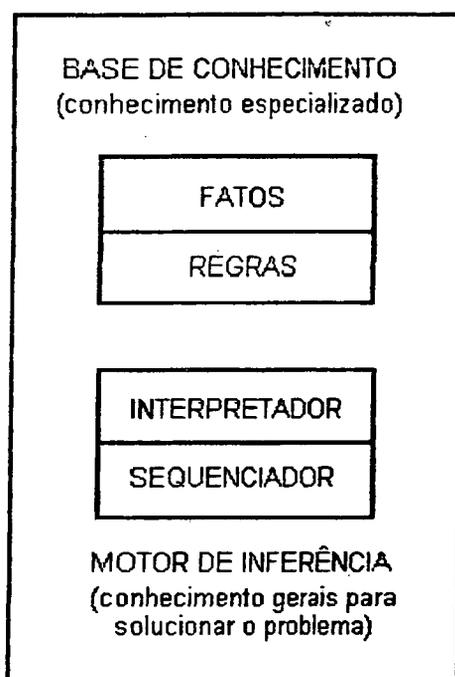


FIG. 3.4.1 Estrutura de um Sistema Especialista
FONTE: WATERMAN, 1986

Vários são os atributos desejáveis de um Sistema Especialista. A seguir, são citados os principais (WILLIAMS in GAUTHIER, RODRIGUES FILHO e BARCIA, 1990):

- deve separar o conhecimento do domínio específico e os procedimentos de resolução do problema, e incluir os conceitos de base de conhecimento e de motor de inferência;
- deve simular o pensamento do ser humano;
- deve ser capaz de aprender através da experiência;
- deve produzir uma base de conhecimento dinâmica, de modo a ser facilmente colocada em diferentes módulos de conhecimento;
- deve interagir em linguagem natural, no domínio do conhecimento;
- deve apresentar para o usuário uma estratégia de controle simples e transparente;

- deve ser computacionalmente rápido e não demandar excessivos recursos de hardware;
- deve ser capaz de raciocinar em condições de incerteza e de insuficiência de informação.

3.5 Aquisição e Representação do Conhecimento

A aquisição do conhecimento é o coração do desenvolvimento de um Sistema Especialista, envolvendo dedução, análise e interpretação do conhecimento que um especialista humano usa, quando resolve um problema particular (KIDD in NIX, COLLINS e TSAY, 1989).

O problema da aquisição do conhecimento pode ser encarado sob o ponto de vista psicológico, onde a aquisição do conhecimento é a construção de um modelo que expresse o modo de pensar do especialista. Para o cientista da computação e aqueles interessados no desenvolvimento de Sistemas Especialistas, o importante são os métodos de representação do conhecimento disponíveis para rápida transferência da experiência do especialista. Existe uma grande quantidade de literatura relacionada à aquisição de conhecimento (WATERMAN, 1986; COHN, HARRIS e BOWLBY, 1988; GESELBRACHT e JOHNSTON, 1988).

O processo de aquisição de conhecimento pode ser dividido em três fases: familiarização, entrevistas e análises.

Na fase de familiarização, o domínio sob consideração é completamente estudado, para que o engenheiro de conhecimento tome-se familiarizado com a essência do domínio.

Na fase de entrevista o engenheiro de conhecimento induz o especialista a revelar o seu conhecimento em termos de problemas, objetivos e soluções disponíveis. A entrevista pode ser um dos principais obstáculos para o desenvolvimento do Sistema Especialista. Entre as numerosas razões para que isso

ocorra, pode-se citar: os especialistas podem não estar certos de sua experiência, ou eles podem não ser capazes de expressá-la ou ainda a experiência que expressam pode ser irrelevante ou incorreta.

Na fase de análise, o conhecimento do especialista é organizado em termos de subcomponentes ou subproblemas do domínio. Cada componente é estudado pela sua frequência, objetivos, soluções possíveis, cenários e habilidades requeridas.

Representação do Conhecimento constitui-se do conjunto de mecanismos usados para armazenar e manipular o conhecimento. Este conhecimento apresenta-se sob a forma de objetos, classes, categorias e descrições (exemplo: sabiá é um pássaro, pássaros têm penas); eventos (exemplo: segunda-feira é feriado); habilidades (exemplo: operar uma estação de tratamento de esgotos) e meta conhecimento (exemplo: conhecimento do que o operador sabe a respeito do processo de lodos ativados).

Existem várias maneiras de representação de conhecimento. A seguir, serão descritas as principais (GAUTHIER, RODRIGUES FILHO e BARCIA, 1990):

a) Representação em Lógica

A lógica clássica, criada por Aristóteles, trabalhava essencialmente com a veracidade dos argumentos.

Exemplo:

Sabiá é um pássaro	$S \rightarrow P$
Todos os pássaros voam	Todos $P \rightarrow V$
Portanto, sabiá voa	Então, $S \rightarrow V$

A lógica booleana utiliza símbolos e suas conexões, evitando imprecisão. Possui dois ramos distintos: lógica proposicional e cálculo dos predicados.

A lógica proposicional se preocupa com a verdade ou falsidade de proposições, e utiliza operadores que conectam estas proposições:

AND, OR, NOT, IMPLIES, EQUIVALENT.

O cálculo dos predicados, que inclui relações entre objetos e suas classes, é uma extensão da lógica proposicional e tem como base os predicados. Estes são funções que retornam com o valor "verdadeiro" ou "falso", dependendo de seus argumentos.

b) Redes Semânticas

Redes Semânticas são estruturas formadas por nós, conectados entre si através de arcos rotulados.

Os nós representam objetos, conceitos, situações ou ações, e os arcos representam relações entre os nós.

c) Frames

Frames constituem-se em um método de organizar a representação do conhecimento de uma maneira que direcionem a atenção, facilitando a recuperação da informação e a inferência.

Frames são descrições estruturadas de experiências já vividas. Um frame de uma estação de tratamento de esgotos teria descrições dos objetos e situações associadas a ela.

d) Sistemas de Produção

Sistema de produção é o tipo mais comum de formalização de fatos e regras em Sistemas Especialistas. Foram inicialmente propostos por Post, em 1943.

Um sistema de produção consiste de três partes:

- uma base de regras, composta de um conjunto de regras de produção;
- uma estrutura de dados, chamada contexto;
- um interpretador, que controla as atividades do sistema.

Nos sistemas de produção, o banco de regras é armazenado como uma coleção de declarações SE - ENTÃO

SE < premissa > ENTÃO < conclusão >

A parte SE da regra é chamada de premissa, parte antecedente ou lado esquerdo da regra. A parte ENTÃO é chamada de lado direito, conclusão ou consequente.

O interpretador decide, como em todos os interpretadores em sistemas de computação, o que fazer a seguir.

3.6 Conhecimento Impreciso em Sistemas Especialistas

A maior parte das ferramentas de construção de Sistemas Especialistas comerciais de hoje utiliza fatores de certeza ou de confiança, para manipular incertezas no conhecimento ou nos dados. Porém, as mesmas não podem enfrentar conceitos tais como: alto, bom, ou quente, os quais constituem uma parte muito significativa da linguagem natural (LEUNG E LAM, 1988).

Grande parte do conhecimento humano é vago e impreciso. O pensamento e o raciocínio humano envolvem, frequentemente, informações inexatas. Sistemas Especialistas poderiam lidar com estas informações, a partir das seguintes fontes:

- a) conceitos difusos inerentemente humanos;
- b) informações não seguras;
- c) informações incompletas;
- d) opiniões diferentes de especialistas.

LEUNG E LAM (1988) classificam o conhecimento inexato em quatro tipos:

- incerteza;
- difusão;
- incerteza e difusão simultâneas;
- incerteza difusa.

Incerteza

A incerteza ocorre quando não se tem certeza absoluta sobre parte da informação. O grau de certeza é usualmente representado por um valor numérico.

Exemplo:

X é uma ave (0,8).

Se X é uma ave, então ele pode voar (0,9).

Os fatores de certeza são 0,8 e 0,9 (também chamados de fatores de confiança).

Difusão.

A difusão ocorre quando o limite de uma parte da informação não é bem definido.

Exemplo:

Paulo é muito jovem.

Se o preço é alto, então o lucro será bom.

Muito jovem, alto e bom são termos difusos.

Incerteza e Difusão Simultâneas

Incerteza e difusão podem ocorrer simultaneamente em algumas situações.

Exemplo:

Paulo é muito alto (0,8).

Se o preço for alto, então o lucro será bom (0,9)

Incerteza Difusa.

Algumas vezes, a incerteza pode ser difusa.

Exemplo:

Paulo é muito pesado (em torno de 0,7).

Muito pesado é um termo difuso. Em torno de 0,7 é a incerteza difusa.

3.7 Sistemas Especialistas Aplicados à Engenharia Ambiental

As aplicações de Sistemas Especialistas na ciência, negócios e engenharia estão crescendo rapidamente. No campo de engenharia ambiental, várias aplicações têm sido desenvolvidas (ROSSMAN E SILLE, 1987).

HUSHON (1987) apresenta a aplicação de Sistemas Especialistas relacionados a problemas ambientais, ressaltando que esses sistemas se enquadram principalmente dentro de quatro categorias tradicionais: interpretação, planejamento, previsão e diagnósticos e reparos. Também ressalta o fato de que poucos têm sido os sistemas implementados na prática.

GESELBRACHT, BRILL e PFEFFER (1988) construíram um modelo baseado em regras para avaliar problemas de entumescimento de lodo (bulking), em uma estação de tratamento através do processo de lodos ativados. Um exemplo do modelo é apresentado através da representação da opinião de apenas um especialista. Como existem diferentes opiniões relacionadas ao problema de "bulking", esse modelo, daria diferentes resultados se fossem utilizadas opiniões de diversos especialistas. A técnica é útil, na medida em que o julgamento ajuda a proporcionar discernimento. O trabalho também revelou um sentimento para a natureza do interrelacionamento de regras e sua associação com a conclusão em um sistema baseado em regras.

Um Sistema Especialista para o controle do processo de lodos ativados é sugerido por KOSKINEM (1989). O modelo baseado em regras se encontra em fase de teste, servindo como fonte de consulta aos operadores. Também a natureza do sistema em compilar e armazenar informações que são coletadas ao longo de um período é de alta importância, desde que mudanças de pessoal podem ocasionar perdas de informações e experiências sobre o controle operacional do processo.

LAI E BERTHOEUX (1990) testaram um Sistema Especialista para controlar o processo de lodos ativados. O principal objetivo desse estudo foi o de delinear um modelo para desenvolver e refinar regras a partir de operadores altamente habilitados. Um caso estudo foi feito, através da consulta a operadores especialistas em estações de tratamento de esgotos para elicitar as regras de controle que foram estruturadas em termos qualitativos. O sistema especialista reproduziu consistentemente as decisões do operador.

COLLINS, NIX, TSAY, GERA e HOPKINS (1990) descrevem o potencial dos Sistemas Especialistas em sistemas de abastecimento de água. É mostrado um exemplo simples relacionando a utilização de tais sistemas para o controle operacional de uma estação de tratamento de água. As ferramentas disponíveis para o desenvolvimento de sistemas especialistas são revistos e uma base procedural para avaliar a maioria das aplicações dentro do controle operacional do sistema de abastecimento de água.

ORTOLANO, COEUR e MACGISCHRIST (1990) discutem a validação da utilização dos Sistemas Especialistas para a manutenção de redes de esgotos sanitários. Testes de validação foram conduzidos para investigar se a saída do sistema pode ser utilizada com confiança. O principal objetivo do estudo foi o de proporcionar uma base para futuras validações da base de conhecimento. A conclusão é que futuros estudos devem tratar somente da validação externa.

A aplicação da Inteligência Artificial e, mais especificamente, Sistemas Especialistas na gestão de redes de distribuição de água é descrita por GUILLON e CROMMELYNCK (1991).

Um protótipo de Sistema Especialista para operar uma estação de tratamento de água foi desenvolvido por NIX e COLLINS (1991). O protótipo foi testado em duas estações de tratamento de água, onde verificou-se a viabilidade e a utilidade de sua aplicação, principalmente para treinar operadores não experientes.

MALES, COYLE, BORCHERS, HERTZ, GRAYMAN e CLARK (1992) testaram um Sistema Especialista para usuários de um sistema sobre a qualidade da água distribuída.

LAPOLLI, LAPOLLI, GAUTHIER e BARCIA (1992) mostram vantagens das técnicas de Inteligência Artificial (Sistemas Especialistas) no controle operacional do processo de lodos ativados.

Um Sistema Especialista aplicado à operação de um sistema de lodos ativados utilizando heurísticas com modelação matemática é descrito por GIULIANO, LOGGIA, NICOSIA e VIVIANI (1992). Utilizando o modelo, e iniciando com os dados iniciais do sistema, o responsável pela operação pode planejar as modificações dos principais parâmetros de controle, devido a evolução temporal previsível das características do esgoto afluente. O modelo de simulação pode também ser utilizado como uma ferramenta de alto aprendizado pelo usuário.

3.8 Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma abordagem das técnicas de Inteligência Artificial, especificamente de Sistemas Especialistas. Mostraram-se também aspectos na organização de um Sistema Especialista, e os mecanismos para aquisição e representação de conhecimento.

Uma revisão bibliográfica sobre a aplicação de Sistemas Especialistas no campo da engenharia ambiental é apresentada.

Os operadores, responsáveis pelo controle operacional dos sistemas de todos os ativados, devem tomar decisões para realizar os ajustes necessários ao processo. Essas decisões normalmente são tomadas levando em consideração medidas qualitativas baseadas em variáveis medidas quantitativamente. Uma forma adequada de modelar tais situações é fornecida pela Teoria dos Conjuntos Difusos.

No capítulo seguinte, será apresentada a Teoria dos Conjuntos Difusos e seus conceitos fundamentais.

4. TEORIA DOS CONJUNTOS DIFUSOS

4.1 Introdução

O controle operacional de um sistema de todos ativados é considerado uma ação complexa, onde o responsável deve tomar decisões para realizar os ajustes necessários ao processo.

O engenheiro de conhecimento frequentemente se expressa através de termos difusos ao invés de termos numéricos, embora as variáveis sejam medidas quantitativamente. Regras difusas podem também ser utilizadas para descrever aspectos qualitativos. Tais regras podem ser implementadas usando a Teoria dos Conjuntos Difusos desenvolvida por ZADEH (1965).

A Teoria dos Conjuntos Difusos fornece um instrumento adequado para modelar situações em que ocorram imprecisões ou incertezas.

4.2 Conceitos

A teoria clássica dos conjuntos caracteriza-se pelo fato de que um elemento pertence ou não pertence a um conjunto, não existindo uma situação intermediária. Os conjuntos clássicos apresentam limites bem definidos.

Considere-se que X seja um conjunto clássico de objetos, denominado universo, cujos elementos são denominados por x , e que A seja um subconjunto de X . Uma função f_A é definida por:

$$f_A(x) = 1 \text{ se e somente se } x \in A$$

$$f_A(x) = 0 \text{ se e somente se } x \notin A$$

f_A é a função característica de X em $\{0,1\}$, sendo $\{0,1\}$ chamado conjunto de avaliação.

No mundo real, entretanto, existe uma série de conjuntos que não apresentam limites bem definidos, ou seja, a pertinência de um elemento ao conjunto não pode ser especificada por um critério binário do tipo "sim ou não". Existem casos que se encontram em uma situação intermediária. Com base nisso, ZADEH (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos difusos. De acordo com esta teoria, um conjunto não apresenta limites bem definidos, podendo um elemento pertencer parcialmente a ele, ou pertencer a dois conjuntos ao mesmo tempo. O que vai caracterizá-lo será o "grau de pertinência", que é uma medida que quantifica o grau ou a "força" com que este elemento pertence a um determinado conjunto.

Matematicamente, um conjunto difuso é definido como: Se X é uma coleção de objetos, então um conjunto difuso A em X é um conjunto de pares ordenados:

$$A = \{x, f_A(x) \mid x \in X\}.$$

A entidade $f_A(x)$ é chamada função de pertinência, ou seja, o valor que é grau de pertinência de x em A . $f_A(x)$ é uma função em $[0,1]$ (PAO,1989).

Considere-se o conjunto de números reais próximos a 10.

$$A = \{(x, f_A(x)) \mid f_A(x) = (1 + (x-10)^2)^{-1}\}$$

A representação gráfica da função de pertinência é mostrada na figura 4.2.1.

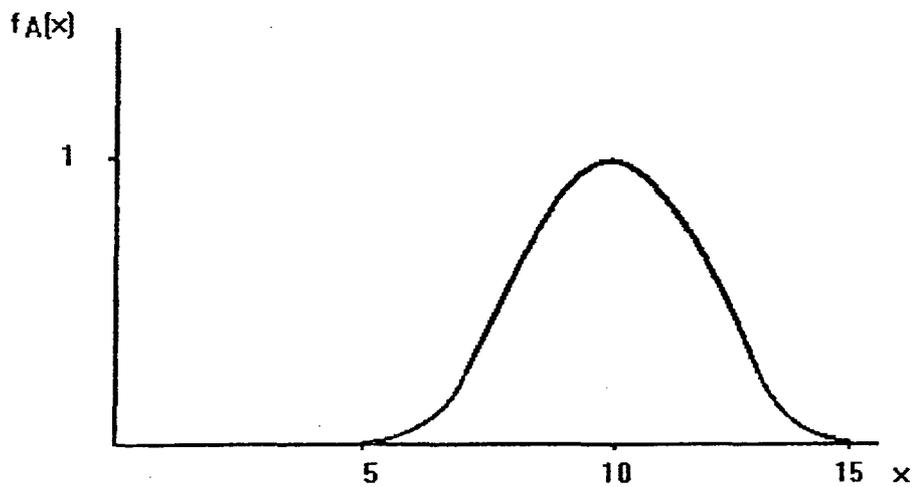


FIG. 4.2.1 Grau de Pertinência dos Números Reais próximos a 10
 FONTE: ZIMMERMANN, 1985

4.3 Definições Básicas

a) O suporte de um conjunto difuso A , $S(A)$, é o conjunto de todo $x \in X$ tal que $f_A(x) > 0$.

b) O conjunto de elementos os quais pertencem ao conjunto difuso A em pelo menos um grau α é chamado o conjunto de nível- α .

$$A = \{x \in X \mid f_A(x) \geq \alpha\}$$

c) Um conjunto difuso A é convexo se:

$$f_A(\lambda x_1 + (1-\lambda)x_2) \geq \min(f_A(x_1), f_A(x_2)) \quad \begin{array}{l} x_1, x_2 \in X \\ \lambda \in [0,1] \end{array}$$

d) Para um conjunto difuso finito A a cardinalidade $|A|$ é definida como:

$$|A| = \sum_{x \in X} f_A(x), \text{ onde } x \in X$$

e) A função de pertinência $f_C(x)$ da intersecção de $C = A \cap B$, é definida por:

$$f_C(x) = \min (f_A(x), f_B(x)), x \in X$$

f) A função de pertinência $f_D(x)$ da união $D = A \cup B$, é definida por:

$$f_D(x) = \max (f_A(x), f_B(x)), x \in X$$

g) A função de pertinência do complemento de um conjunto difuso A , $f_{CA}(x)$ é definida por:

$$f_{CA}(x) = 1 - f_A(x), x \in X$$

h) Define-se o produto cartesiano de conjuntos difusos como segue: seja A_1, \dots, A_n conjuntos difusos em X_1, \dots, X_n . O produto cartesiano é o conjunto cartesiano no espaço produto $X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n$, com função de pertinência:

$$f_{(A_1 \times \dots \times A_n)}(x) = \min_i \{ f_{A_i}(x_i) \mid x = (x_1, \dots, x_n), x_i \in X_i \}$$

i) A soma algébrica (soma probabilística), $C = A + B$ é definida como:

$$C = \{x, f_{A+B}(x) \mid x \in X\}, \text{ onde:}$$

$$f_{A+B}(x) = f_A(x) + f_B(x) - f_A(x) \cdot f_B(x)$$

j) A soma limitada, $C = A \oplus B$ é definida como:

$$C = \{(x, f_{A \oplus B}(x)) \mid x \in X\}, \text{ onde:}$$

$$f_{A \oplus B} = \min(1, f_A(x) + f_B(x))$$

k) A diferença limitada, $C = A - B$ é definida como:

$C = \{(x, f_A - B(x)) \mid x \in X\}$, onde:

$$f_{A - B}(x) = \max(0, f_A(x) + f_B(x) - 1)$$

l) O produto algébrico de dois conjuntos difusos, $C = A * B$ é definido:

$$C = \{(x, f_A(x) * f_B(x)) \mid x \in X\}.$$

m) Sejam $X, Y \subseteq R$ conjuntos universais, então:

$R = \{(x, y), f_R(x, y)) \mid (x, y) \subseteq X.Y\}$ é chamada uma relação difusa sobre $X.Y$.

n) Seja $X, Y \subseteq R$ e

$$A = \{(x, f_A(x)) \mid x \in X\}$$

$B = \{(y, f_B(y)) \mid y \in Y\}$, dois conjuntos difusos. Então:

$R = \{(x, y), f_R(x, y)\} \mid (x, y) \in X.Y\}$ é uma relação difusa sobre A e B se:

$$R(x, y) \leq A(x), \quad (x, y) \in X.Y \text{ e}$$

$$R(x, y) \leq B(y), \quad (x, y) \in X.Y.$$

o) Sejam R e Z duas relações difusas no mesmo espaço

$$f_{R \cup Z}(x, y) = \max\{f_R(x, y), f_Z(x, y)\}, \quad (x, y) \in X.Y$$

$$f_{R \cap Z}(x, y) = \min\{f_R(x, y), f_Z(x, y)\}, \quad (x, y) \in X.Y$$

p) Seja $R = \{(x, y), f_R(x, y) \mid (x, y) \in X.Y\}$ uma relação binária difusa.

A primeira projeção de R é definida como:

$$R(1) = \{x, \max_y f_R(x,y) \mid (x,y) \in X.Y\}$$

A segunda projeção é definida como:

$$R(2) = \{(y, \max_x f_R(x,y) \mid (x,y) \in X.Y)\}$$

A projeção total é definida:

$$R(T) = \max_x \max_y \{ f_R(x,y) \mid (x,y) \in X.Y\}$$

q) Seja $R_1(x,y)$, $(x,y) \in X.Y$ e $R_2(y,z)$, $(y,z) \in Y.Z$, duas relações difusas. A composição máx-min, $R_1 \text{ máx-min } R_2$ é então o conjunto difuso:

$$R_1 \circ R_2 = \{(x,z) \max_y \{ \min\{ f_{R_1}(x,y), f_{R_2}(y,z) \} \} \mid x \in X, y \in Y, z \in Z\}$$

4.4 Estimação de Funções de Pertinência

A função de pertinência é utilizada para medir o grau de pertinência de um elemento a um conjunto. Quando o conjunto é difuso, o grau de pertinência assume um valor no intervalo $[0, 1]$.

Na aplicação da Teoria dos Conjuntos Difusos, um dos tópicos mais importantes é a estimação da função de pertinência, pois uma estimativa adequada valida os resultados obtidos pela utilização da álgebra difusa.

Os pontos importantes a serem considerados na estimação são a forma, os parâmetros e o domínio da função (DEVI e SARMA, 1985).

A seguir, são apresentados os métodos mais utilizados para estimação das funções de pertinência.

4.4.1 Método baseado em Histograma

Neste método, é construído um histograma que descreve os dados considerados. De acordo com DEVI e SARMA (1985), o número de classes do histograma para um nível de significância de 0,005 é obtido pela seguinte fórmula:

$$m = 1,87 (n - 1)^{2/5}$$

onde:

m = número de classes

n = tamanho da amostra

Pode ser utilizada uma função racional para estimar a função de pertinência a partir do histograma, ajustando os parâmetros pelo método dos mínimos quadrados, sendo que a função deve ser normalizada.

Uma outra forma de se obter a função de pertinência baseada em histograma é estimando inicialmente a função densidade de probabilidade ($p(x)$). A função de pertinência é então estimada da seguinte forma:

$$f(x) = \begin{cases} p(x), & \text{se } \beta \cdot p(x) \leq 1 \\ 1, & \text{se } \beta \cdot p(x) > 1 \end{cases}$$

onde a constante β é um parâmetro de ajuste.

4.4.2 Método baseado no Consenso de Especialistas

Neste método, a função de pertinência é obtida com base em opiniões subjetivas de especialistas da área considerada. São feitas entrevistas com especialistas com o objetivo de valorar declarações linguísticas. Dada uma declaração do tipo "X é Y", o especialista deve manifestar sua concordância ou não com essa declaração. Essa concordância pode ser expressa na forma binária (sim ou não) ou na forma multivalorada (por exemplo, numa escala de 0 a 10).

A partir dessas respostas, são calculadas as frequências relativas (no caso binário) ou a média dos graus de concordância (no caso multivalorado). É, então, construído um gráfico dos pontos assim obtidos, e ajustada uma função, estimando-se os parâmetros através dos mínimos quadrados, sendo essa função normalizada.

4.5 Raciocínio Difuso

A partir da Teoria dos Conjuntos Difusos desenvolvida por ZADEH (1965), vários outros autores têm discutido o raciocínio difuso e suas aplicações. Entre eles, pode-se citar: MANDANI (1977); MIZUMOTO e ZIMMERMANN (1982); MIZUMOTO (1985); KISZKA, KOCHANSKA e SLIWNSKA (1985), MIZUMOTO (1988) e YU, CAO e KANDEL (1990).

Raciocínio Difuso é entendido por DUBOIS e PRADE (1980) como o processo ou processos pelos quais uma conclusão, possivelmente imprecisa, é deduzida de uma coleção de premissas imprecisas. Tal raciocínio é, na maioria dos casos, antes qualitativo do que quantitativo por natureza, e quase sempre cai fora do domínio de aplicabilidade da lógica clássica.

As lógicas, como base para o raciocínio, podem ser distinguidas essencialmente por três itens:

- valores verdade;

- vocabulário (operadores), e
- processo de raciocínio.

Na lógica clássica, os valores verdade são "zero" ou "um", e o vocabulário é definido através desses valores verdade sob a forma de tabelas verdade.

A lógica difusa baseia-se nas lógicas multivaloradas, em que os valores verdade variam no intervalo $[0,1]$. ZADEH (1973) diz que a lógica difusa é uma extensão da lógica multivalorada, em que os valores verdade são variáveis linguísticas.

Os modelos de raciocínio difuso são considerados muito úteis na resolução de problemas práticos, como, por exemplo, na aplicação de controle operacional. O uso de um controlador lógico difuso, baseado em lógica difusa, fornece um meio para converter uma estratégia de controle linguístico, baseada em conhecimento de especialistas, em uma estratégia de controle automático.

Para incluir as ações do controle operacional de um sistema de lodos ativados em um sistema computacional, torna-se necessário um método de descrição da estratégia utilizada, ou seja, as descrições verbais devem passar para uma relação funcional, e esta deve representar o conhecimento do especialista.

4.6 Teoria dos Conjuntos Difusos Aplicada no Controle Operacional

São várias as publicações que testemunham a aplicabilidade da teoria dos conjuntos difusos, como por exemplo: DUBOIS e PRADE (1980); KANDEL (1982); ZIMERMANN (1985) e KANDEL (1986).

TONG, BECK e LATTEN (1980) examinam o comportamento de um algoritmo de controle difuso experimental para o controle operacional de uma estação de tratamento de esgotos. Nesse trabalho é examinada a viabilidade do modelo difuso em fornecer a difícil tarefa do controle operacional de um sistema de lodos ativados. É

verificado o comportamento de um algoritmo de controle difuso, que represente o controle operacional atual, concluindo que o mesmo pode ser uma forma prática para o controle operacional do processo de lodos ativados.

LAI e BETHOUX (1990) sugerem a utilização de regras difusas em seu modelo de controle de uma estação de tratamento, através de lodos ativados. O trabalho apresenta casos de estudo de um modelo para desenvolvimento e refinamento de regras de controle difuso, testando sua exatidão e eficiência. Os autores concluem que o sistema reproduziu de forma consistente as decisões do operador especialista.

4.7 Conclusão

A teoria dos conjuntos difusos fornece um instrumento adequado para modelar situações em que ocorram imprecisões ou incertezas.

Os sistemas de controle lógico difuso, baseados em raciocínio difuso, fornecem um meio de converter estratégias de controle linguístico em estratégias de controle automático.

O controle operacional de um sistema de lodos ativados apresenta características que dificultam o uso de métodos convencionais, devido à falta de dados quantitativos referentes às relações de entrada e saída. Por essa razão, é proposto um modelo apresentado no capítulo seguinte, baseado em controle lógico difuso.

5. MODELO PROPOSTO

5.1 Introdução

Lógica Difusa tem larga aplicabilidade, especialmente em áreas de controle e processo de tomada de decisão. Como já referido em capítulos anteriores, Lógica Difusa tem grande repercussão em situações nas quais uma modelagem matemática precisa se torna inviável (ou em alguns casos impossível), dada a imprecisão de termos envolvidos e a presença de informações incompletas.

Sistemas reais complexos contituem-se de inúmeras regras que impossibilitam ao agente humano agir sempre com a precisão requerida. Sistemas Especialistas têm sido desenvolvidos justamente para auxiliar em tarefas que demandariam tempo excessivo, como, por exemplo, elevado número de cálculos, avaliação de situações múltiplas, etc.

Neste capítulo, discute-se um Sistema Especialista, baseado em Lógica Difusa, para controle de Estações de Tratamento de Esgotos através de Lodos Ativados.

5.2 Descrição do Problema

As estações para tratamento de esgotos, através da utilização de processos de lodos ativados, representam uma solução clássica para o problema de tratamento de esgotos.

O controle operacional destas estações de tratamento, contudo, tem sido responsável por uma baixa eficiência no processo como um todo (vide cap. II).

O processo aqui modelado foi apresentado na figura 2.5.5.

O esgoto a ser tratado é despejado em um tanque de aeração com uma vazão Q , sujeita a flutuações (chuvas, períodos de pico, etc.). Neste tanque de aeração, é injetado ar (ou oxigênio puro), com a finalidade de possibilitar o crescimento de microorganismos que são responsáveis pela decomposição da matéria orgânica.

O esgoto, após submetido ao processo de oxigenação, é encaminhado a um tanque de clarificação. Deste segundo tanque, é liberado o efluente tratado (Q_T). Parte do lodo sedimentado é recirculado (Q_R), uma vez que este lodo contém microorganismos ativos. O restante do lodo (Q_W) é descartado do sistema, sofrendo tratamentos posteriores.

5.3 Organização de um Sistema Difuso para Lodos Ativados

O tratamento de esgotos, através de lodos ativados, não apresenta um modelo único e preciso que possibilite seu controle. Em geral, são utilizadas heurísticas e algoritmos de controle intuitivos, baseados na experiência do especialista humano. Estas heurísticas e algoritmos baseiam-se nos valores observados, e em relações funcionais que o operador pode descrever na forma : " SE...ENTÃO". A explicitação destas relações sob a forma de um modelo matemático tradicional é, na prática, inviável. As relações envolvem informações qualitativas e subjetivas cujo escopo pode ser formalizado através da Teoria de Conjuntos Difusos, especificamente Lógica Difusa.

O sistema aqui proposto incorpora o conhecimento subjetivo do especialista humano, através da introdução dos conceitos de raciocínio difuso, variáveis linguísticas e regras difusas de controle.

Esquemáticamente, o modelo proposto é da forma apresentada na figura

5.3.1

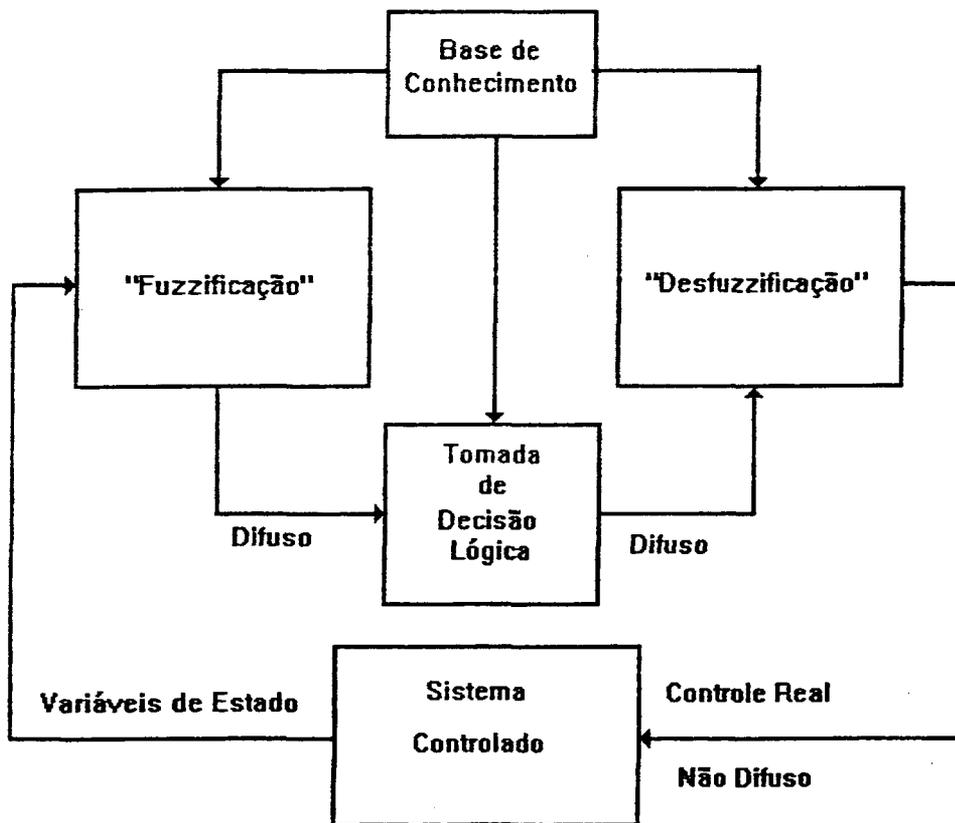


FIG. 5.3.1 Configuração Básica do Modelo Proposto
 FONTE: LEE, 1990

Neste modelo, destacam-se os mecanismos de "fuzzificação", "desfuzzificação" e inferência. Esses mecanismos atuam em conjunto com uma base de conhecimento, composta de regras de inferência difusas e de fatos difusos.

A seguir, cada um desses itens é descrito.

5.3.1 Base de Conhecimento

A base de conhecimento do modelo proposto é composta das regras de controle difuso e da base de dados e fatos.

As regras de controle difuso têm a forma de sentenças condicionais difusas que relacionam as variáveis linguísticas de estado com as variáveis linguísticas de controle.

Três variáveis são relevantes no processo: F/M , θ_c e IVL (ver Cap.2)

F/M - representa a razão entre alimento e biomassa

θ_c - representa a idade do lodo

IVL - representa o índice volumétrico de lodo (ou índice Mohlman)

Essas variáveis são monitoradas pelo operador e controladas através da vazão de recirculação (Q_R) e da quantidade de lodo descartado (Q_W).

O problema a ser modelado consiste, então, em controlar o processo de tratamento, tendo como variáveis de entrada F/M , θ_c e IVL, e variáveis de saída Q_R e Q_W . Essas variáveis resposta representam a atitude a ser tomada pelo operador, a fim de manter o processo sob controle.

Uma variável linguística, conforme definida por Zadeh (1975), é um sistema composto por $\langle L, T, X, G, M \rangle$, onde:

L - nome da variável

T - rótulos de um subconjunto difuso de um universo de discurso

X - universo de discurso

G - regras sintáticas que definem uma sentença completa em T

M - semânticas, que consistem de regras através das quais uma sentença em T pode ser determinada

No modelo proposto, todas as variáveis consideradas estão estruturadas sob a forma de variáveis linguísticas. Pode-se, por exemplo, definir a variável linguística de estado "F/M", da seguinte forma:

L - "F/M"

T - { mp; p; o; g; mg }

X - { (0 ; 0,2) }

$G - \{ \text{SE "F/M" está entre 0 e 0,02 ENTÃO } T(L) = mp;$
 $\text{SE "F/M" está entre 0 e 0,04 ENTÃO } T(L) = p;$
 $\text{SE "F/M" está entre 0,02 e 0,18 ENTÃO } T(L) = o;$
 $\text{SE "F/M" está entre 0,15 e 0,20 ENTÃO } T(L) = g;$
 $\text{SE "F/M" está entre 0,18 e 0,20 ENTÃO } T(L) = mg \}$
 $M - \{(x, \mu_{mp}(x)); (x, \mu_p(x)); (x, \mu_o(x)); (x, \mu_g(x)); (x, \mu_{mg}(x))\}$

As regras de decisão são construídas utilizando as variáveis linguísticas previamente definidas, relacionando valores das variáveis de estado com valores das variáveis de controle.

Supondo que mp=muito pequeno; p=pequeno; o=ótimo; g=grande e mg=muito grande, para as variáveis de estado, e, -a=menos alto; -m=menos médio; -b=menos baixo; b=baixo; m=médio e a=alto para as variáveis de controle, pode-se definir, por exemplo, o seguinte conjunto de regras:

SE F/M é "mp", θ_c é "mg" e IVL é "mp"
 ENTÃO ΔQ_W é "m" com grau 0,2 e é "a" com grau 0,8.

SE F/M é "g", θ_c é "mp" e IVL é "o"
 ENTÃO ΔQ_W é "-b" com grau 0,3 e é "-m" com grau 0,7.

SE F/M é "p", θ_c é "o" e IVL é "p"
 ENTÃO ΔQ_R é "-m" com grau 0,8 e é "-a" com grau 0,2.

SE F/M é "g", θ_c é "o" e IVL é "g"
 ENTÃO ΔQ_R é "b" com grau 0,1 e é "m" com grau 0,9

Na base de dados, são armazenadas as variáveis linguísticas. Para cada variável linguística, é definido o conjunto de rótulos(T), e as funções de pertinência de cada rótulo (M). As funções de pertinência são representadas de acordo com a definição de DOMBI(1990), possuindo uma parte crescente e uma decrescente, respectivamente equações (10) e (11). Assim, para cada uma, são armazenados 8 (oito) parâmetros.

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{v}{1-v}\right)^{-1} \left(\frac{b-x}{x-a}\right)} \quad (10)$$

$$\mu(x) = \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{v}{1-v}\right)^{\lambda-1} \left(\frac{x-a}{b-x}\right)^{\lambda}} \right) \quad (11)$$

onde:

v = ponto de inflexão;

λ = forma;

a = extremo inferior do intervalo;

b = extremo superior do intervalo;

5.3.2 Mecanismos de "Fuzzificação"

Os valores das variáveis de estado do sistema de controle são coletados junto ao sistema real e transformados em termos difusos das variáveis linguísticas correspondentes. Para tanto, são utilizadas as funções de pertinência de cada rótulo da variável correspondente. Assim, através deste processo, para cada valor real das variáveis de estado, são obtidas as pertinências dos valores linguísticos (exemplo: SE $F/M=0.16$, ENTÃO "F/M" é "o" com $\mu_o(0.16)= 0.65$ e é "g" com $\mu_g(0.16)= 0.35$).

Tendo sido processados todos os valores reais dos parâmetros de entrada, gera-se uma coleção de fatos difusos, a partir dos quais conclusões difusas

5.3.3 Mecanismo de Inferência

O modelo proposto neste trabalho é um sistema de controle difuso, caracterizado por um conjunto de sentenças linguísticas. A forma geral dessas sentenças é do tipo " SE...ENTÃO ".

Para a construção do Mecanismo de Inferência, os seguintes tópicos foram considerados:

- escolha das variáveis de Estado e de Controle do processo;
- descrição das regras;
- justificativa das regras de controle difuso;
- tipificação das regras de controle difuso;
- validação do conjunto de regras difusas.

A escolha das variáveis de Estado e de Controle do Processo, foi justificada através de especialistas, disponibilidade de obtenção de variáveis e abrangência das mesmas quanto ao desempenho do sistema.

Para a descrição das regras, foi considerada a experiência e ações de controle do operador do sistema tradicional.

A justificativa das regras de controle difuso, foi realizada basicamente de forma determinística. O modelo proposto permite determinar a estrutura linguística e os parâmetros utilizados nas regras de controle difuso, de modo a atingir os objetivos de controle e atender as restrições impostas pelo sistema real (LEE, 1990).

A tipificação das regras de controle difuso, foi feita mediante o uso de regras de controle difuso para avaliação de estados do sistema, sendo caracterizadas por uma coleção de regras do tipo:

R_1 : SE IVL é muito pequeno, θ_c é ótimo e F/M é muito pequeno
ENTÃO ΔQ_R é menos alto.

R_n : SE IVL é muito grande, θ_c é ótimo e F/M é muito grande
ENTÃO ΔQ_R é alto.

A validação do conjunto de regras difusas foi efetuada tendo como base o conhecimento de especialistas e de responsáveis pela operação de sistemas tradicionais.

O funcionamento do mecanismo de inferência foi adaptado do trabalho de CAO et al (1990). Desta forma, o grupo de sentenças condicionais difusas é traduzido em uma relação funcional que representa o conhecimento do especialista.

O processo pelo qual o grupo de sentenças condicionais difusas é transformado em uma representação de conhecimento difere dos processos tradicionais. No trabalho de CAO et al(1990), todas as sentenças são avaliadas simultaneamente para produzir um resultado do sistema. Em termos computacionais, tal procedimento pode representar economias substanciais de tempo. O mecanismo consiste na implementação do seguinte algoritmo:

1) Dado um conjunto de sentenças:

SE X_1 é A_{11}, \dots, X_n é A_{1n} ENTÃO Y é B_1
SE X_1 é A_{21}, \dots, X_n é A_{2n} ENTÃO Y é B_2

SE X_1 é A_{k1}, \dots, X_n é A_{kn} ENTÃO Y é B_k

Onde:

$A_{11}, \dots, A_{1n}; A_{21}, \dots, A_{2n}; \dots; A_{k1}, \dots, A_{kn}$ são descrições linguísticas das variáveis X_1, \dots, X_n , respectivamente.

B_1, B_2, \dots, B_k são subconjuntos difusos do conjunto de todas as "m" descrições linguísticas da variável Y.

Os valores $B_i, i = 1, \dots, k$ podem ser expressos por:

$$B_1 = b_{11}/Y_1 + b_{12}/Y_2 + \dots + b_{1m}/Y_m$$

$$B_2 = b_{21}/Y_1 + b_{22}/Y_2 + \dots + b_{2m}/Y_m$$

.....

$$B_k = b_{k1}/Y_1 + b_{k2}/Y_2 + \dots + b_{km}/Y_m$$

Define-se a matriz de relação (b_{ij})

Y_1	Y_2	Y_m
b_{11}	b_{21}	b_{1m}
b_{21}	b_{22}	b_{2m}
.
.
b_{k1}	b_{k2}	b_{km}

2) Dado um grupo de valores reais ($x_i = a_i$) das variáveis de estado, monta-se a matriz "A", onde:

(a_{ij}) representa o grau de pertinência dos valores "a_i" na descrição linguística de X_{ij} , obtidos pelo processo de "fuzzificação".

3) Determinar a, onde $a_i = \{\min_j(a_{ij})\}$

$$4) \text{ Calcular } a_i.(b_{ij}) = (a_1 \otimes b_{11} \oplus a_2 \otimes b_{21} \oplus \dots \oplus a_n \otimes b_{n1},$$

$$\dots \dots \dots$$

$$a_1 \otimes b_{1m} \oplus a_2 \otimes b_{2m} \oplus \dots \oplus a_n \otimes b_{nm})$$

Com: \otimes = multiplicação de reais

\oplus = operador máx {...}.

5) Como resultado do passo (4), obtém-se $a_i.(b_{ij}) = (f_1, \dots, f_m)$, onde f_j , representam os graus de pertinência dos rótulos da variável linguística de controle Y.

6) Aplicar ao conjunto (f_1, \dots, f_m) um processo de "desfuzzificação".

5.3.4 Processo de "Desfuzzificação"

O mecanismo de inferência utilizado fornece como resultados os graus de pertinência dos rótulos das variáveis linguísticas de controle. Portanto, é necessário determinar o valor real das respectivas variáveis de controle.

Para efetuar a "desfuzzificação" de valores, adotou-se o processo "desfuzzificação" baseado no centro de gravidade da distribuição de possibilidade (LEE, 1990). Esse método consiste das seguintes etapas:

a) Um ponto centróide sobre o eixo X é determinado para cada rótulo da variável linguística considerada.

b) As funções de pertinência são limitadas em altura pelo grau de pertinência do rótulo da variável linguística. A área da função de pertinência abaixo deste limite é avaliada.

c) As áreas obtidas são utilizadas como peso para cálculo da média dos centróides.

O valor obtido em (c) é, então, associado à variável que está sendo "desfuzzificada".

5.4 Conclusão

Neste capítulo, foi apresentado um modelo teórico para controle de operação de uma estação de tratamento de esgotos. São descritos os principais componentes do modelo, destacando-se a formação da base de conhecimento, os mecanismos de "fuzzificação", "desfuzzificação" e de inferência. É apresentado um algoritmo para transformar grupos de sentenças condicionais difusas em uma representação de conhecimento.

No próximo capítulo, é apresentada uma aplicação deste modelo na Estação de Tratamento de Esgotos da Centrais Elétricas de Santa Catarina - CELESC.

6. APLICAÇÃO PRÁTICA

6.1 Introdução

O processo de lodos ativados é amplamente utilizado em estações de tratamento de esgotos. Dada a complexidade operacional desse tipo de processo, desenvolveu-se, no capítulo anterior, um modelo, baseado nos princípios e conceitos da Lógica Difusa e da Inteligência Artificial.

Com a finalidade de testar o modelo desenvolvido, neste capítulo é apresentada uma aplicação prática, tendo como base a Estação de Tratamento de Esgotos Sanitários das Centrais Elétricas de Santa Catarina (CELESC), localizada no bairro de Itacorubi, município de Florianópolis, SC.

6.2 Descrição da Estação de Tratamento de Esgotos das Centrais Elétricas de Santa Catarina

A Estação de Tratamento de Esgotos da CELESC, um sistema de lodos ativados do tipo aeração estendida, é composta de um tanque de aeração e de uma unidade de decantação secundária.

O sistema foi projetado para tratar uma vazão de $13,06 \text{ m}^3/\text{h}$ ($3,62 \text{ l}/\text{seg}$). Essa vazão tem origem nos diversos usos, de acordo com a TABELA 6.2.1.

TABELA 6.2.1 Estimativa de Vazão Diária de Esgotos da CELESC

USO	QUANTIDADE	CONSUMO (l/seg)	VOLUME DIÁRIO (l/dia)
Funcionários	2000	50	100000
Restaurante	1200	25	30000
Auditório	200	2	400
Visitas	100	2	200
Total			130600

FONTE: ZETA ENGENHARIA E PLANEJAMENTO, 1986

Atualmente, a estação opera com uma vazão média de 1,5 l/seg, valor este obtido a partir de registros de medições realizadas no período de julho de 1991 a junho de 1992.

O esgoto chega à estação de tratamento por gravidade, passando por um medidor de vazão (calha Parshall) e um sistema de gradeamento (cesto), para remoção dos sólidos grosseiros, antes de entrar no tanque de aeração.

O tanque de aeração foi dimensionado com uma capacidade de 315,04 m³. A introdução de ar no tanque de aeração é feita com o auxílio de um soprador, com capacidade de 4,3 m³/min. Para a distribuição de ar no tanque de aeração, são utilizados domos difusores de bolhas finas. O sistema de aeração, além de manter o líquido misturado, deve proporcionar um nível de oxigênio entre 1,0 e 2,0 mg/l, sendo 1,5 mg/l o valor médio de projeto, para garantir um bom tratamento. Uma queda deste parâmetro poderá ter, como consequência, um efluente de má qualidade e, por outro lado, um excesso de oxigênio poderá acarretar um excesso de nitrificação e, conseqüentemente, problemas no decantador secundário. No modelo implementado, é considerado que o nível de oxigênio dissolvido no tanque de aeração é mantido na faixa recomendada.

Do tanque de aeração, o líquido misturado é encaminhado ao decantador secundário. O decantador, com uma capacidade total de 61,64 m³, foi projetado com uma taxa de escoamento superficial de 24 m³/m²dia.

Do decantador, o lodo será recirculado continuamente para o tanque de aeração, através de um sistema AIR LIFT. A vazão de recirculação (Q_R) pode ser ajustada, através de um registro, e medida pelo vertedor triangular existente.

O sistema permite que se faça a retirada do lodo em excesso (Q_W), a partir da mesma tubulação em que é feita a recirculação do lodo (Q_W). Outra alternativa pode ser a retirada do lodo diretamente, a partir do poço de lodo do decantador secundário, sendo, para isso, utilizada uma bomba submersível com uma vazão nominal de $3,28 \text{ m}^3/\text{h}$.

O excesso de lodo descartado é encaminhado a leitos de secagem, leitos esses construídos para redução de umidade do lodo.

6.3 Parametrização do Sistema

De acordo com o modelo proposto, tem-se como variáveis de estado: IVL - índice volumétrico do lodo; θ_c - idade do lodo; F/M - relação alimento/biomassa, e como variáveis de controle do processo: Q_W e Q_R , respectivamente, variação da vazão de descarte do lodo e variação da vazão de recirculação verificada na estação de tratamento.

Análises efetuadas junto a especialistas e operadores da Estação conduziram à definição de uma estrutura de variável linguística, comum às três variáveis de estado. Para cada uma delas, cinco valores linguísticos são considerados: muito pequeno (mp); pequeno (p); ótimo (o); grande (g) e muito grande (mg).

Nas figuras 6.3.1; 6.3.2 e 6.3.3, têm-se, respectivamente, as funções de pertinência das variáveis linguísticas "IVL", " θ_c " e "F/M"

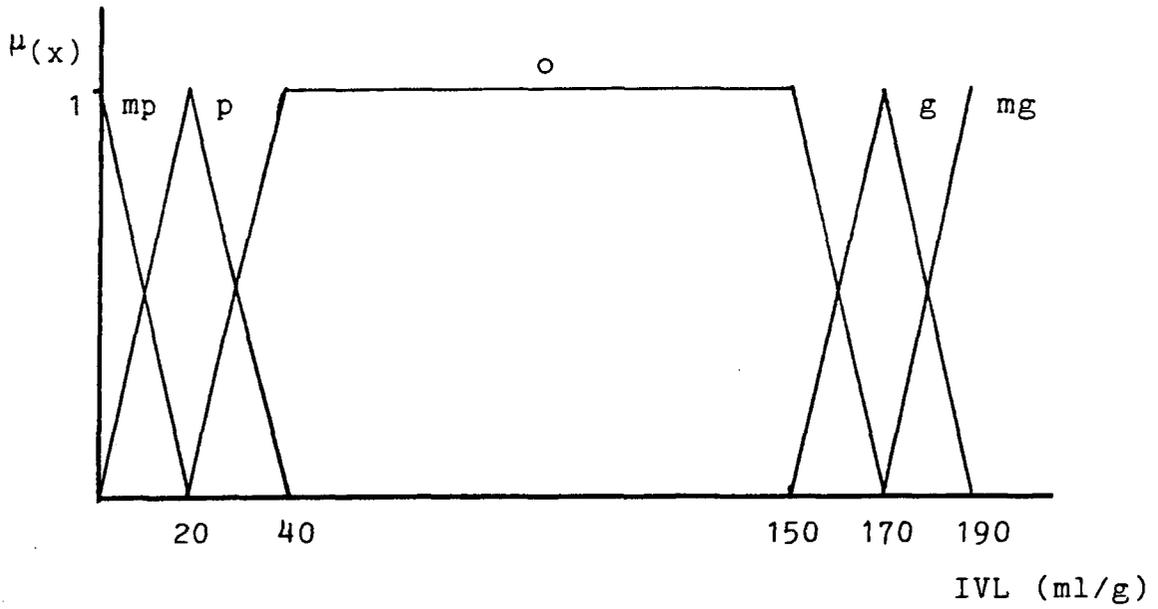


FIG. 6.3.1 Função de Pertinência do IVL

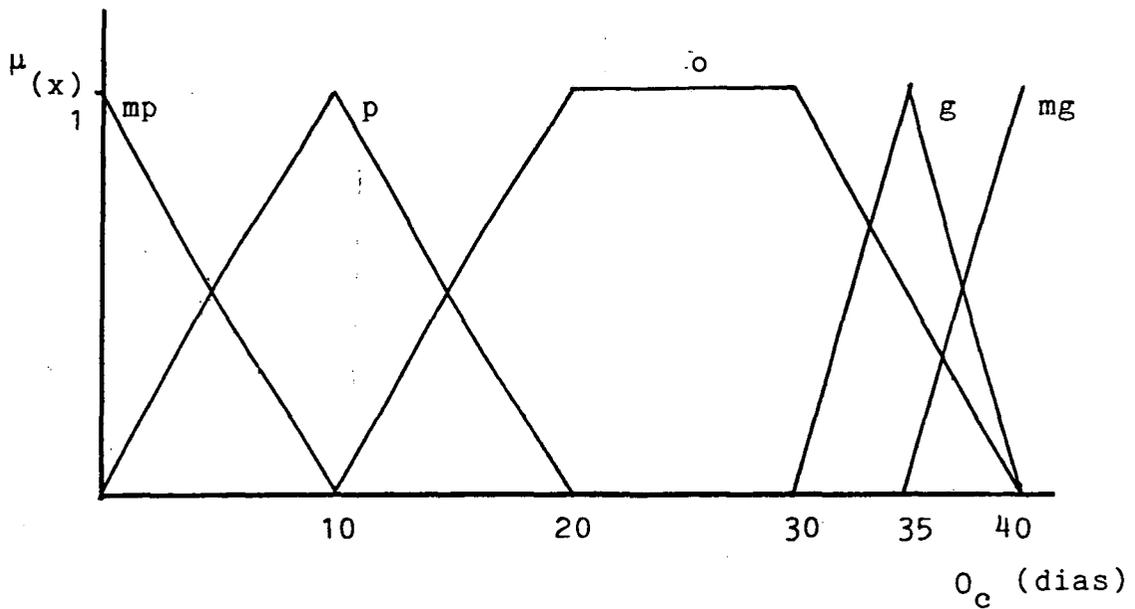


FIG. 6.3.2 Função de Pertinência de θ_c

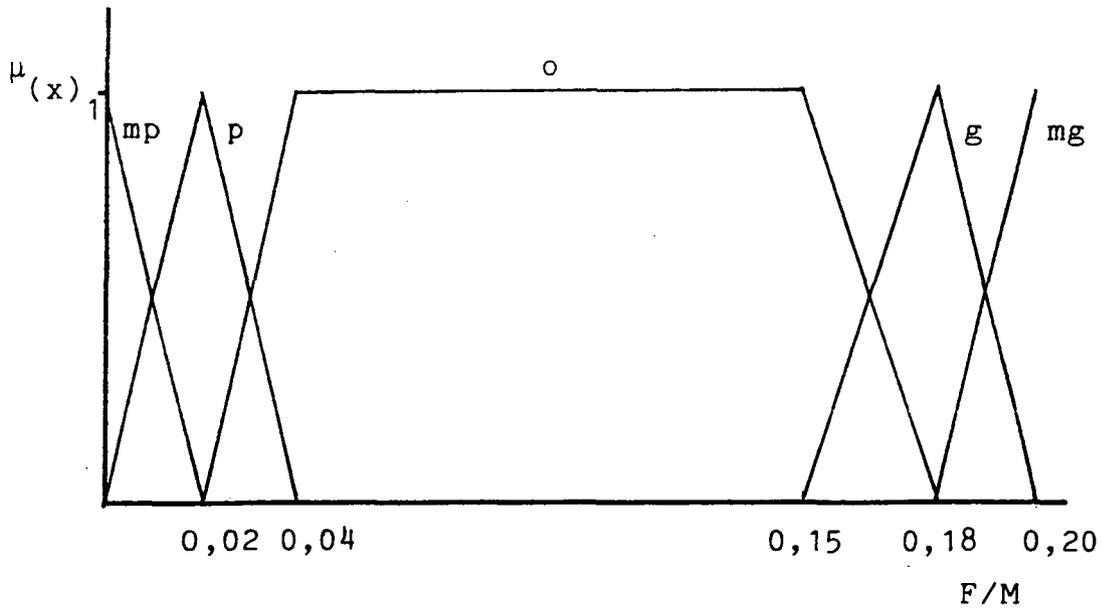


FIG. 6.3.3 Função de Pertinência de F/M

Com relação às variáveis de controle, Q_W e Q_R , foram utilizados seis valores linguísticos, sendo três para indicar o decréscimo a ser efetuado ($-b$ = menos baixo; $-m$ = menos médio e $-a$ = menos alto) e três para caracterizar aumentos nas vazões (b = baixo; m = médio e a = alto). As figuras 6.3.4 e 6.3.5 apresentam as funções de pertinência para as variáveis linguísticas ΔQ_W e ΔQ_R .

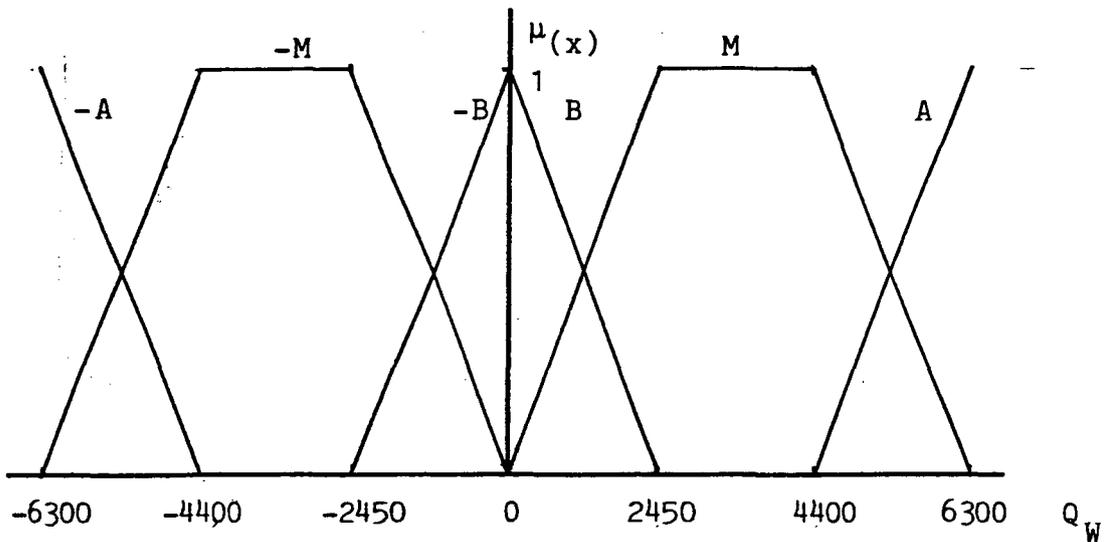


FIG. 6.3.4 Função de Pertinência de ΔQ_W

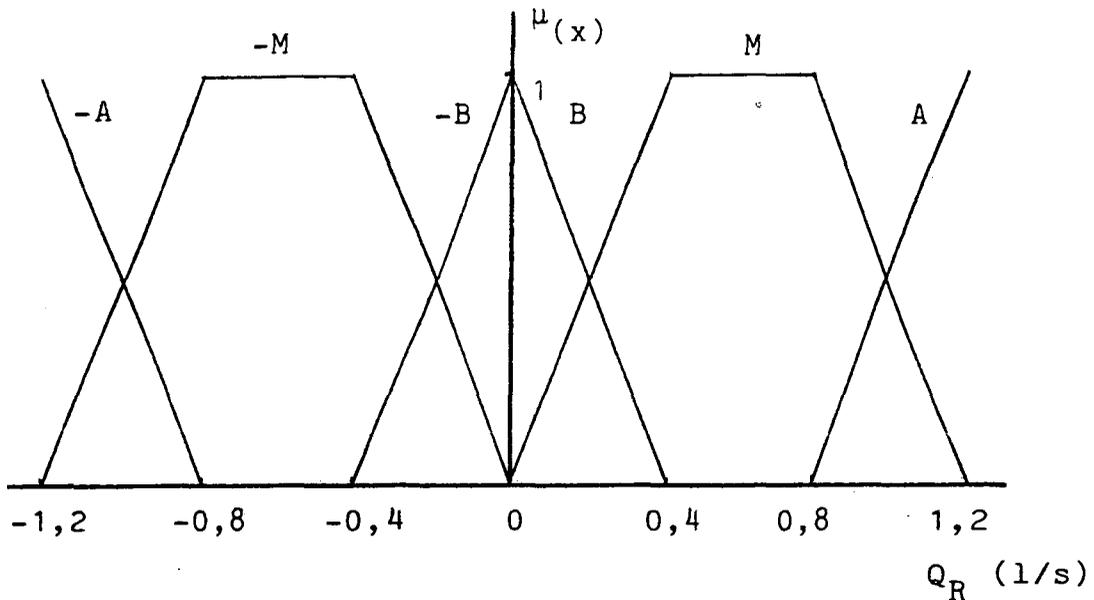


FIG. 6.3.5 Função de Pertinência de ΔQ_R

6.4 Base de Conhecimento

O conjunto de regras de controle difuso foi estabelecido, também, a partir de análises efetuadas em conjunto com operadores da estação e especialistas.

As regras foram consideradas de modo a obter a melhor solução de compromisso entre a base de conhecimento idealizada e o sistema real. Embora desse processo dependa o desempenho do sistema, deve-se considerar que o mecanismo de validação das regras de controle difuso deve ser permanente.

Teoricamente, o conjunto de regras de controle difuso deveria corresponder a 125 regras (5 valores linguísticos para 3 variáveis de estado). Entretanto, o conjunto utilizado nesta aplicação ficou limitado a 52 regras. A redução verificada é explicada pela existência de combinações de valores linguísticos que, na prática, são impossíveis de ocorrer (Por exemplo, $IVL = mp$; $\theta_c = mp$ e $F/M = mp$). Essas reduções são, também, comuns em outros trabalhos similares (TONG et al, 1980).

Após estabelecido o conjunto de regras, foi construída a matriz de relações b_{ij} (ver Mecanismo de Inferência, Cap. 5). Na TABELA 6.4.1, é apresentada parte da matriz b_{ij} , com os valores das respectivas variáveis de entrada.

TABELA 6.4.1 Matriz de Relações

Variáveis			Q_W						Q_R					
IVL	θ_c	F/M	-a	-m	-b	b	m	a	-a	-m	-b	b	m	a
mp	o	mp							0,5	0,5	0,0			
mp	o	p							0,2	0,8	0,0			
mp	o	o							0,0	0,8	0,2			
.	.	.												
.	.	.												
.	.	.												
.	.	.												
.	.	.												
.	.	.												
.	.	.												
.	.	.												
mg	o	mg										0,0	0,4	0,6

6.5 Implementação Computacional

Com a finalidade de operacionalizar a aplicação do modelo proposto, foi desenvolvido um conjunto de rotinas computacionais. Esse conjunto foi estruturado na forma de um sistema completo, conforme mostrado na figura 6.5.1.

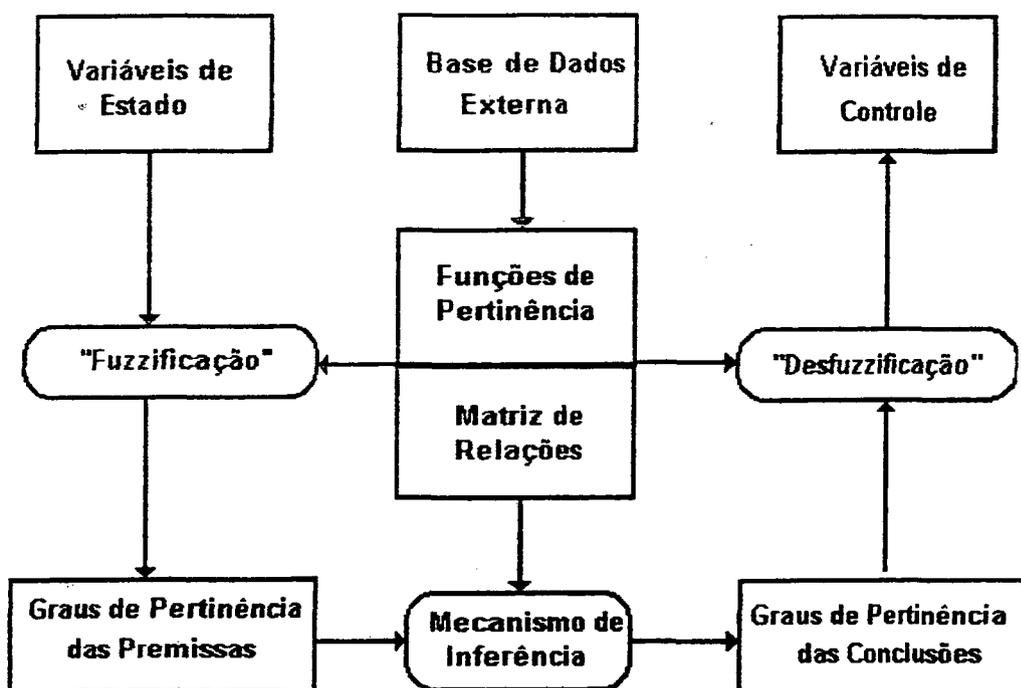


FIG. 6.5.1 Estrutura do Sistema Computacional

A organização do sistema separa a base de conhecimento das diferentes rotinas, permitindo uma fácil implementação a outras estações de tratamento similares, bastando, para tanto, a substituição das regras e funções de pertinência. Com a finalidade de fornecer ao sistema capacidade de processamento em diferentes plataformas, foi feita a programação em C++, linguagem com alto grau de portabilidade. O sistema inclui, ainda, um conjunto de rotinas projetadas especificamente para interfaces gráficas amigáveis, que permitem clara visualização das variáveis linguísticas de monitoração e controle.

A configuração mínima exigida, em termos de equipamento, é um microcomputador pessoal, do tipo XT, com 640 Kb de memória RAM, e monitor com placa gráfica.

6.6 Resultados Obtidos e Validação do Modelo

Um conjunto de estados, possíveis de ocorrerem na prática, foi idealizado com o intuito de testar a eficiência e eficácia do modelo proposto quanto à sua implementação computacional.

A tabela 6.6.1 apresenta o conjunto teste de situações reais idealizadas. Esse conjunto foi submetido à análise de especialistas, solicitando-se que indicassem as alterações Q_W e Q_R (A=Aumentar; P=Permanecer e D=Diminuir). As respostas foram, então, comparadas com as produzidas pelo sistema. As tabelas 6.6.2 e 6.6.3 mostram as Matrizes-Confusão (MAUSS e KEYES, 1991) para as respostas obtidas.

TABELA 6.6.1 Conjunto Teste de Situações Idealizadas

IVL	θ_c	F/M	IVL	θ_c	F/M
20	20	0,015	20	25	0,080
20	35	0,040	20	38	0,080
30	25	0,100	30	35	0,025
30	38	0,025	80	10	0,100
80	10	0,180	80	20	0,160
60	30	0,020	80	25	0,040
100	25	0,100	80	30	0,120
80	30	0,180	80	35	0,020
100	35	0,040	50	36	0,020
80	36	0,160	160	15	0,080
170	20	0,180	170	25	0,100
160	25	0,160	180	10	0,160
180	10	0,180	170	15	0,120
170	10	0,170	180	10	0,190
180	22	0,120	180	25	0,190

TABELA 6.6.2 Matriz-Confusão para QR

QR				
Respostas Especialistas		Respostas do Sistema		
		A	P	D
	A	n/a	0	0
P	19,04%	n/a	33,3%	
D	0	0	n/a	

TABELA 6.6.3 Matriz-Confusão para QW

QW				
Respostas Especialistas		Respostas do Sistema		
		A	P	D
	A	n/a	12,5%	0
P	7,69%	n/a	0	
D	0	11,1%	n/a	

Obs: n/a=não aplicável

Estas matrizes determinam similaridades entre as respostas produzidas manualmente por especialistas e as obtidas através do sistema proposto para controle. Para o nível de vazão de recirculação do lodo (TABELA 6.6.2), obtém-se um índice de acertos da ordem de 82.6%. Para descarte do lodo (TABELA 6.6.3), o índice de acertos é de 89.57%. Em termos globais, o índice médio de acertos do sistema é de 86.1%. Dada a complexidade envolvida em situações nas quais não devem ocorrer mudanças, o percentual de acertos foi considerado satisfatório.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

7.1 Conclusões

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema especialista para a operação de uma estação de tratamento de esgotos através do processo de lodos ativados.

Pelos resultados preliminares obtidos, constata-se a viabilidade de aplicação de lógica difusa e inteligência artificial para controle operacional de estações de tratamento de esgotos.

Uma das principais vantagens advindas da utilização das técnicas citadas anteriormente consiste em possibilitar o tratamento adequado de situações práticas, nas quais o conhecimento humano envolvido é vago, não completamente definido e, portanto, impossível de ser modelado através de técnicas tradicionais. Os procedimentos de inferência difusa, presentes no modelo desenvolvido, possibilitam uma melhor gestão da incerteza associada à operação de processo de tratamento de esgotos por lodos ativados.

O modelo desenvolvido, ao incorporar mecanismos de raciocínio difuso, permite aos operadores de estações de tratamento disporem de uma ferramenta de utilização simples e consistente para auxílio na realização de tarefas rotineiras.

Ferramentas de apoio à tomada de decisões, como sistemas especialistas, em geral apresentam uma estrutura complexa. Atividades de controle envolvem, normalmente, três características principais: análise, diagnóstico e prognóstico. No sistema desenvolvido, a complexidade é transparente ao usuário, o que, sem dúvida, constitui-se em uma vantagem.

Com relação à base de conhecimento, destaca-se o fato de a mesma ter sido implementada de uma forma independente, no programa computacional. Desse

modo, ajustes eventuais são executados rapidamente, permitindo-se constantes melhoramentos no desempenho global do modelo, bem como, tomando viável o seu uso em outras estações de tratamento de esgotos.

7.2 Recomendações para Futuras Pesquisas

Neste trabalho foram utilizados operadores difusos do tipo "Máx" e "multiplicação" de números reais como \oplus e \otimes . Outros operadores poderiam ser aplicados existindo, entretanto, a necessidade de avaliá-los.

Com relação às premissas, foi utilizado o operador "Min". O efeito derivado da aplicação de outros operadores é também uma questão em aberto.

Métodos de aprendizado poderiam ser incorporados ao modelo, de modo que ajustes necessários na matriz de relações e/ou funções de pertinência se tornassem automáticos.

Por fim, um problema relacionado com sistemas especialistas de forma geral é o da validação do sistema. Em que pese as diversas técnicas utilizadas, como por exemplo, verificação da adequação dos resultados do sistema aos seus objetivos, Máquinas de Turing, etc, muito ainda há que avançar neste tópico. O desenvolvimento de uma metodologia quantitativa para validar regras de controle difuso é uma das etapas.

8. BIBLIOGRAFIA

- ALEM SOBRINHO, P. Estudo dos Fatores que Influem no Desempenho do Processo de Lodos Ativados - Determinação dos Parâmetros de Projeto para Esgotos predominantemente Domésticos. Revista DAE. nº 132, 1983. p. 49-85.
- ARARIBÓIA, G. Inteligência Artificial. Um Curso Prático. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1988. 282 p.
- ABNT, P-NB-570. Elaboração de Projetos Hidráulico-Sanitários de Sistemas de Tratamento de Esgotos Sanitários. 1975.
- ABNT, NB-570. Projeto de Estações de Tratamento de Esgoto Sanitário. 1990.
- BARNES, D. e WILSON, F. The Design and Operation of Small Sewage Works. Londres, John Wiley & Sons, 1978. 180 p.
- BARR, A. e FEIGENBAUM, E.A. The Handbook of Artificial Intelligence. Reading, Addison-Wesley, 1986. 409 p.
- BERTHOUEX, P.M.; HUNTER, W.G.; PALLESEN, L.C. e SHIH, C. Modeling Sewage Treatment Plant Input BOD Data. Journal of the Environmental Engineering Division. v. 101, nº EE1, fev. 1975. p. 127-138.
- BERTHOUEX, P.M.; LAI, W. e DARKATMOKO, A. Statistics-Based Approach to Wastewater Treatment Plant Operations. Journal of Environmental Engineering. v. 115, nº 3, jun. 1989. p. 650-671.
- BODEN, M. Artificial Intelligence and Natural Man. Harvester Press, 1977. 537p.
- BRAAE, M e RUTHERFORD, D.A. Theoretical and Linguistic Aspects of the Fuzzy Logic Controller. Automatica. v. 15, 1979. p. 553-577.

- CAO, Z.; KANDEL, A. e LI, L. A. New Model of Fuzzy Reasoning. Fuzzy Sets and Systems, nº.30, 1990. p. 311-325.
- COHN, L.F.; HARRIS, R.A. e BOWLBY, W. Knowledge Acquisition for Domain Experts. Journal of Computing in Civil Engineering. v. 2, nº 2, abr. 1988. p. 107-120.
- COLLINS, A.G.; NIX, S.J.; TSAY, T.; GERA, A. e HOPKINS, M.A. The Potential for Expert Systems in Water Utility Operation and Management. Journal of American Water Works Association. set. 1990. p. 44-51.
- COLLINS, A.G.; SEARLEMAN, J. e COLLINS, K.J. Aspects of Intelligent Tutoring Systems Applied to Small Water Treatment Plant Expert Systems. 2nd International Conference on Systems Analysis in Water Quality Management and Clinic on Computer Simulation of Environmental Processes. Durham, junho 1991.
- DEGRÉMONT. Memento Technique de L'Eau. Paris, Imprimerie Hérissey, 1989. 2 v. 1459 p.
- DEVI, B.B. e SARMA, V.V.S. Estimation of Fuzzy Memberhips from Histograms. Information Sciences. nº 35, 1985. p. 43-59.
- DOMBI, J. Membership Function as an Evaluation. Fuzzy Sets and Systems. nº 35, 1990. p. 01-21.
- DUARTE, V.H. de A. Boletim - Um Sistema Especialista para Previsão de Tempo. São José dos Campos, INPE, 1987. 320 p.
- DUBOIS, D. e PRADE, H. Fuzzy Sets and Systems: Theory and Applications. New York, Academic Press, 1980. 393 p.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Process Control Manual for Aerobic Biological Wastewater Treatment Facilities. Washington, 1977.

- FARIA JÚNIOR, A.S. de. Estudos sobre o Tratamento de Águas Residuárias de Fecularias de Mandioca. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP. São Carlos, out. 1978. 125 p.
- FROST, R. Introduction to Knowledge Based Systems. New York, Macmillan Publishing Company, 1986. 677 p.
- GAUTHIER, F.O.; RODRIGUES FILHO, I.W. e BARCIA, R.M. Introdução à Inteligência Artificial. Apostila do Curso Introdução à Inteligência Artificial, editada pelo Núcleo de Tecnologia de Software Ltda. Florianópolis, out. 1989.
- GESELBRACHT, J.J e JOHNSTON, D.M. Issues in Rule-Based Development. Journal of Water Resources Planning and Management. v. 114, nº 4, 1988. p. 457-468.
- GESELBRACHT, J.J.; BRILL, E.D. e PFEFFER, J.T. Rule-Based Model of Design Judgement about Sludge Bulking. Journal of Environmental Engineering. v. 114, nº 1, fev. 1988. p. 54-73.
- GIULIANO, C.; LOGGIA, G.; NICOSIA, S. e VIVIANI, G. Sviluppo di un Sistema Esperto per la Gestione di un Impianto di Depurazione a Fanghi Attivi. Anais do Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1992. v. 2, p. 505-518.
- GRAY, N.F. Activated Sludge Theory and Practice. Oxford, Oxford University Press, 1990. 272 p.
- GUILLOM, M. e CROMMELYNCK, V. Les Applications de L'intelligence Artificielle à la Gestion des Réseaux de Distribution. Informatique et Eau. 86º année, nº 11, nov. 1991. p. 519-526.
- HEDUIT, A.; DUCHENE, P. e SINTES, L. Optimization of Nitrogen Removal in Small Activated Sludge Plants. Water Science and Technology. v. 22, nº 374, 1990. p. 123-130.

- HUANG, L. e TOMIZUCA, M. A Self-Paced Fuzzy Tracking Controller for Two-Dimensional Motion Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. v. 20, nº 5, set./out. 1990. p. 1115-1123.
- HUSHON, J.M. Expert Systems for Environmental Problems. Environmental Science & Technology. v. 21, nº 9, 1987. p. 838-841.
- IMHOFF, K. e IMHOFF, K.R. Manual de Tratamento de Águas Residuárias. São Paulo, Edgar Blucher, 1986. 301 p.
- KANDEL, A. Fuzzy Techniques in Pattern Recognition. New York, John Wiley, 1982.
- KANDEL, A. Fuzzy Mathematical Techniques with Applications. Reading, Addison-Wesley, 1986. 273 p.
- KEINATH, TM. Operational Dynamics and Control of secondary Clarifiers. Journal of Water Pollution Control Federation. v. 57, nº 7, jul. 1985. p. 770-776.
- KICKERT, W.J.M. e VAN NAUTA LEMKE, H.R. Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant. Automatica. v. 12, 1976. p. 301-308.
- KING, P.J. e MAMDANI, E.H. The Application of Fuzzy Control Systems to Industrial Processes. Automatica. v. 13, 1977. p. 235-242.
- KISZKA, J.B.; KOCHANSKA, M.E. e SLIWINSKA, D.S. The Influence of some Fuzzy Implication Operators on the Accuracy of a Fuzzy Model - Part I. Fuzzy Sets and Systems. nº 15, 1985. p. 111-128.
- KOSKINEN, K. Expert System as a Top Level Controller for Activated Sludge Process. Water Science and Technology. v. 21, 1989. p. 1809-1812.
- LAI, W. e BERTHOUEX, P.M. Testing Expert Systems for Activated Sludge Process Control. Journal of Environmental Engineering. v. 116, nº 5, set./out. 1990. p. 890-909.

- LAPOLLI, F.R.; LAPOLLI, E.M.; GAUTHIER, F.A.O. e BARCIA, R.M. Utilização de Técnicas de Inteligência Artificial e da Teoria dos Conjuntos Difusos no Controle Operacional de Estações de Tratamento de Esgotos. Anais do Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro, 1992. v. 2. p. 31-41.
- LEE, C.C. Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part II. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics. v. 20, nº 2, mar./abr. 1990. p. 419-432.
- LEE, Y.W.; BOGARDI, I. e STANSBURY, J. Fuzzy Decision Making in Dredged-Material Management. Journal of Environmental Engineering. v. 117, nº 5, set./out. 1991. p. 614-630.
- LESSARD, P. e BECK, M.B. Dynamic Modeling of Wastewater Treatment Processes. Environmental Science & Technology. v. 25, nº 1, 1991. p. 30-39.
- LEUNG, K.S. e LAM, W. Fuzzy Concepts in Expert Systems. IEEE Computer. set. 1988. p. 43-56.
- LEVINE, R.I.; DRANG, D.E. e EDELSON, B. Inteligência Artificial e Sistemas Especialistas: Aplicações e Exemplos Práticos. São Paulo, McGraw-Hill, 1988. 264 p.
- LIMA, W.C. e BARRETO, J.M. Inteligência Artificial. Ciência Hoje. v. 07, nº 38, dez. 1987. p.50-56.
- MALES, R.M.; COYLE, J.A.; BORCHERS, H.J.; HERTZ, B.G.; GRAYMAN, W.M. e CLARK, R.M. Expert Systems Show Promise for Customer Inquiries. Journal of American Water Works Association. fev. 1992. p. 42-49.
- MAMDANI, E.H. Applications of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. v. C-26, nº 12, dez. 1997. p. 1182-1191.

- MAUS, R. e KEYES, J. Handbook of Expert Systems in Manufacturing. New York, 1991. 561 p.
- METCALF & EDDY, INC. Wastewater Engineering: Treatment, Disposal, Reuse. New Delhi, Tata McGraw-Hill, 1979. 920 p.
- MIZUMOTO, M. Extended Fuzzy Reasoning. Approximate Reasoning in Expert Systems. North-Holland, 1985. p. 71-85.
- MIZUMOTO, M. Fuzzy Control under Various Fuzzy Reasoning Methods. Information Sciences. nº 45, 1988. p. 129-151.
- MIZUMOTO, M. e ZIMMERMANN, H.J. Comparison of Fuzzy Reasoning Methods. Fuzzy Sets and Systems. nº 8, 1982. p. 253-283.
- MORALES, A.B.T. Modelagem Linguística: Alternativa na Análise de Processos Complexos. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1992. 91 p.
- NETTO, J.M. de A. Tratamento de Águas Residuárias. Objetivos. Extensão do Tratamento. Classificação dos Processos Biológicos. Esquemas de Instalações Depuradoras. Sistemas de Esgotos Sanitários. São Paulo, CETESB, 1977. 467 p.
- NIX, S.J. e COLLINS, A.G. Expert Systems in Water Treatment Plant Operation. Journal of American Water Works Association. fev. 1991. p. 43-51.
- NIX, S.J.; COLLINS, A.G. e TSAY, T. Knowledge- Based Expert Systems in Water Utility Operation and Management. Denver, American Water Works Association, 1989. 137 p.
- ORTOLANO, L.; COEUR, G.L. e MACGILCHRIST, R. Expert System for Sewer Network Maintenance: Validation Issues. Journal of Computing in Civil Engineering. v. 4, nº 1, jan. 1990. p. 37-54.

- ORTOLANO, L. e PERMAN, C.D. Systems Expert: Applications to Urban Planning. Springer-Verlag, 1990. 268 p.
- ORTOLANO, L. e STEINEMANN, C. New Expert Systems in Environmental Engineering. Journal of Computing in Civil Engineering. v. 1, nº 4, out. 1987. p. 298-302.
- OWEN, T. Expert Systems: The Key Facts for Decision Makers. Cranfield, Cranfield Press, 1987.
- PACHECO, R.C.S. Tratamento de Imprecisão em Sistemas Especialistas. Dissertação de Mestrado. Unviersidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1991. 272 p.
- QASIM, S.R. Wastewater Treatment Plants. Planning, Design and Operation. New York, CBS College Publishing, 1985. 726 p.
- RAMALHO, R.S. Introduction to Wastewater Treatment Processes. New York, Academic Press, 1977. 409 p.
- RICH, E. Artificial Intelligence. New York, McGraw-Hill, 1988. 436 p.
- ROSSMAN, L.A. e SILLER, T.J. Expert Systems in Environmental Engineering. Expert Systems for Civil Engineers. Editor: Mary L. Maher. American Society of Civil Engineering, 1987.
- SANT'ANNA, F.S.P. Tratamento de Águas Residuárias da Industrialização de Frutos Cítricos pelo Processo de Lodos Ativados. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 1982.
- SPERLING, M.V. e LUMBERS, J.P. Optimization of the Operation of the Oxidation Ditch Process Incorporating a Dynamic Model. Water Science and Technology. v. 24, nº 6, 1991. p. 225-233.

- SPERLING, M.V. e LUMBERS, J.P. Operational Rules for the Optimal Management of the Oxidation Ditch Process for Wastewater Treatment. Proceedings of the European Conference Advances in Water Resources Technology. Atenas, 1991. p. 387-395.
- TAKAGI, T. e SUGENO, M. Fuzzy Identification of Systems and its Applications to Modeling and Control. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. v. SMC-15, nº 1, jan./fev. 1985. p. 116-132.
- TAKAHASHI, M. The Operation and Maintenance of Small Scale Wastewater Treatment Plants. Water Science and Technology. v. 18, 1986. p. 313-318.
- TONG, R.M. A Control Engineering Review of Fuzzy Systems. Automatica. v. 13, 1977. p. 559-569.
- TONG, R.M.; BECK, M.B. e LATTEN, A. Fuzzy Control of the Activated Sludge Wastewater Treatment Process. Automatica. v. 16, 1980. p. 695-701.
- WATERMAN, D.A. A Guide to Expert Systems. Reading, Addison- Wesley, 1986. 418 p.
- YAGER, R.R. Approximate Reasoning as a Basis for Rule-Based Systems. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. v. SMC-14, nº 4, jul./ago. 1984. p. 636-643.
- YAGISHITA, O.; ITOH, O e SUGENO, M. Application of Fuzzy Reasoning to the Water Purification Process. Industrial Applications of Fuzzy Control. Editor: Michio Sugeno. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1985. 269 p.
- YAMASAKI, T. e SUGENO, M. A Microprocessor Based Fuzzy Controller for Industrial Puposés. Industrial Applications of Fuzzy Control. Editor: Michio Sugeno. Amsterdam, Elsevier Science Publishers, 1985. 269 p.

YU, C.; CAO, Z. e KANDEL, A. Application of Fuzzy Reasoning to the Control of an Activated Sludge Plant. Fuzzy Sets and Systems. nº 38, 1990. p. 01-14.

ZADEH, L. Fuzzy Sets. Information and Control. v. 8, nº 3, 1965. p. 338-353.

ZADEH, L. Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. v. SMC-3, nº 1, jan. 1973. p. 28-44.

ZADEH, L. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - Part I. Information Sciences. nº 8, 1975. p. 199-249.

ZADEH, L. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - Part II. Information Sciences. nº 8, 1975. p. 301-357.

ZADEH, L. The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning - Part III. Information Sciences. nº 9, 1975. p. 43-80.

ZETA ENGENHARIA E PLANEJAMENTO Projeto Hidro-Sanitário - Sistema de Lodo Ativo, 1986.

ZIMMERMANN, H.J. Fuzzy Set Theory and its Applications. Boston, Kluwer-Nighoff, 1985. 363 p.

ZIMMERMANN, H.J. e ZYSNO, P. Quantifying Vagueness in Decision Models. European Journal of Operational Research. nº 22, 1985. p. 148-158.