



Suellyn Siqueira de Souza

**ELABORAÇÃO DE UM MODELO  
MATEMÁTICO PARA O ESTUDO DO  
COMPORTAMENTO DE EFLUENTES  
ORIGINADOS DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

Instituto de Tecnologia  
Mestrado Profissional em Processos Construtivos  
e Saneamento Urbano

Dissertação orientada pelo Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves

Belém – PA

2015



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
MESTRADO EM PROCESSOS CONSTRUTIVOS E SANEAMENTO URBANO**

**MESTRADO EM PROCESSOS CONSTRUTIVOS E SANEAMENTO URBANO**

**ELABORAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA O  
ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE EFLUENTES  
ORIGINADOS DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

**Suellyn Siqueira de Souza**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano da Universidade Federal do Pará como requisito para a obtenção do grau de Mestre.

**Orientador: Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves**

Belém – PA  
2015

# **ELABORAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA O ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE EFLUENTES ORIGINADOS DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

**SUELLYN SIQUEIRA DE SOUZA**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Processos Construtivos e Saneamento Urbano, área de concentração: Saneamento Urbano, *de acordo com o Regimento do PPCS*, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Mestrado Profissional em Processos Construtivos e Saneamento Urbano (PPCS) do Instituto de Tecnologia (ITEC) da Universidade Federal do Pará (UFPA).

Aprovada em 22 de Julho de 2015.

---

Prof. Dr. Dênio Ramam Carvalho de Oliveira  
(Coordenador do PPCS)

---

Prof. Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves  
(Orientador – UFPA)

## **COMISSÃO EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. João Augusto Pereira Neto  
(Examinador Externo – UFPA)

---

Prof. Dr. Ronaldo Lopez Rodrigues Mendes  
(Examinador Interno – UFPA)

A Deus, toda minha gratidão pelo seu amor e cuidado.

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus pais, pelo apoio e incentivo.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor Dr. Rui Guilherme Cavaleiro de Macedo Alves, pela orientação, competência e dedicação na realização das orientações.

Aos professores da Universidade Estadual do Amazonas - UEA, Dr. Francisco Beraldo Herrera Fernández, Dr. Luiz Beltrán Ramos Sanchez, MSc. João Evangelista Neto, Dr<sup>a</sup> Marlene Araújo de Faria, pelo auxílio, parceria e colaboração no desenvolvimento do trabalho.

Ao professor Dr. Ronaldo Lopez Rodrigues Mendes

Ao professor Dr. Dênio Raman Carvalho de Oliveira

Aos colaboradores do ITEGAM pelo apoio

## RESUMO

O objetivo do trabalho foi desenvolver um modelo matemático para que fosse possível obter previsões sobre o comportamento futuros dos efluentes tratados originados da indústria de processamento de petróleo. Para a elaboração do modelo matemático foi necessário à divisão de todo o sistema de tratamento de efluentes em subprocessos e para cada um foi elaborado um submodelo, que no final foram integrados originando um modelo geral, sendo possível assim prever o comportamento da unidade de efluente conforme esperado. O desenvolvimento do modelo geral foi composto por algumas etapas, na primeira etapa foi necessária a definição das variáveis de saída e entrada do sistema de tratamento, tendo conhecimento dessas variáveis foi definido os submodelos através de equações dinâmicas gerais (equações de balanço), a etapa posterior foi a aquisição de dados do processo para estimativa e desenvolvimento dos submodelos utilizando a técnica de identificação difusa (fuzzy identification), em seguida foi realizada a integração dos submodelos dando origem ao modelo geral híbrido utilizando o método de modelagem chamado neurofuzzy, utilizado para o desenvolvimento de modelos Fuzzy do tipo Takagi-Sugeno-Kang (TSK), com a finalização desta fase foram feitas simulações com os modelos obtidos utilizando dados reais do processo para a comprovação dos resultados, constatando a possibilidade da realização de simulações do comportamento do efluentes em condições críticas que pudessem oferecer risco de distúrbios operacionais prejudicando o controle dos limites de poluentes estipulados por entidades ambientais, contribuindo assim para a conservação ambiental.

**Palavras - chave:** Tratamento de efluentes, modelagem matemática, meio ambiente.

## ABSTRACT

The objective of this work was to develop a mathematical model for it to be possible to obtain predictions about the future behavior of the treated effluents originated from the processing industry of petroleum. For the formulation of the mathematical model was necessary to the division of the entire effluent treatment system into sub processes and for each one was drawn up sub models, which in the end were integrated causing a general model, it is possible that predict the behavior of the unit of effluent as expected. The development of general model was composed of a few steps, the first step was necessary to define the input and output variables of the treatment system, being aware of these variables has been defined the sub-models through general dynamic equations (balance equations), the subsequent step was the acquisition of data for estimation of the process and development of sub models using fuzzy identification technique (fuzzy identification) then was carried out the integration of the sub models give the general model using the hybrid modeling method called neuro, used for the development of models of the Fuzzy Takagi-Sugeno-Kang (TSK), with the completion of this phase simulations were performed with the obtained models using real process data for verification of the results, noting the possibility of carrying out waste behavior simulations in critical condition that could present a risk of operational disorders impairing control of limits pollutants stipulated by environmental entities, thereby contributing to environmental conservation.

**Key - words:** Effluent treatment, mathematical modeling, environment .



# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Descrição dos Efluentes e Instalações Analisadas .....</b>	<b>4</b>
1.1.1. Origem do Efluente.....	4
1.1.2. Descrição das Etapas do Tratamento.....	7
<b>2. ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DOS SUBMODELOS E MODELO GERAL.....</b>	<b>12</b>
2.1. Análise e estrutura dos modelos.....	14
2.2. Definição dos submodelos através de equações dinâmicas .....	15
2.3. Estimativa do comportamento dos subprocessos .....	16
2.4. Aquisição dos dados .....	17
2.5. Desenvolvimento dos submodelos .....	17
2.6. Integração dos submodelos .....	18
<b>3. APLICAÇÃO DO MÉTODO NEUROFUZZY PARA OBTENÇÃO DO MODELO GERAL DE SIMULAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
<b>4. RESULTADOS.....</b>	<b>24</b>
4.1. Simulação dos submodelos.....	24
4.2. Estrutura e Simulação do modelo inteligente .....	32
<b>5. COMPROVAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS .....</b>	<b>36</b>
<b>6. CONCLUSÕES .....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>46</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>54</b>
<b>Anexo 1 – Abreviaturas.....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Operações funcionais básicas em uma ETE.....	7
Figura 1.2- Esquema geral da unidade de tratamento de efluentes .....	8
Figura 2.1–Etapas para o desenvolvimento do modelo híbrido .....	12
Figura 2.2– Esquema geral do processo de desenvolvimento do modelo matemático .....	13
Figura 2.3 – Variáveis de entrada e saída.....	14
Figura 2.4 –Etapa de estrutura geral do modelo dinâmico.....	15
Figura 2.5 –Etapa de desenvolvimento dos submodelos.....	16
Figura 4.1- Dinâmica dos níveis das águas no sistema de recepção de água oleosa e contaminada.....	28
Figura 4.2 - Dinâmica dos níveis das águas no sistema de recepção de água oleosa e contaminada.....	29
Figura 4.3 - Dinâmica do nitrogênio amoniacal no sistema de recepção das águas oleosas e contaminadas .....	30
Figura 4.4 - Configuração do modelo ANFIS com duas entradas x e y e uma saída f. ....	33
Figura 4.5 - Programa de simulação do subsistema de separação água-óleo.....	36
Figura 5.1 - Auto-correlação e correlação cruzada entre algumas das variáveis .....	39
Figura 5.2 - Relação das principais correlações encontradas.....	39
Figura 5.3 - Dados de treinamento e validação do modelo obtido.....	40
Figura 5.4 - Dados de treinamento e validação do modelo (t515).....	40
Figura 5.5 - Dados de treinamento e validação do modelo (f515).....	41
Figura 5.6 - Dados de treinamento e validação do modelo (f616).....	41
Figura 5.7 - Dados de treinamento e validação do modelo (f717).....	42
Figura 5.8 - Resumo dos modelos obtidos .....	44

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Informação das correntes de alimentação de água oleosa.....	24
Tabela 4.2 - Condições iniciais na caixa e na bacia de água oleosa. ....	25
Tabela 4.3 - Parâmetros característicos da caixa e da bacia de água oleosa. ....	25
Tabela 4.4 - Parâmetros das distribuições de probabilidade normais das variáveis de entrada no sistema .....	26
Tabela 4.5 - Condições iniciais na caixa e na bacia de água oleosa. ....	27
Tabela 4.6 - Condições iniciais na bacia de água contaminada .....	27
Tabela 4.7 - Valores dos pontos de operação dos componentes químicos, pH e vazões .....	32

## 1. INTRODUÇÃO

Em todo o planeta grandes quantidades de águas residuais são produzidas e descartadas diariamente durante o processo de produção e beneficiamento industrial. Estas águas possuem alto nível de poluentes orgânicos e inorgânicos, dependendo do tipo de matéria-prima que foi processado e de outros vários fatores considerados relevantes, essas águas residuais devem ser processadas nas estações de tratamento de efluentes antes de serem descartadas nos rios, lagos e oceanos. Sabe-se que as estações de tratamento de efluentes são sistemas complexos, devido ao efeito combinado das mudanças das características do afluente (LIMA, 1996).

Para o descarte dos efluentes industriais nos corpos hídricos é necessário que haja o controle dos poluentes, esse controle deve ocorrer durante e após o tratamento, os limites permitidos para descarte são determinados por resoluções ambientais específicas, com objetivo de preservar a qualidade das águas e as populações de seres vivos que vivem nesses ambientes.

A composição e o volume dos efluentes que são enviados para tratamento podem gerar impactos sobre todo o processo de tratamento, altos volumes podem ocasionar o transbordo de efluente para o sistema pluvial, sendo enviado para o corpo hídrico indevidamente sem passar pelas etapas de tratamento que garantem a qualidade necessária para o descarte, além disso, a eficiência do tratamento pode ser comprometida, assim como baixos volumes de efluentes recebidos na estação de tratamento de efluentes também podem ser prejudiciais para o processo, pois a concentração de contaminantes pode se tornar maior pela baixa capacidade de diluição desses contaminantes oriundos do processo industrial, aumentando a dificuldade de remoção.

Diante deste cenário surge a necessidade de implantar melhorias para o atendimento das exigências legais impostas para o descarte de efluentes. A automatização de ferramentas que possam auxiliar na prevenção das ocorrências de extrapolação dos limites estipulados para o descarte de efluente, através da proposta da possibilidade de obtenção de um modelo computacional que possibilite a previsão do comportamento futuro do efluente proporcionando maior confiabilidade aos sistemas de tratamento de efluentes e permitindo a realização de ajustes operacionais com maior antecedência evitando o não atendimento dos limites legais para o descarte de efluente. Para isto, é necessário que a predição desse comportamento seja realizada por meio de programas computacionais de simulação com o objetivo de obter modelos mais fiéis

possíveis na descrição do comportamento de todas as variáveis envolvidas no processo de tratamento do efluente, considerando as características do efluente.

Devido sua confiabilidade os modelos de simulação estão sendo cada vez mais utilizados como ferramentas para aperfeiçoar o projeto de operação de estações de tratamento para a melhoria da qualidade dos efluentes e do meio ambiente, sendo possível através da evolução acelerada de softwares simuladores de processos industriais (NOLASCO e HELOU, 1998).

A predição do comportamento de variáveis e parâmetros industriais é uma necessidade crescente, dado o constante aumento dos volumes de produção, aumento da complexidade dos processos industriais e o maior rigor técnico para cumprir com as disposições e regulamentos legais destinados à proteção do meio ambiente que estão cada vez mais exigentes.

O trabalho tem como objetivo geral elaborar um modelo matemático que torne possível o estudo e a previsão do comportamento de efluente gerado pela indústria de refino de petróleo, levando em consideração a influência do recebimento de grandes volumes de carga de poluentes, estando suscetíveis a grandes variações. Como objetivos específicos são apresentados: (a) Análise do comportamento do efluente estudado, considerando suas características que apresentam maior criticidade. (b) Coleta de dados referente aos parâmetros considerados relevantes para o desenvolvimento do modelo matemático e que são controlados no processo de tratamento de efluentes. (c) Elaboração de submodelos necessários para o auxílio na obtenção de um modelo geral que realize simulações diagnosticando diferentes condições do processo que se realiza na ETE.

A modelagem para otimização ou simulação de processos precisa de modelos que possam descrever suas principais características dinâmicas, para o desenvolvimento do modelo é necessário a análise dessas características. Processos complexos tais como os de tratamento de efluentes apresentam dificuldades na obtenção de um modelo simples e efetivo, por outro lado o sucesso dos métodos de modelagem baseados apenas em ferramentas da modelagem usando dados que apresentam limitações, pois não é possível tecnologicamente obter todas as medições necessárias das variáveis e parâmetros implicados, entretanto, os modelos fenomenológicos além de precisar de muito tempo de desenvolvimento nunca têm toda a abrangência que se precisa, pelas limitações no estabelecimento das equações de balanço de massa e energia, nesse caso o desenvolvimento de modelos híbridos é uma solução alternativa (ROFFEL, 2006).

O entendimento do princípio de operação e equações das leis do processo, está baseado em seus conceitos mecânicos, químicos e físicos, tais como equações gerais de balanço e de equilíbrio, complementadas com equações adicionais que descrevem as transformações de massa e transferências. Além disso, as medições realizadas diretamente no processo são as fontes de informações mais importantes para a construção de um modelo em particular, ou seja, é realizada uma modelagem fenomenológica geral, para obtenção de um modelo geral, porém os resultados obtidos garantirão a obtenção de um modelo específico com as características do processo observado (ROFFEL, 2006).

O modelo fenomenológico obtido permite sua aplicação na simulação do comportamento do efluente de outras estações de tratamento que tenham características semelhantes, mas a diferença dos valores dos dados utilizados na construção do modelo pode gerar dificuldades para aplicação em outro sistema semelhante, geralmente não é possível fazer as mesmas medições em processos similares, por disponibilidade de sistemas e instrumentos de medição (HERRERA *et.al*, 2011).

Para a obtenção do modelo matemático é necessário simular o comportamento do efluente analisado, foram utilizados modelos híbridos considerando as condições de operações específicas, informações disponíveis e algumas características fundamentais para aplicação da modelagem híbrida (HERRERA *et.al*, 2011).

É possível decompor o processo em duas grandes partes em relação ao tratamento dos efluentes: tratamento primário e tratamento biológico. O tratamento primário é realizado em diferentes instalações tecnológicas em forma sequencial já o tratamento biológico é realizado em lagoas de decomposição de matéria orgânica. Isso significa a possibilidade de decompor o processo em vários subprocessos e a possibilidade de modelar cada um deles independente, ou seja, encontrar um modelo matemático para cada etapa do tratamento de efluentes (HERRERA *et.al*, 2011).

Trabalhar com submodelos por cada etapa do tratamento, pode permitir a melhor visualização das características do modelo geral e ajuda a melhor compreensão dos resultados da simulação. Além disso, na obtenção de modelos mais simples é mais fácil usar e avaliar as ferramentas de projeto empregadas no desenvolvimento do modelo híbrido (HERRERA *et.al*, 2011).

## **1.1. Descrição dos Efluentes e Instalações Analisadas**

### **1.1.1. Origem do Efluente**

Para o desenvolvimento deste modelo matemático foram analisadas as características do efluente gerado pela indústria de processamento de petróleo, nestes efluentes é comum a presença dos seguintes poluentes: fenóis, sulfetos, amônia, óleo e graxa.

Na Estação de Tratamento de Efluentes desse tipo de indústria, são recebidos efluentes que possuem diversas origens e composição química, podem ser águas pluviais (águas de chuvas, águas oriundas de drenagens sem contaminação aparente), águas de processo e de drenagens que podem ser apenas contaminadas ou ser oleosas, além da contribuição dos efluentes do sistema de refrigeração (MARIANO, 2001).

As águas contaminadas coletadas a céu aberto são intermitentes e são compostas por constituintes dos eventuais derramamentos para as superfícies, dos vazamentos dos equipamentos, além de quaisquer materiais que possam ser coletados pelos drenos e canaletas do sistema de drenagem, essas águas também incluem as águas pluviais das áreas de produção (MARIANO, 2001).

Grande parte da água utilizada na indústria do refino de petróleo é usada para resfriamento. A princípio, a água de refrigeração não entra em contato direto com as correntes de óleo, e, portanto, possuem menos contaminantes do que a água de processo. A maior parte da água de refrigeração é reciclada indefinidamente, ou então é enviada para uma unidade de tratamento de efluentes, a fim de que se controle o volume do efluente enviado para a ETE (MARIANO, 2001).

A água usada para resfriamento frequentemente contém aditivos químicos tais como cromatos, fosfatos e biocidas, que têm como função evitar a corrosão dos canos e o crescimento biológico. Por razões ambientais, muitos empreendimentos não usam mais o cromato para esses fins. Apesar do fato de que, normalmente, a água de refrigeração não entra em contato direto com as correntes de óleo dos diversos processos, pode haver alguma contaminação de óleo proveniente de eventuais vazamentos nos equipamentos (MARIANO, 2001).

A água usada nas diversas operações de processamento também contribui significativamente para a geração de efluentes. Tais efluentes são gerados nos processos de dessalinização do óleo cru, retificação com vapor, purga das caldeiras, etc. As águas de processo frequentemente entram em contato direto com o óleo das correntes de processo, sendo, por esse motivo, normalmente muito contaminadas (MARIANO, 2001).

Segundo Mariano (2001), os tipos de efluentes envolvidos nesse processo industrial são classificados de acordo com suas características, com a finalidade de proporcionar maior efetividade ao seu tratamento, assim são classificados em:

- Águas contaminadas (coletadas a céu aberto);
- Águas de refrigeração;
- Águas de processo;
- Efluentes sanitários.

Em uma estação de tratamento de despejo industrial, geralmente são tratadas somente as três primeiras (água contaminada, água de refrigeração e água de processo). O direcionamento dos efluentes para a ETE é realizado através de duas redes de coleta e veiculação conhecidas como sistema de águas oleosas e sistema de águas contaminadas (MARIANO, 2001). As correntes de efluentes que são direcionadas para o recebimento de tratamento na unidade de tratamento estão definidas abaixo:

- Águas contaminadas - correntes aquosas caracterizadas pela eventual presença de hidrocarbonetos, podendo conter sólidos suspensos e dissolvidos e/ou outros contaminantes em concentrações tais que impossibilitem o seu lançamento direto no corpo receptor.
- Águas oleosas - correntes aquosas caracterizadas pela presença constante de hidrocarbonetos, podendo conter sólidos suspensos e dissolvidos e/ou outros contaminantes.

Todas as operações funcionais realizadas na unidade de tratamento de efluentes com estes dois tipos de águas têm como objetivo o seu tratamento para fornecer a água tratada com baixos níveis de contaminantes.

As refinarias de petróleo normalmente utilizam dois tipos de tratamento: primário e secundário. O tratamento primário possui o objetivo de separação do óleo, água e sólidos em dois estágios. O primeiro estágio é composto por um separador API ou outro tipo de separador de água e óleo. O efluente se move vagarosamente através do separador, permitindo que o óleo fique livre e sobrenadante, possibilitando assim a remoção (MARIANO, 2001).

Os sólidos presentes são depositados no fundo e retirados por um funil coletor de lama. O segundo estágio utiliza métodos químicos ou físicos para promover a separação dos óleos



emulsionados no efluente. Os métodos físicos incluem o uso de uma série de tanques de decantação de grande tempo de retenção, ou mesmo o uso de flotores a ar induzido. Nesses equipamentos, o ar é borbulhado através do efluente e tanto o óleo quanto os sólidos em suspensão sobrenadam e são removidos da superfície. Agentes coagulantes, tais como hidróxido férrico ou hidróxido de alumínio podem ser usados com o fim de flocular as impurezas, o que torna mais fácil a sua remoção (CAMPOS, 1999).

Alguns dos resíduos gerados na etapa de tratamento de efluentes dessa natureza podem ser considerados perigosos e incluem: a lama do separador água e óleo, a lama do tratamento primário, as lamas de outras técnicas de separação gravitacional, o sobrenadante do flotor e os resíduos dos tanques de decantação (CAMPOS, 1999).

Após o tratamento primário, o efluente pode ser descartado em corpos receptores ou pode seguir para uma unidade de tratamento secundário. Nesta etapa o óleo dissolvido e outros poluentes orgânicos são biologicamente consumidos por microrganismos, o tratamento biológico normalmente requer a adição de oxigênio, que pode ocorrer a partir de diversas técnicas, incluindo o uso de unidades de lodo ativado, filtros e outros equipamentos. O tratamento secundário gera um resíduo de biomassa, que usualmente é anaerobiamente tratado e depois desidratado, antes do descarte (VON SPERLING, 2005).

Um estágio adicional pode ser empregado no processo de tratamento de efluentes, é chamado de polimento e tem o objetivo de tratar o efluente de forma que sejam atendidos os limites de descarte previstos pelos órgãos ambientais. Nesta etapa pode ser utilizado o carvão ativado, antracito, ou areia para filtração de impurezas remanescentes, como biomassa, sedimentos, traços de impurezas metálicas ou de outros compostos inorgânicos ou orgânicos (VON SPERLING, 2005).

Algumas correntes de efluentes precisam de um prévio tratamento separado de outras correntes, antes de seguirem para a unidade de tratamento de efluentes para que possam ser removidos certos contaminantes, pois sua mistura com outras correntes dificultaria a sua remoção, como exemplo pode ser tomado à água ácida que é drenada das torres de destilação. Essa corrente contém gás sulfídrico dissolvido, assim como outros compostos de enxofre e amônia. Esses contaminantes são retificados em uma torre, com gás ou vapor, antes de a corrente poder ser descartada para a planta de tratamento.

### 1.1.2. Descrição das Etapas do Tratamento

O objetivo de uma estação de tratamento de efluentes é a descontaminação dos efluentes resultantes dos processos operacionais, empregando técnicas que podem variar de acordo com os contaminantes presentes no efluente, tendo como fonte de origem de contaminação as águas utilizadas na área de processos e ou utilidades industriais, e outros efluentes que podem ser apresentados devido a outras operações secundárias ou produto das condições de produção (MARIANO, 2001).

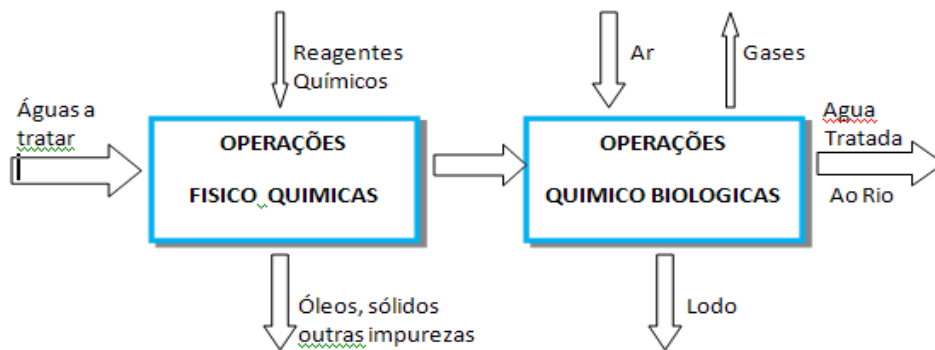


Figura 1.1 - Operações funcionais básicas em uma ETE

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010

Na Figura 1.1 são representadas as duas operações funcionais básicas a serem consideradas para a modelagem. O primeiro grupo de operações, denominado Operações Funcionais Primárias (OFP), onde se remove fisicamente sólidos, areia, óleo e outras impurezas da água através dos seguintes equipamentos (MUNIZ, 2008):

1. Tambor rotativo,
2. Separador água-óleo
3. Bacia de equalização e
4. Flotador

O óleo separado geralmente é agrupado e enviado para reprocessamento enquanto que a água contendo contaminantes é tratada no segundo bloco de operações, denominado Operações Funcionais Secundárias (OFS). O sistema também é composto por um tanque gerador de inóculos e lagoas para decomposição de matéria orgânica, que tenha função de inserir e manter as colônias microbiológicas agindo sobre os contaminantes degradados por bactérias (MUNIZ, 2008).

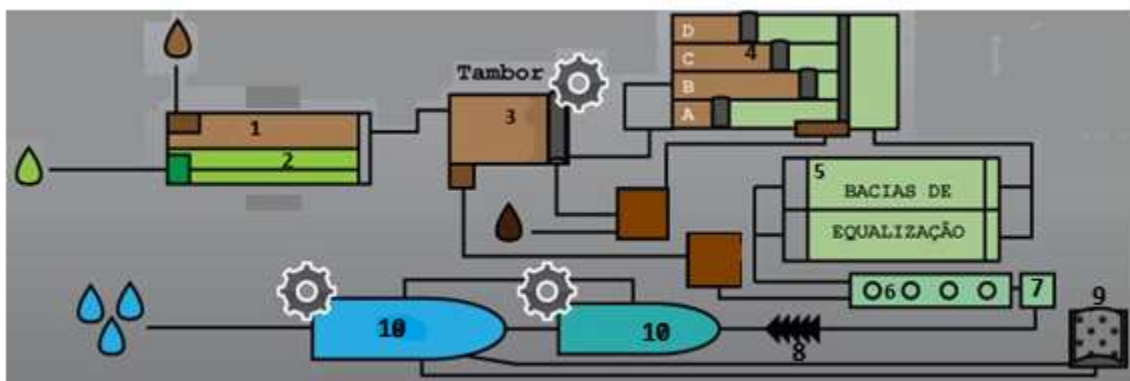
Os blocos funcionais anteriores são a divisão lógica a seguir no processo de modelagem e identificação do processo a ser realizado. Nas lagoas de tratamento biológico é apresentada uma degradação da carga orgânica e da carga nitrogenada do efluente hídrico, pela presença de ar, de determinados microrganismos e componentes químicos específicos, contando com aeração.

São vários os fatores que influenciam na transferência de oxigênio para o meio líquido, porém, os fatores de maior influência na taxa de transferência de oxigênio são (MUNIZ, 2008):

- Temperatura.
- Concentração de oxigênio dissolvido.
- Características do efluente.
- Características do sistema de arejamento.

Logo, para o cálculo da quantidade de oxigênio, pelos modelos matemáticos a serem desenvolvidos deve ser levado em consideração: a temperatura do efluente, a concentração de oxigênio no efluente e a utilização de fatores que relacionam o efluente com a água limpa.

Os parâmetros químicos que caracterizam o efluente e são considerados relevantes, serão utilizados para o desenvolvimento de um modelo matemático que permita à previsão do comportamento do tratamento de efluentes proporcionando desta forma a antecipação de decisões e contribuindo para minimização do descarte de efluentes fora dos limites estipulados legalmente, neste sentido são consideradas várias situações, tanto nos cenários de distúrbios a períodos mais calmos.



**Figura 1.2- Esquema geral da unidade de tratamento de efluentes**

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010

O esquema apresentado na Figura 1.2 descreve a estrutura do sistema de tratamento de efluentes adotado na indústria de refino de petróleo. Os principais equipamentos e operações das Operações Funcionais Primárias são listados a seguir (MUNIZ, 2008):

Gradeamento: tem por finalidade reter os sólidos grosseiros presentes no efluente contaminado.

Desarenador: tem por finalidade a remoção das partículas finas presentes no efluente contaminado.

1- Bacia de acumulação de águas contaminadas (BAC): tem por finalidade acumular águas pluviais contaminadas na ocorrência de chuvas. Em tempo seco deve permanecer vazia.

1.1- Caixa de partição contaminada: tem por finalidade encaminhar os efluentes contaminados, em tempo seco, por gravidade para a caixa de chegada do Sistema de Separação Água Óleo (SAO), através de tubulação com restrição de orifício. Na ocorrência de chuvas, o efluente que exceder a vazão normal de tempo seco, é encaminhado por gravidade para a bacia de acumulação de águas contaminadas através de um vertedor.

2- Bacias de acumulação de águas oleosas (BAO): tem por finalidade acumular águas onde a presença de óleo é constante e é formado principalmente pelas contribuições das drenagens contínuas dos equipamentos das unidades de processo,

2.2- Caixa de partição oleosa: tem por finalidade encaminhar por gravidade o efluente oleoso em tempo seco para a caixa de chegada do SAO, através de tubulação com orifício de restrição. Na ocorrência de chuva, o efluente que exceder a vazão de tempo seco, é encaminhado por gravidade para a bacia de acumulação de águas oleosas através de um vertedor.

3- Tambor coletor de óleo: consiste em um cilindro oco em aço carbono, dotado de um raspador de nylon e canaleta para possibilitar o recolhimento do óleo e posterior drenagem.

4- Caixa de chegada da SAO: funciona como um pré-separador de óleo, recolhendo o óleo sobrenadante dos efluentes através de um tambor coletor, e eliminando os resíduos sólidos (borra), acumulados no fundo do rebaixo (prisma), através de adufas de fundo, e encaminhando para o reprocessamento.

4- Separador de água e óleo: um dos equipamentos básicos do sistema de separação óleo água. Tem 4 células com dimensões idênticas dispostas lado a lado e provida dos mesmos equipamentos, é um separador de óleo do tipo API.

5- Bacia de equalização: tem como finalidade uniformizar as características do efluente, permitindo amortecer as variações de concentração existentes em decorrência de drenagens

intermitentes que ocorrem normalmente nas diferentes unidades do processo de refino do petróleo, ou eventuais anormalidades, e remoção eventual do óleo sobrenadante, através de um tubo flauta instalado a montante do septo de saída, é encaminhado para o poço de óleo que será enviado para reprocessamento. Nestas bacias de equalização estão instalados aeradores que são acionados por motores elétricos, com a finalidade de transferir oxigênio para a água por meio de um rotor o qual servirá também para agitar o meio, homogeneizando-o e evitando a sedimentação de lodos. Após a equalização, o efluente escoar por gravidade para a Calha Parshall

6- Calha Parshall: tem a função de medir a vazão do efluente. É dotada de um elemento primário para determinar a altura da lâmina de líquido baseado na emissão/recepção de ultra-som, sem contato direto com o líquido. O efluente da Calha Parshall é enviado por gravidade, para o flotador a ar induzido.

7- Flotador a ar induzido: tem por finalidade a flotação do óleo emulsionado e que não foi removido no sistema de Separação de Água e Óleo (SAO), através da injeção de ar gerado pelos aeradores. A espuma coletada na operação de flotação é encaminhada, através de bombas, para a caixa de chegada da SAO, onde entra novamente no sistema para retirada do óleo residual. O efluente de saída do flotador é enviado para as lagoas.

8 - Dissipador: o efluente aquoso da saída do flotador é enviado ao dissipador, onde este é compelido a aumentar seu contato com o ar incrementando a oxigenação e volatilização da parcela volátil do efluente.

### **Descrição básica dos equipamentos do tratamento secundário:**

Os principais equipamentos e operações onde as Operações Funcionais Secundárias são realizadas serão listados abaixo (HERRERA *et.al*, 2010):

O sistema secundário é composto por lagoas biológicas que têm o objetivo de degradar a matéria orgânica presente no efluente, utilizando microrganismos que são capazes de consumir a matéria orgânica em determinadas condições, contribuindo desta forma para o tratamento do efluente. As operações nas lagoas são de natureza química e biológica (BRAILE, 1989).

O sistema de arejamento pode ser por ar difuso, que é um sistema que consiste na injeção de micro-bolhas de ar através de membranas dispostas no fundo das lagoas. As micro-bolhas formadas favorecem o contato do ar com o meio líquido, suprindo assim a demanda de oxigênio necessária para que a reação biológica ocorra nestas lagoas (MUNIZ, 2008).

As lagoas têm o formato retangular de dimensões e taludes irregulares, com fundo inclinado, no sentido da entrada para a saída do fluxo do líquido. Em geral, quanto menor o tamanho da bolha de ar, maior a área superficial disponível para transferência dos gases, ou seja, maior a eficiência de oxigenação. Por esta razão, os sistemas de arejamento com bolhas finas são os mais eficientes na transferência de oxigênio. Esta injeção é feita por sopradores que captam o ar da atmosfera e, através de tubulações, injetam com pequena pressão e grandes vazões no interior das lagoas através dos difusores.

A existência de OD num corpo de água é de fundamental importância no metabolismo dos seres aquáticos, sem ele, nas lagoas não há desenvolvimento bacteriano. Essas bactérias são responsáveis pela degradação da carga orgânica e da carga nitrogenada do efluente hídrico.

9- Reator de biodiscos: equipamento tecnológico a trabalhar em conjunto com as lagoas tendo como objetivo principal a geração de inóculos para o processo biológico desenvolvido nas lagoas. A alimentação do reator, neste sistema, é captada da segunda lagoa, recalado por bomba para o sistema gerador de inóculo. O sistema biológico gerador de inóculo de bactérias nitrificantes é um reator do tipo biomassa fixa aderida em reator rotativo, que emprega o biodisco. A roda de biodisco é composta por vários tubos plásticos corrugados, enrolados como um carretel, empregado para o tratamento aeróbio de efluente sanitário e industrial. Os biodiscos são construídos com tubulações de PEAD de 4 polegadas, com área superficial por volume do biodisco de aproximadamente  $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (MUNIZ, 2008).

Na Figura 1.2, as lagoas de tratamento biológico são identificadas pelo número 10, após esta etapa do tratamento o efluente é descartado para o corpo receptor.

## 2. ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DOS SUBMODELOS E MODELO GERAL

A seguir será apresentado e detalhado o método empregado para a determinação do modelo dinâmico geral, além do conceito do modelo híbrido que será desenvolvido. Posteriormente serão apresentados os modelos e submodelos desenvolvidos e os resultados das simulações.

No desenvolvimento do modelo híbrido foi utilizada a modelagem estruturada, método apresentado na literatura especializada por van Lith *et. al.* (2002), e que possui quatro etapas fundamentais, conforme apresentadas na Figura 2.1.

O conceito básico deste método consiste em dividir o problema de modelagem em diferentes subproblemas cada um deles de menor complexidade (VAN LITH *et. al.* 2002).

Na primeira etapa uma análise geral é formulada, os objetivos do modelo e os requisitos de qualidade da modelagem. O principal resultado desta etapa é o modelo geral definindo as variáveis que serão as entradas e saídas do modelo híbrido a ser obtido.

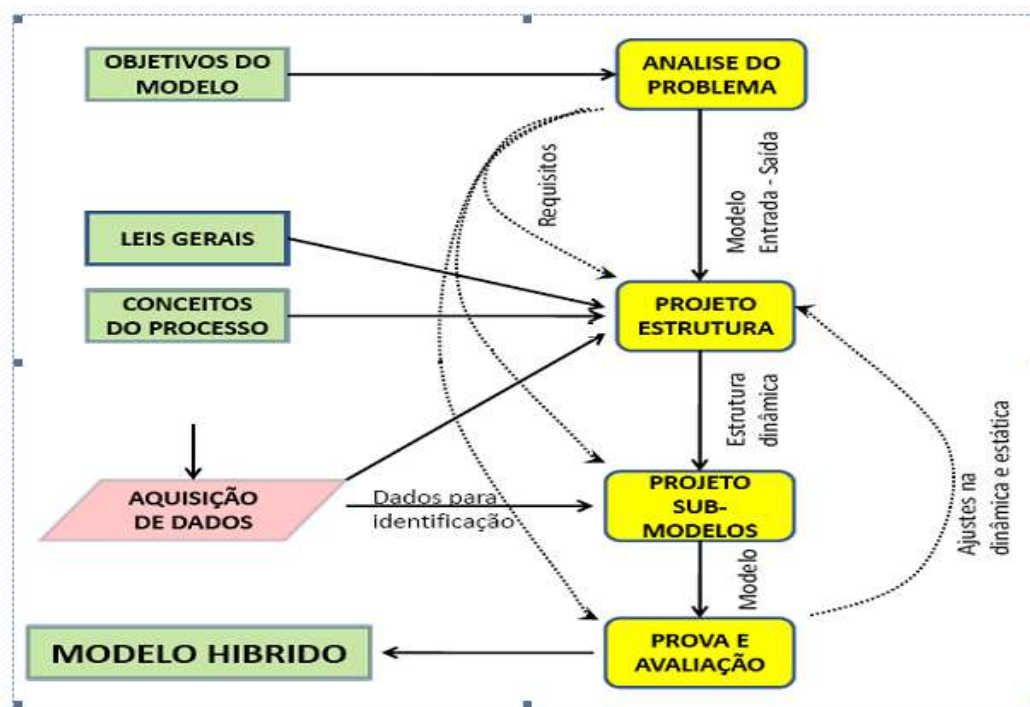


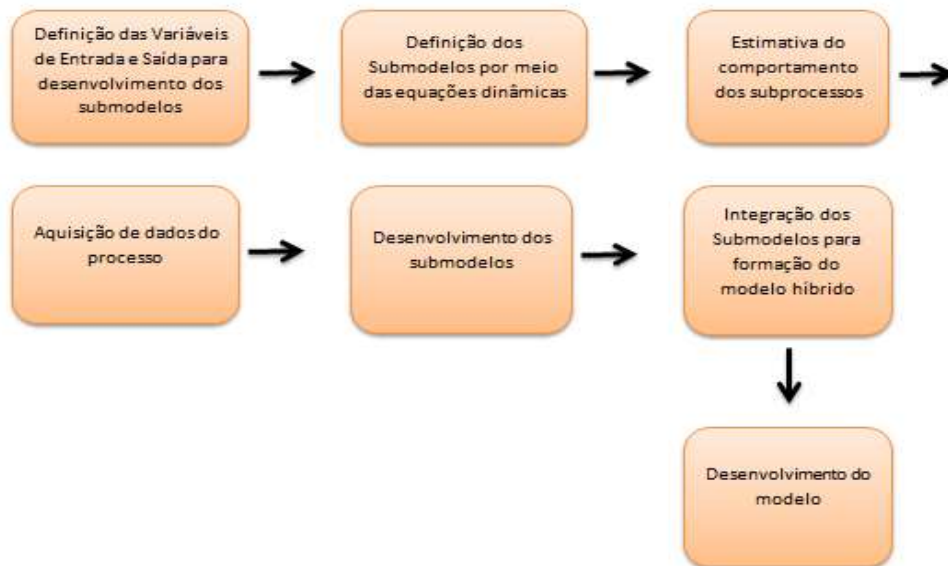
Figura 2.1–Etapas para o desenvolvimento do modelo híbrido

Fonte: HERRERA et.al, 2011.

Na segunda etapa é considerada a estrutura constituída pelas equações dinâmicas gerais do processo (equações de balanço). Nesta etapa as especificidades do processo também são determinadas. Seu principal resultado são os diferentes submodelos nos quais o processo será dividido para obtenção do modelo completo. Esta etapa é considerada como o projeto geral do modelo híbrido.

Os parâmetros para o desenvolvimento dos submodelos são estimados na terceira etapa, empregando técnicas de identificação inteligente, usando os dados do processo. Esta etapa é realizada em duas partes, na primeira cada submodelo é determinado de forma independente, e posteriormente são combinados para formar o modelo híbrido (modelo completo ou global).

A quarta etapa é dedicada à avaliação do modelo resultante. O modelo inteligente é descrito e aplicado em cada uma destas etapas na modelagem híbrida. Na figura 2.2 estão descritas de forma geral, as etapas de desenvolvimento do modelo matemático.



**Figura 2.2– Esquema geral do processo de desenvolvimento do modelo matemático**

Fonte: SOUZA, 2015.



## 2.1. Análise e estrutura dos modelos.

Para o desenvolvimento do modelo matemático realizou-se a análise geral de um processo de tratamento de efluentes com características originadas da indústria do refino de petróleo, estabelecendo os objetivos da modelagem e as características fundamentais que os modelos que serão obtidos deverão apresentar.

Posteriormente serão apresentados os modelos e alguns submodelo obtidos para os processos executados na ETE. O principal resultado é a relação de variáveis a considerar como “entradas e saídas” dos modelos a desenvolver.

A determinação das variáveis de entrada e saída do sistema de tratamento será utilizada para obtenção de resultados das duas primeiras etapas, que serão considerados no resto do trabalho.

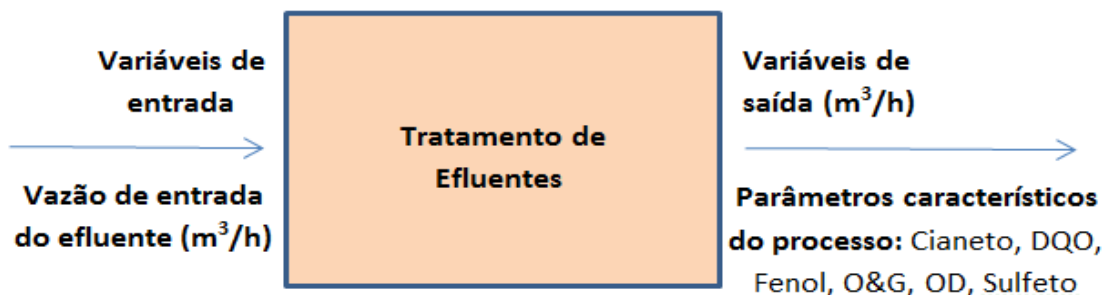


Figura 2.3 – Variáveis de entrada e saída

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

Na Figura 2.3 estão descritas as variáveis que serão usadas nos diferentes submodelos dos processos executados no tratamento de efluentes. Cada um destes submodelos usarão todas ou algumas das variáveis relacionadas nessa figura.

Para o desenvolvimento do modelo deverão ser consideradas as seguintes etapas do sistema de tratamento de efluentes: (a) sistema de entrada de efluentes (recebimento dos efluentes - água contaminada e água oleosa); (b) sistema de tratamento primário; e (c) sistemas de tratamento biológico (HERRERA *et.al*, 2011).

## 2.2. Definição dos submodelos através de equações dinâmicas

A partir da definição dos submodelos é possível obter todas as relações dinâmicas fornecidas pelas leis fundamentais que atuam no processo (leis químicas, biológicas e mecânicas). Os conceitos básicos de operação do processo são combinados no modelo físico geral. Na Figura 2.4 são apresentadas as etapas que constituem a estrutura geral do modelo dinâmico (VAN LITH *et. al.* 2002).

Cada submodelo terá apenas uma saída e será uma variável dependente nesse modelo. Mas a determinação das variáveis independentes, em cada submodelo, vai depender da análise de sensibilidade que será realizada em cada caso (VAN LITH *et. al.* 2002).

Depois de definir cada submodelo, estes serão construídos aplicando uma ferramenta de Inteligência Artificial, sistemas neuro-fuzzy.

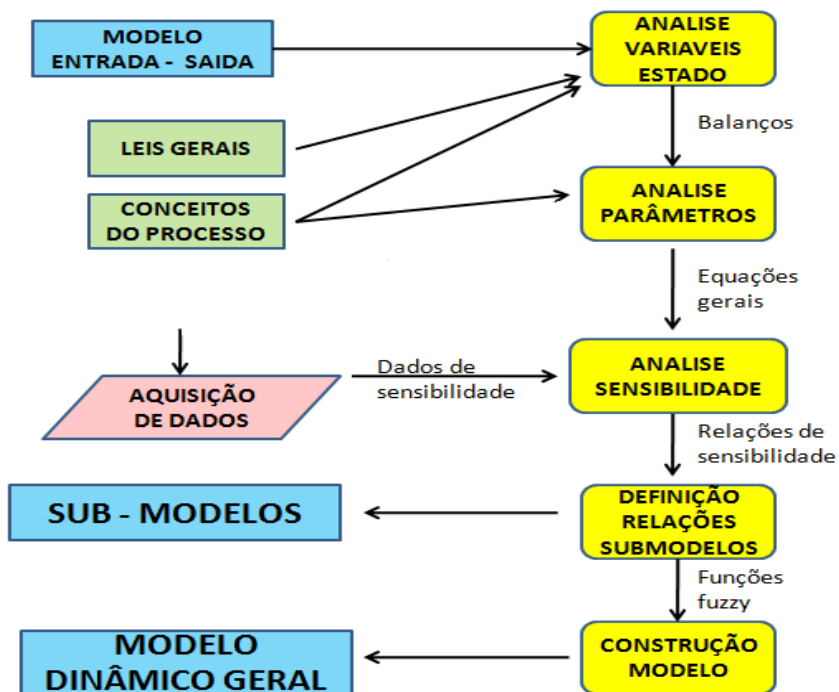


Figura 2.4 –Etapa de estrutura geral do modelo dinâmico

Fonte: HERRERA *et.al.*, 2010.

As etapas realizadas na obtenção dos submodelos estão descritas a seguir:

1. Aquisição dos dados;

2. Estimativa do comportamento dos subprocessos;
3. Identificação dos submodelos;
4. Integração dos submodelos.

Na Figura 2.5 é realizada uma breve explicação destes passos.

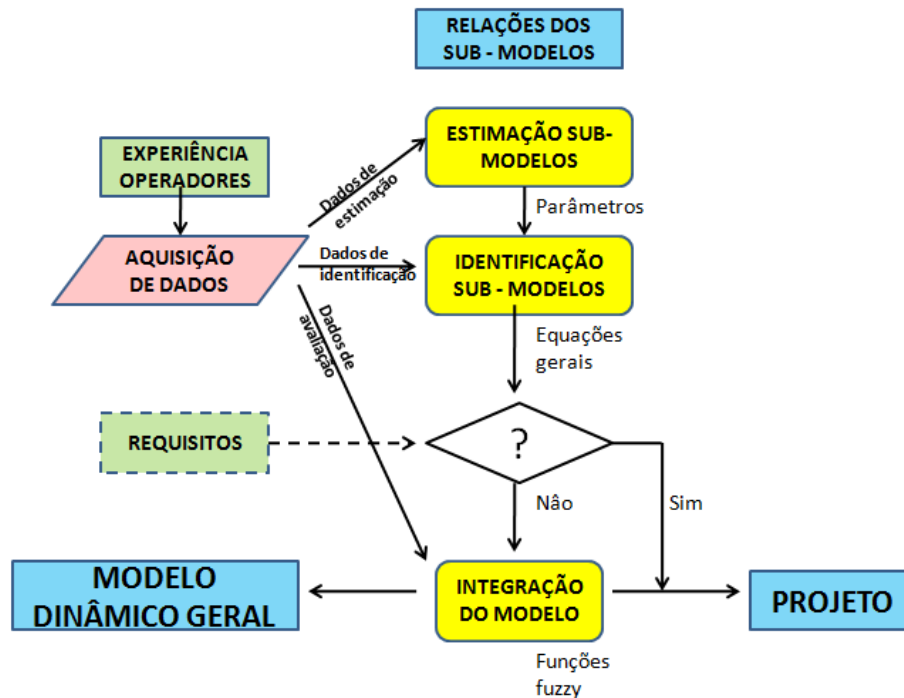


Figura 2.5 –Etapa de desenvolvimento dos submodelos

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

### 2.3. Estimativa do comportamento dos subprocessos

Nesta etapa, todas as saídas dos subprocessos são obtidas através de medições (algumas diretamente por instrumentos de medição, outras por análise química realizada em laboratório). Tendo estas medições das saídas, foi feita a estimativa do comportamento dos subprocessos. A análise mais complexa corresponde à parte do tratamento biológico. O modelo geral é dividido em submodelos, que serão integrados para o desenvolvimento deste modelo geral.

## 2.4. Aquisição dos dados

Para a obtenção dos modelos foi utilizado um histórico de dados experimentais obtidos ao longo de um período de 12 meses, composto por resultados de análises realizadas com o objetivo de monitorar a qualidade do efluente tratado e acompanhar os níveis de poluentes presentes no efluente descartado no corpo hídrico. Algumas medições foram realizadas expressamente para determinar dados específicos necessários ao desenvolvimento dos modelos e submodelos. Os dados das variáveis físicas, tais como níveis e vazões, foram fornecidos por instrumentos de medição em campo, estes dados apresentam boa sequência no tempo para determinar o comportamento dinâmico das variáveis selecionadas, foi montada uma base de dados experimental.

## 2.5. Desenvolvimento dos submodelos

A técnica utilizada neste projeto para obtenção dos submodelos é denominada de identificação difusa (*fuzzy identification*) (VAN LITH *et. al.* 2002). Esta técnica será aplicada na identificação de cada submodelo empregado usando o método de agrupamento difuso (*fuzzy clustering*) devido a diferentes características:

- Conter um método algorítmico de aprendizagem que não requer uma vasta informação da estrutura do modelo.
- O algoritmo de otimização aplicado na determinação dos parâmetros não é muito sensível aos valores iniciais destes parâmetros. Esta é uma vantagem fundamental, que motiva a seleção dessa técnica.
- Os submodelos difusos (*fuzzy sub-models*) são formados por regras independentes, derivadas diretamente dos conjuntos de dados, garantindo modelos com baixa probabilidade de apresentar problemas na extrapolação.

Os submodelos difusos são identificados usando os dados obtidos na etapa anterior. O método de agrupamento a ser usado é o conhecido por Gustafson-Kessel, que é muito flexível para a descrição de sistemas complexos e pouco sensíveis ao escalamento dos dados e às condições iniciais. Um método iterativo será empregado na determinação e redução do número de grupos,

porque não é possível determinar previamente o número exato de grupos requeridos. (VAN LITH *et. al.* 2002).

Os modelos utilizados serão Fuzzy do tipo Takagi–Sugeno–Kang (TSK) por apresentar as seguintes características: (a) pode ser considerado como um conjunto de submodelos lineares locais; (b) é adequado para descrever relações em processo altamente não lineares; (c) apresenta uma estrutura simples e transparente; e (d) há disponíveis bons algoritmos de identificação deste tipo de modelo, alguns deles com otimização da estrutura do modelo (MOZELLI, 2008).

Os sistemas fuzzy Takagi-Sugeno são muito úteis devido sua capacidade de modelar, aproximadamente ou com exatidão, dinâmicas não-lineares sobre domínios compactos por meio da combinação de modelos lineares, localmente válidos, são utilizados na modelagem de sistemas que apresentam não-linearidades, com incertezas paramétricas e ocorrência de distúrbios em maior ou menor grau, características frequentes na grande maioria de processos a serem controlados (MOZELLI, 2008).

## **2.6. Integração dos submodelos**

Os submodelos são integrados para formar o modelo híbrido, o que implica conectar todos os submodelos e aperfeiçoar o comportamento geral do modelo híbrido. Devido à presença de muitas interações nesta integração é necessário que o modelo híbrido geral seja modificado por meio da otimização dos parâmetros dos submodelos respectivo à saída do modelo híbrido geral.

A determinação dos parâmetros dos submodelos será realizada tendo em consideração o significado dos parâmetros no modelo híbrido final. Nos modelos Takagi–Sugeno–Kang (TSK) os parâmetros antecedentes determinam apenas a zona de operação para a qual este modelo linear é válido, entretanto os parâmetros utilizados têm um alto impacto no funcionamento do modelo (VAN LITH *et. al.* 2002).

O método de otimização usado é baseado no gradiente dos submodelos difusos iniciais como ponto de partida, mantendo a transparência do modelo. Sabe-se que estes métodos de otimização podem chegar a ótimos resultados, portanto a solução final dos algoritmos é avaliada criteriosamente. Desta forma é garantido que os parâmetros ótimos não serão achados, porém a solução será aceitável (ROFFEL, 2006).

O resultado desta etapa é o modelo híbrido, que é avaliado a respeito do cumprimento dos requisitos. Esta avaliação será realizada nos seguintes aspectos: (a) comportamento estático; (b) comportamento dinâmico; (c) complexidade – número de regras e a base de regras; (d) caráter interpretável; e (e) independência do processo.

É importante considerar que estes modelos difusos são ainda modelos do tipo caixa preta e todos os resultados dele serão avaliados em função dos objetivos da simulação, considerando o significado físico destes resultados (ROFFEL, 2006).

A modelagem de processo é a forma de desenvolver e implantar modelos matemáticos que possa descrever de forma real alguns sistemas, para isso existe algumas técnicas utilizadas que são classificadas como: a) modelagem de caixa branca; b) modelagem de caixa preta; c) modelagem de caixa cinza (AGUIRRE, 2007).

A modelagem de caixa branca também é chamada de modelagem fenomenológica ou conceitual, nesse tipo de modelagem é preciso conhecer o sistema a ser modelado a fundo, conhecendo as relações matemáticas que descrevem os fenômenos envolvidos, utilizam princípios da física e da química além de analisar o comportamento dinâmico do sistema (verificando o comportamento das variáveis de interesse através de equações diferenciais de movimento que a descrevem), esta técnica nem sempre é eficiente (AGUIRRE, 2007).

Os modelos do tipo caixa preta ou modelagem empírica são utilizados para a modelagem de processos cujos elementos internos são desconhecidos, quando o sistema é inacessível e excessivamente complexo (de difícil explicação ou detalhamento), no qual a sua estrutura interna é desconhecida ou não é levada em consideração em sua análise, que limita-se, assim, a medida das relações de entrada e saída.. Esse sistema é ainda mais robusto e mais fácil de manter, em caso de alguma falha, este poderá ser analisado e abordado de maneira mais ágil (AGUIRRE, 2007).

A modelagem de caixa cinza utiliza um conjunto de técnicas que se caracterizam por usar informações auxiliares, que não se encontra no conjunto de dados utilizados na modelagem caixa preta (AGUIRRE, 2007).

### **3. APLICAÇÃO DO MÉTODO NEUROFUZZY PARA OBTENÇÃO DO MODELO GERAL DE SIMULAÇÃO**

Os procedimentos de identificação inteligente foram desenvolvidos a partir das estruturas de modelos que serão obtidos. Os métodos aplicados foram os sistemas neuro-fuzzy, considerando o modelo geral e os submodelos obtidos para cada etapa do processo do tratamento de efluentes que foi observado.

O sistema neuro-fuzzy (SNF) é um sistema híbrido que consiste na combinação de duas técnicas de modelagem as ANN (Redes Neurais Artificiais) e a FL (Lógica Fuzzy). Os sistemas híbridos são combinações de técnicas com objetivo de obter um sistema mais eficiente e menos deficiente, as técnicas podem ser aplicadas para melhorar as deficiências do outro sistema em maior ou menor grau, eliminando as desvantagens individuais ao combinar as características comuns, com objetivo de construir um Sistema de Interferência Fuzzy (FIS) em uma estrutura paralela distribuída de tal forma que os algoritmos de aprendizado das redes neurais possam ser aproveitados no sistema híbrido para ajustar os parâmetros do FIS (SANCHEZ, 2009).

Os sistemas neuro-fuzzy são utilizados, pois permite a integração do conhecimento explícito gerado pela experiência do especialista e do conhecimento implícito obtido a partir de um conjunto de dados, assim são associados à capacidade de aprendizado e tolerância a falhas das Redes Neurais Artificiais (ANN) com a interpretabilidade dos Sistemas de Interferência Fuzzy (FIS) (SANCHEZ, 2009).

Os modelos neuro-fuzzy são representações de sistemas Fuzzy (formulados por meio de regras fuzzy do tipo IF - THEN) na forma de redes (ou grafos direcionados) passíveis de treinamento por técnicas similares as usadas em redes neurais artificiais. Tal estrutura viabiliza a adaptação do sistema Fuzzy sob treinamento do dado training set, de modo que ao final, obtenhamos resultados interpretáveis. Estes sistemas são baseados nos processos do raciocínio humano, mesmo que de modo bastante superficial, apresentando a possibilidade de ajustes a comportamentos arbitrários, aspecto fundamental para a modelagem dos processos estudado (MUNÓZ *et. al.* 2006).

A adaptação destes modelos é realizada por meio de alteração de seus parâmetros característicos. O processo de treinamento nada mais é que o ajuste de parâmetros guiado pelo processo de

minimização da função de erro entre as saídas desejadas e as apresentadas ao sistema. Os sistemas neurofuzzy objetivam conjugar a capacidade de aprendizado das redes neurais à interpretabilidade característica dos sistemas Fuzzy. Isso é feito pela parametrização de tipo específico dos referidos sistemas, síntese de funções, objetivo e algoritmos de minimização global adequado (MUNÓZ *et. al.* 2006).

À medida que o algoritmo progride rumo ao mínimo global, o respectivo sistema Fuzzy apresenta comportamento cada vez mais próximo do desejado e traduzido pelos elementos do training set.

A modelagem pelo método chamado neuro-fuzzy é considerada uma ferramenta poderosa no desenvolvimento de modelos Fuzzy, principalmente do tipo Takagi-Sugeno-Kant (TSK). Sua utilidade é evidenciada quando lidamos com sistemas não lineares e de comportamento variável no tempo (MUNÓZ *et. al.* 2006).

O modelo fuzzy Takagi-Sugeno (TS) consiste em um sistema de inferência capaz de descrever, de forma exata ou aproximada, sistemas dinâmicos não-lineares por meio de um conjunto de sistemas dinâmicos lineares, localmente válidos, interpolados de forma suave, não-linear e convexa. O modelo TS também é conhecido na literatura como modelo Takagi-Sugeno-Kang (TSK) e foi proposto por Takagi e Sugeno (1985). Isto se deve aos trabalhos subsequentes de Sugeno e Kang (1986) relacionados a metodologias desenvolvidas para identificação desse tipo de modelo. (MOZELLI, 2008).

Em termos de modelagem, sabe-se que os modelos TS têm a capacidade de aproximar uniformemente funções quaisquer em um domínio compacto (ZENG *et al.*, 2000; TANSCHKEIT *et al.*, 2007; TANAKA e WANG, 2001; YING, 2000). Em outras palavras, modelos TS têm a capacidade de alcançar resultados mais próximos do esperado.

Além disso, uma vantagem sobre outros modelos fuzzy é o fato de serem sistemas dinâmicos, facilitando substancialmente a tarefa de identificação de modelos (JOHANSEN *et al.*, 2000). Sob o ponto de vista de controle, modelos TS permitem conciliar técnicas de controle não-linear e, ao mesmo tempo, estender de forma rigorosa resultados da teoria de controle de sistemas lineares (TEIXEIRA e ASSUNÇÃO, 2007).

A modelagem é o processo para formular os efeitos dinâmicos do sistema que podem ser obtidos através de equações matemáticas. Assim baseada na análise das características do processo estudado, optou-se pelo emprego dessa metodologia para o desenvolvimento do modelo matemático por ser o mais adequado para a obtenção dos resultados desejados.



A obtenção do modelo computacional de certo sistema pode basear-se nas leis do comportamento do sistema ou na relação entrada-saída, que são obtidos a partir da realização de teste utilizando dados reais da operação do sistema. (MOZELLI, 2008).

No desenvolvimento do modelo matemático foi necessário considerar o comportamento dinâmico do tratamento de efluentes que é caracterizado pelas respostas dinâmicas do processo, as entradas manipuladas e perturbações à qual estão suscetíveis, levando em conta também as condições iniciais do processo analisado que nem sempre podem ter resultados diferenciados, pois ambos possuem grande influência sobre o comportamento do processo, a primeira pode ser ajustada independente, enquanto a última não pode ser ajustada.

As variáveis que caracterizam esse sistema e que apresentaram maior relevância para o desenvolvimento desse modelo matemático são os seguintes componentes químicos do efluente: cianeto, fenóis, sulfeto, amônia, O&G e os biológicos DQO, OD.

Na dedução dos modelos serão utilizados balanços de massa para cada componente, como estes balanços são semelhantes em sua forma, foi definido um vetor que caracteriza cada variável em função do tempo e da corrente que será analisada. Os parâmetros dos modelos serão considerados constantes e serão validados com a realização de teste utilizando dados reais da planta, obtidos de registros históricos da ETE.

O modelo será composto pelo balanço de massa de sete variáveis que são controladas por apresentarem maior criticidade no sistema de tratamento de efluentes, mais a concentração de biomassa microbiana, o balanço de massa será baseado na lei de conservação da massa para cada componente químico.

As variáveis que caracterizam o sistema e que apresentaram maior relevância para o desenvolvimento do modelo matemático são os seguintes componentes químicos: cianeto, fenóis, sulfeto, amônia, O&G e os parâmetros biológicos DQO, OD. Outros fatores importantes a serem considerados são as contribuições de efluentes recebidas na unidade de tratamento: (a) águas oleosas; (b) águas contaminadas; e (c) águas de chuva entrando direto nas bacias de acúmulo de água e separação de água e óleo do sistema.

Para a modelagem também foram consideradas as seguintes condições: (a) o principal componente químico que se altera no valor de sua concentração é o de óleos e graxas; (b) foram mantidos os outros componentes que também são considerados críticos para o sistema,

dependendo somente das variações presentes nas entradas; (c), além disso, foram consideradas duas entradas principais de efluentes.

Os parâmetros dos modelos serão considerados constantes e serão validados com dados reais obtidos de uma base de dados. Outros dados serão gerados também em experimentos planejados com maior rigor, visando maximizar a qualidade da informação que será usada na identificação dos parâmetros dos diferentes modelos.

Os balanços do sistema são descritos em regime não permanente, esta não linearidade está expressa pela dependência entre a composição dos componentes químicos e o volume das instalações da ETE, entretanto as saídas dinâmicas do modelo geral correspondem ao comportamento dos componentes químicos.

Para obtenção do modelo foi combinado a estrutura do modelo dinâmico descrito com as relações dinâmicas entre as vazões, considerando as condições listadas originando finalmente o submodelo final para o processo, a dinâmica considerada foi dos volumes e da concentração dos componentes nas etapas das instalações.

A partir das operações e condições estudadas nos processos, os modelos híbridos deverão apresentar as seguintes características: Dinâmicos, Paramétricos, Discretos, Multivariáveis.

## 4. RESULTADOS

### 4.1. Simulação dos submodelos

Serão apresentados os resultados das simulações realizadas para as condições específicas de operação dos submodelos fenomenológicos obtidos. O objetivo fundamental é avaliar a capacidade destes submodelos de representar os processos de tratamento de efluentes, conjuntamente com as simulações realizadas serão apresentadas algumas avaliações dos resultados obtidos, assim como sobre as características e propriedades das variáveis e parâmetros aplicados nos modelos.

A simulação foi feita para um período de até cinco horas, o que permitiu analisar toda a dinâmica do tratamento de efluentes, sob as condições permanentes de chegada, num processo dinâmico do sistema, sendo assim, a solução chegará a um estado de regime permanente. Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 são listadas as condições experimentais consideradas para a realização das simulações.

**Tabela 4.1 - Informação das correntes de alimentação de água oleosa**

Variáveis	Valor
Vazão de alimentação de água oleosa	122 m <sup>3</sup> /h
Vazão de chuva que chega à estação de tratamento	87 m <sup>3</sup> /h
DQO da corrente de alimentação da água oleosa	4697 mg/L
Amônia da corrente de alimentação da água oleosa	11,63 mg/L
Cianetos da corrente da água oleosa	0,03 mg/L
Sulfetos da corrente de alimentação da água oleosa	3,38 mg/L
Fenóis da corrente de alimentação da água oleosa	5,2 mg/L
OD da corrente de alimentação da água oleosa	0,87 mg/L
O & G da corrente de alimentação da água oleosa	1545 mg/L

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010

**Tabela 4.2 - Condições iniciais na caixa e na bacia de água oleosa.**

Variáveis	Valor
Nível na caixa de água oleosa	0,5 m
DQO na caixa de água óleos	3000 mg/L
Amônia na caixa de água óleos	8 mg/L
Cianetos na caixa de água óleos	0,02 mg/L
Sulfetos na caixa de água óleos	3 mg/L
Fenóis na caixa de água óleos	4 mg/L
OD na caixa de água óleos	0,85 mg/L
O & G na caixa de água óleos	1120 mg/L
Nível na bacia de água oleosa	1,5 m
DQO na bacia de água oleosa	2500 mg/L
Amônia na bacia de água oleosa	7 mg/L
Cianetos na bacia de água oleosa	0,025 mg/L
Sulfetos na bacia de água oleosa	2,8 mg/L
Fenóis na bacia de água oleosa	4,1 mg/L
OD na bacia de água oleosa	0,97 mg/L
O & G na bacia de água oleosa	1300 mg/L
Aceleração da gravidade	1,271376E+08 m/h <sup>2</sup>
Coefficiente de descarga do orifício	0,65

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010

**Tabela 4.3 - Parâmetros característicos da caixa e da bacia de água oleosa.**

Variáveis	Níveis
Largura da caixa de água oleosa	0,6 m
Comprimento da caixa de água oleosa	3,0 m
Largura da bacia de água oleosa	11,5 m
Comprimento da bacia de água oleosa	15,5 m
Altura máxima do nível da caixa de água oleosa	1,75 m
Altura máxima do nível da bacia de água oleosa	3,58 m
Diâmetro do orifício de saída da tubulação da caixa oleosa	0,1 m
Diâmetro do orifício de saída da bacia de água oleosa	0,1 m

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010

Considerando os dados apresentados nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3, foi testada a capacidade do modelo para representar a dinâmica do processo em um período mais longo, de 24 horas. Se as condições dos dados inseridos mudam com o tempo, o sistema fica sendo perturbado constantemente, razão pela qual as variáveis mudam sempre em procura de um novo estado permanente.

Neste teste foi feito a consideração do tempo ser constante, nesse mesmo tempo foi considerado que as variáveis estão fixadas e a dinâmica do processo procura o regime permanente

correspondente até uma nova mudança acontecer de forma aleatória e então uma nova procura começar.

As características das distribuições de probabilidade das variáveis aleatórias usadas neste experimento são descritos a seguir na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 - Parâmetros das distribuições de probabilidade normais das variáveis de entrada no sistema**

Variáveis	Média	Desvio padrão
Vazão de alimentação de água oleosa (m <sup>3</sup> /h)	122	20
Vazão de chuva que chega à caixa de água oleosa (m <sup>3</sup> /h)	87	8
DQO da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	4697	500
Amônia da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	11.63	2
Cianetos da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	0.03	0.01
Sulfetos da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	3.38	0.4
Fenóis da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	5.2	0.5
OD da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	0.87	0.04
O&G da corrente de alimentação à caixa de água oleosa (mg/L)	1545	160
Vazão de alimentação à caixa de água contaminada (m <sup>3</sup> /h)	60	20
DQO da corrente de alimentação à caixa de água contaminada (mg/L)	3497	500
Amônia da corrente de aliment. à caixa de água contaminada (mg/L)	10.63	2
Cianetos da corrente de aliment. à caixa de água contaminada(mg/L)	0.025	0.015
Sulfetos da corrente de aliment. à caixa de água contaminada (mg/L)	4.38	0.46
Fenóis da corrente de aliment. à caixa de água contaminada (mg/L)	5.9	0.59
OD da corrente de alimentação à caixa de água contaminada (mg/L)	0.87	0.045
O&G da corrente de alimentação à caixa de água contaminada (mg/L)	1645	210

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010

Os parâmetros listados na Figura 4.4 foram estimados baseados em dados experimentais e utilizados para testar o modelo, também podem ser estimados a partir das condições de projeto ou de análises realizadas para determinação da concentração de componentes químicos. As características destas distribuições e seus parâmetros ficam abertos no programa para serem mudados de acordo com as características próprias do sistema quando for necessário.

Nas Tabelas 4.5 e 4.6 são mostradas as condições iniciais no sistema de recepção de água oleosa e no sistema de recepção de água contaminada. Na Tabela 4.6 a profundidade da caixa de água contaminada e oleosa são expressas em [m] e todas as outras variáveis em [mg/L]. Estas informações formarão parte do sistema de dados que será administrado pelo usuário e servirão para estudar diferentes cenários do processo de tratamento de efluentes.

**Tabela 4.5 - Condições iniciais na caixa e na bacia de água oleosa.**

Variável	Valor	Variável	Valor
Profundidade da caixa de água oleosa	0.5	DQO na caixa de água oleosa	3000
Amônia na caixa de água oleosa	8	Cianetos na caixa de água oleosa	0.02
Sulfetos na caixa de água oleosa	3	Fenóis na caixa de água oleosa	4
OD na caixa de água oleosa	0.85	O&G na caixa de água oleosa	1120
Fundura na bacia de água oleosa	1.5	DQO na bacia de água oleosa	2500
Amônia na bacia de água oleosa	7	Cianetos na bacia de água oleosa	0.025
Sulfetos na bacia de água oleosa	2.8	Fenóis na bacia de água oleosa	4.1
OD na bacia de água oleosa	3	O&G na bacia de água oleosa	1300

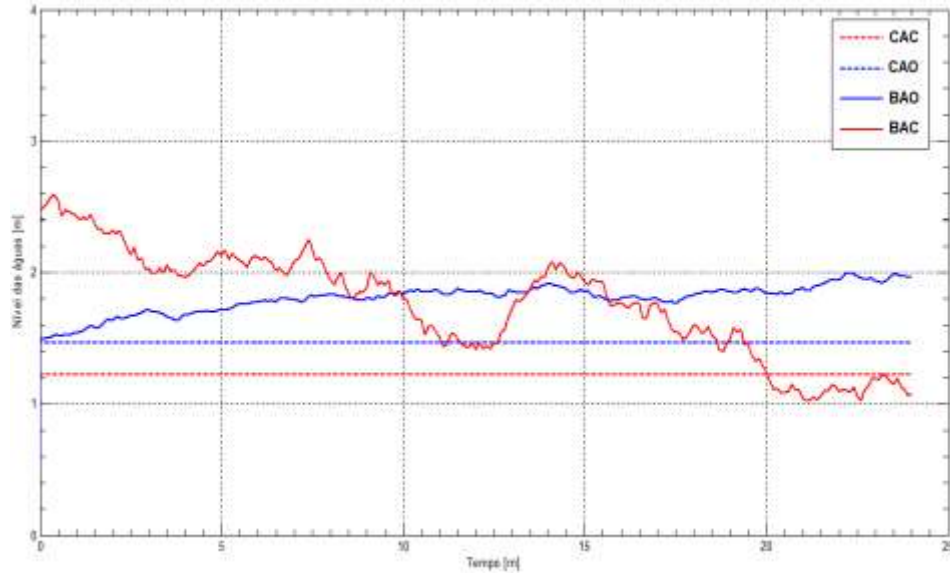
Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

**Tabela 4.6 - Condições iniciais na bacia de água contaminada**

Variável	Valor	Variável	Valor
Profundidade da caixa de água contaminada	0.5	DQO na caixa de água contaminada	3500
Amônia na caixa de água contaminada	5	Cianetos na caixa de água contaminada	0.025
Sulfetos na caixa de água oleosa	3.5	Fenóis na caixa de água contaminada	4.1
OD na caixa de água contaminada	0.75	O&G na caixa de água contaminada	1220
Fundura na bacia de água contaminada	2.5	DQO na bacia de água contaminada	2500
Amônia na bacia de água contaminada	7.7	Cianetos na bacia de água contaminada	0.02
Sulfetos na bacia de água contaminada	2.8	Fenóis na bacia de água contaminada	3.1
OD na bacia de água contaminada	0.87	O&G na bacia de água contaminada	1400

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados da dinâmica do nível das caixas e das bacias que compõem o sistema de recepção das águas. A primeira questão interessante é que as duas caixas, nas condições escolhidas para este exemplo, por serem muito pequenas trabalharam o tempo todo no nível que ultrapassa a sua capacidade, vertendo parte da água de chegada para as duas bacias. Na verdade, as condições escolhidas para as vazões de alimentação foram para produzir esse efeito e poder contar com a informação do comportamento das bacias. Os níveis nos que se mantiveram estas duas variáveis coincidem com aqueles máximos escolhidos para esta simulação: 1,45 m para a caixa de água oleosa e 1,22 m para a caixa de água contaminada. Este comportamento é um sinal do bom funcionamento do modelo.



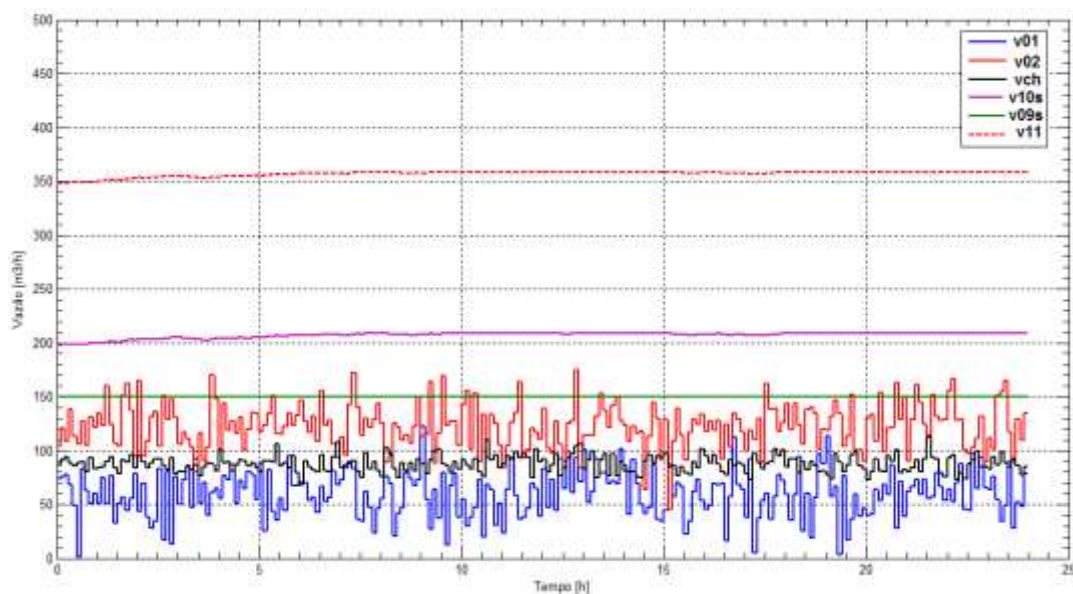
**Figura 4.1- Dinâmica dos níveis das águas no sistema de recepção de água oleosa e contaminada**

**Legenda da Figura 4.1:**

- CAC: Caixa de água contaminada
- CAO: Caixa de água oleosa
- BAO: bacia de água oleosa
- BAC: bacia de água contaminada

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

No caso da Bacia de Água Oleosa foi escolhida uma condição inicial para que o nível da água tivesse um aumento. O contrario foi feito no caso da Bacia de Água Contaminada foi alcançado o efeito esperado, a partir disso, ficou claro nestas duas bacias o comportamento destas duas variáveis e a sua dependência com as variáveis de alimentação.



**Figura 4.2 - Dinâmica dos níveis das águas no sistema de recepção de água oleosa e contaminada**

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

Na parte inferior da Figura 4.2 são observadas as vazões de alimentação de água contaminada, oleosa e de chuva. Acima destas estão às vazões de saída do sistema oleoso, contaminado e do ponto de união destas duas correntes.

O comportamento das correntes de alimentação é aleatório e depende dos parâmetros que foram escolhidas para estas variáveis.

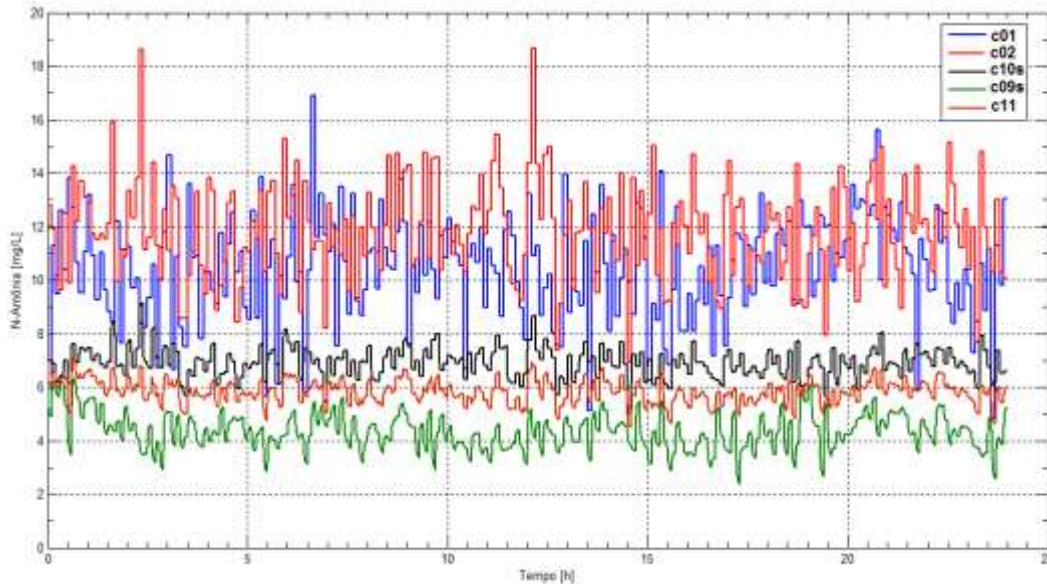
No caso da vazão de descarrega das águas contaminadas foi observado que ocorria sua operação de forma constante no período todo, o valor desta variável corresponde ao máximo permitido pelos orifícios de restrição do sistema de tubulações da descarga das bacias.

O efeito combinado produzido nas vazões de saída do sistema oleoso e contaminado se vê refletido na vazão do ponto de união fazendo com que as mudanças nesta importante variável sejam sutis, comportamento esse, muito conveniente para o sistema de remoção superficial de óleos. As mudanças fortes nas vazões de chegada podem produzir turbulência na caixa de recepção onde acontece a separação por flotação, diminuindo a efetividade e eficiência deste processo.

Para ilustrar o comportamento das diferentes espécies químicas presentes nestas águas foi escolhido o nitrogênio amoniacal (por ser um componente químico que apresenta grande



criticidade no sistema de tratamento de efluentes, devido as características do próprio efluente), os resultados são apresentados na Figura 4.3.



**Figura 4.3 - Dinâmica do nitrogênio amoniacal no sistema de recepção das águas oleosas e contaminadas**

Legenda da Figura 4.3:

c01: Concentração da espécie na corrente de alimentação de água contaminada.

c02: Concentração na corrente de alimentação de água oleosa

c10s: concentração na saída do sistema de recepção de água oleosa.

c11: Concentração na saída do sistema de recepção de água contaminada e, na união das águas oleosas e contaminada

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

Na Figura 4.3 primeiramente se destaca o caráter aleatório dos sinais de entrada. Na parte superior se encontram os sinais das concentrações na alimentação nas correntes de água oleosa e contaminada. Este último comportamento significa que as concentrações sofrem uma diminuição ao passar pelo sistema. A explicação mais simples é que a diluição é devida a chuva, a qual se supõe que não possui nenhuma das espécies químicas contaminantes.

Outra questão interessante nas variáveis de saída é que a amplitude das variações dos sinais é diminuída sensivelmente devido ao efeito amortecedor dos volumes disponíveis no sistema. Os níveis da variável no ponto de união das duas correntes ficam sempre entre os níveis das duas correntes que lhe deram origem, isso valida essa parte do desenvolvimento do modelo.

Análise dos sistemas de recepção de águas na entrada da unidade de tratamento de efluentes (contaminada e oleosa) foi necessário para que fossem determinadas todas as condições críticas para o sistema, pois o volume inicial de efluentes tem grande impacto sob todo tratamento, a partir da determinação de prováveis cenários extremos foi possível descrever o comportamento futuro do resto do sistema de tratamento.

Os resultados das diferentes simulações do submodelo do sistema de separação água e óleo que serão apresentados foram baseados na utilização da simulação no regime dinâmico, sobre determinados pontos de operação.

Para o tamanho e complexidades das equações dinâmicas deste subsistema, as simulações serão expressas no campo da frequência, (s, variável de Laplace), como funções de transferência, para facilitar a programação. Usando as equações básicas (representadas abaixo) determina-se as relações dinâmicas da relação entre os componentes químicos nas entradas [  $D_{q11}$   $Su_{11}$   $Ci_{11}$   $Od_{11}$   $Og_{11}$   $Na_{11}$   $Fe_{11}$   $Ph_{11}$   $Dq_{21}$   $Su_{21}$   $Ci_{21}$   $Od_{21}$   $Og_{21}$   $Na_{21}$   $Fe_{21}$   $Ph_{21}$  ] e os componentes nas saídas [  $Dq_{22}$   $Su_{22}$   $Ci_{22}$   $Od_{22}$   $Og_{22}$   $Na_{22}$   $Fe_{22}$   $Ph_{22}$  ].

A principal característica que define o comportamento dinâmico é que as constantes de tempo no comportamento de cada componente químico em cada instalação dependem apenas do tempo de retenção, expressado como coeficiente da variável “S” nos denominadores de todas as dependências de componente de saída que diz respeito aos componentes de entrada. Estas constantes de tempo são calculadas com os valores de ponto de operação do volume em cada tanque e dos valores das vazões. Algumas simplificações podem ser feitas nestas equações a partir das relações entre as vazões e das condições consideradas na modelagem. A apresentação dos valores do ponto de operação para a simulação está expressa abaixo. As concentrações nas diferentes etapas do tratamento de efluentes. Na seguinte tabela 4.7 são apresentados os valores tomados obtidos através da realização de análises químicas, para descrever o ponto de operação geral, necessários para a simulação do submodelo.

Os valores dos componentes químicos nos pontos de operação foram resultados de diferentes análises químicas, realizada em laboratórios para caracterização do efluente, estes dados são importantes para desenvolvimento do modelo, pois a partir desses resultados é possível saber as concentrações nas diferentes etapas do tratamento de efluentes.

**Tabela 4.7 - Valores dos pontos de operação dos componentes químicos, pH e vazões**

ENSAIOS ANALÍTICOS.		Valores estimados do ponto de operação				
		Tambor	Tambor	Flotador	Lagoa 1	Lagoa 2
Comp. Químico	Unidade	Entrada	Saída		Entrada	Saída
Cianeto	mg CN/L	0,0100	0,0125	0,0066	0,0100	0,0018
DQO	mgO <sub>2</sub> /L	1.624,00	1.245,00	301,00	14,00	60,80
Fenol	mg/L	5,170	3,900	1,470	0,410	0,048
N Amoniacal	mg N/L	8,47	7,71	3,95	2,95	2,69
Óleos e Graxas	mg/L	243,40	218,00	28,50	5,00	3,00
Oxigênio Dissolvido	mg/L	1,06	0,90	1,06	7,30	7,70
Sulfeto	mg S/L	5,250	2,950	0,268	0,088	0,018
pH	--	7,19	7,27	6,94	7,94	7,26
Vazão (Val. Máximos)	m <sup>3</sup> /h	185	213	210	210	210

Fonte: Relatório técnico “Estudo do Processo da ETE”

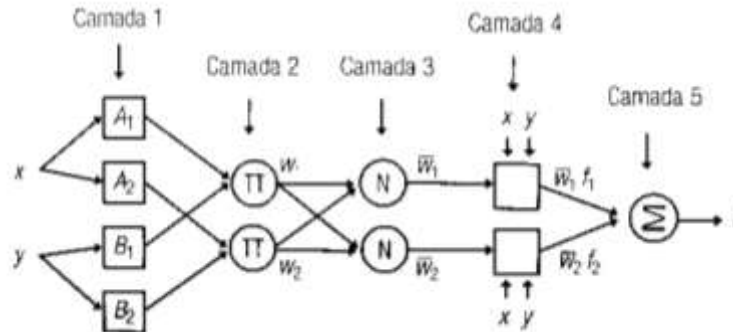
## 4.2. Estrutura e Simulação do modelo inteligente

A estrutura do modelo inteligente utilizada é denominada ANFIS (Adaptive NeuroFuzzy Inference System). O sistema Neuro - Fuzzy ANFIS foi criado inicialmente por Roger Jang, usado com sucesso em aplicações de previsão e aproximação de funções, algumas variações do modelo foi proposta pelo autor permitindo outras aplicações, sendo inserido no software MATLAB (SANCHEZ, 2009).

O método utiliza predominantemente modelos do tipo Takagi - Sugeno (TSK), parametrizados e realizando treinamento por conjugação de técnicas de gradiente e mínimos quadrados. Além disso, mapeia as várias partes de um sistema de inferência fuzzy em uma rede adaptativa chamada feedforward composta por cinco camadas, a qual é treinada de modo supervisionado, usando dado training set (JANG, 2003).

Ao final do treinamento, os parâmetros devidamente ajustados são mapeados inversamente em um sistema fuzzy de estrutura idêntica ao original, que deverá se comportar aproximadamente

como o sistema que gerou o training set utilizado para treinamento, ou seja, as mesmas entradas deverão corresponder às saídas “próximas”. Neste estudo o sistema que gera os dados para treinamento são os modelos fenomenológicos e os valores retirados da base de dados.



**Figura 4.4 - Configuração do modelo ANFIS com duas entradas  $x$  e  $y$  e uma saída  $f$ .**

Fonte: Relatório técnico “Estudo do Processo da ETE”

Na Figura 4.5 é apresentada a configuração básica que foi usada no desenvolvimento do modelo, de forma genérica, a Camada 1 apresenta na saída os graus de pertinência das entradas, baseado na premissa de cada regra, cada entrada tem apenas duas funções de pertinência ( $A =$  alto e  $B =$  baixo). A Camada 2 calcula o grau de pertinência ao qual é submetido o consequente de cada regra. Na Camada 3 é realizada a normalização dos graus de ativação das regras, que são utilizadas como pré-processamento para a defuzzificação. A saída de cada nó é calculada pelo produto da saída normalizada da camada anterior e o grau de ativação do consequente, isto ocorre na Camada 4. A Camada 5 fornece a saída precisa do sistema ANFIS, a defuzzificação que ocorre nessa etapa é facilitada pelo cálculo da camada 3 e 4 (SANCHEZ, 2009).

Como esta estrutura será comum para todas as variáveis, algumas vão depender de mais de duas entradas, normalmente dependerão de 7 ou 8, de acordo com a necessidade do caso, a camada de entrada terá 7 ou 8 entradas similarmente a apresentada no esquema nesta figura.

Embora existam muitas maneiras de programar as ideias citadas, normalmente são usadas ferramentas de software de alto nível, com as facilidades presentes na FuzzyLogic Toolbox do sistema MATLAB (JANG, 2003).

A abordagem usada pela rotina ANFIS segue a mesma linha que outras técnicas de identificação, inicialmente é definida uma estrutura geral parametrizada, de modo a possibilitar o treinamento propriamente dito (JANG, 2003).

O próximo passo é a coleta do conjunto de treinamento, neste caso tomado da base de dados, sob a condição que estes dados refletem o melhor possível todos os aspectos dinâmicos dos processos de tratamento de efluentes, a partir disto serão submetidos os elementos obtidos anteriormente à função ANFIS, que computará os parâmetros do sistema final cujo comportamento deverá ser similar ao do original. Como os dados coletados têm ruído ou erros de medição, isso terá um impacto negativo no comportamento do sistema de inferência fuzzy.

A estrutura aplicada está apresentada na Figura 4.5, onde a modelagem será de forma discreta, tomando um tempo de amostragem de 1 hora. Todos os subprocessos podem se aproximar a sistemas de segunda ordem. Na verdade nenhum processo dos que se executam neste sistema de tratamento de Efluentes tem uma ordem prática superior a dois. Nos subprocessos as entradas têm um efeito imediato nas saídas correspondentes, modulado pela dinâmica da constante de tempo, ou seja, não se considera atraso de transporte direto da entrada e saída. As saídas dos submodelos serão combinações lineares das próprias saídas nos períodos passados e das entradas.

As funções de pertinência foram do tipo campana invertida, esta condição garante a estabilidade da resposta nas posteriores simulações. Foram considerados apenas quatro pontos de medição, onde se desenvolveu os submodelos que fornecerão o comportamento das seguintes variáveis:

- 1) Saída do tambor rotativo;
- 2) Saída do flotador;
- 3) Entrada das lagoas biológicas;
- 4) Saída das lagoas biológicas;

A partir das anteriores considerações o modelo geral para quaisquer submodelo fica da seguinte forma:

if  $y(k)$  é  $\mu_{11}$  e  $y(k-1)$  é  $\mu_{12}$  e  $u(k)$  é  $\mu_{13}$  then  $y_1(k+1) = a_{10} + a_{11}y(k) + a_{12}y(k-1) + b_{11}u_1(k-nT) + \dots + b_{1m}u_m(k-nT)$

if  $y(k)$  é  $\mu_{21}$  e  $y(k-1)$  é  $\mu_{22}$  e  $u(k)$  é  $\mu_{23}$  then  $y_2(k+1) = a_{20} + a_{21}y(k) + a_{22}y(k-1) + b_{21}u_1(k-nT) + \dots + b_{21m}u_m(k-nT)$

.....

if  $y(k)$  é  $\mu_{n1}$  e  $y(k-1)$  é  $\mu_{n2}$  e  $u(k)$  é  $\mu_{n3}$  then  $y(k+1) = a_{n0} + a_{n1}y(k) + a_{n2}y(k-1) + b_{n0}u(k-nT) + \dots + b_{n1}u(k-nT)$

onde:

$y(k)$  representa um dos componentes químicos ou uma vazão em um dos pontos de medição.

$u_i(k)$  representa os componentes químicos e as vazões nos pontos de medição implicados no modelo desenvolvido.

Com este sistema baseado em regras é representado um modelo com apenas uma saída  $y(k+1)$  e uma entrada.

As simulações foram realizadas utilizando um programa composto por expressões dinâmicas, realizado na plataforma Simulink-MATLAB, que é um ambiente de simulação baseado em diagrama de blocos e plataforma para Model-Based Design. O Simulink, desenvolvido pela companhia The MathWorks, é uma ferramenta para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Sua interface primária é uma ferramenta de diagramação gráfica por blocos e bibliotecas customizáveis de blocos. O software oferece alta integração com o resto do ambiente MATLAB, é amplamente usado em teoria de controle e processamento digital de sinais para projeto e simulação multi-domínios (VIEIRA, 2004).

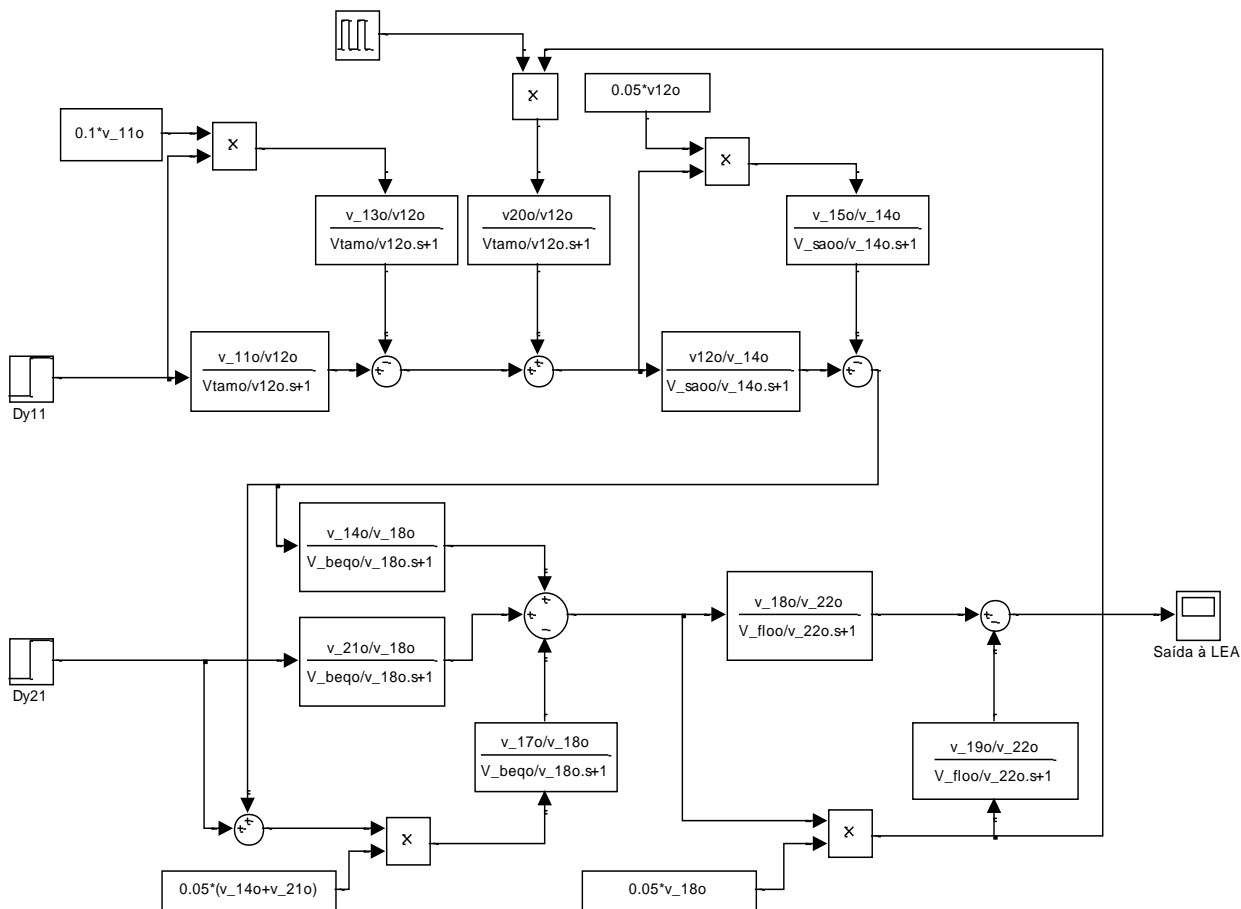


Figura 4.5 - Programa de simulação do subsistema de separação água-óleo

Fonte: HERRERA *et.al*, 2010.

## 5. COMPROVAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

A comprovação dos procedimentos empregados é um passo importante na modelagem inteligente. As primeiras provas dos modelos adaptativos inteligentes foram realizadas com um pequeno conjunto de dados da unidade de tratamento de efluentes, tendo como objetivo fundamental provar a mecânica do modelo e do sistema de identificação dos parâmetros dos modelos. Para a validação do procedimento foi necessário utilizar dados reais coletados em campo ao longo do período experimental para execução das simulações.

Foi necessária a realização de um tratamento dos dados para compactação das informações, os dados foram organizados em matrizes da qual foram retiradas as referências não numéricas aos dias em que não foram feitas medições, o que resultou em um banco de dados com vinte oito variáveis distintas, que representavam cada um das sete substâncias nos quatro pontos de medição, dispostas em colunas e trezentos e sessenta e quatro conjuntos de dados medidos dispostos em linhas. O tamanho do banco de dados era então uma matriz de ordem 364x28.

Optou-se então por dividir o banco de dados em dois intervalos de tempo semelhantes, com o objetivo de se reunir a maior quantidade de dados possível em cada um dos conjuntos, porém, mantendo-se o intervalo de dados semelhante.

A organização dos dados em matrizes foi necessária devido o uso do MATLAB, software destinado a fazer cálculos com matrizes (MATLAB = MATrix LABoratory), trata-se de um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico que integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos em ambiente fácil de usar onde problemas e soluções são expressos somente como eles são escritos matematicamente, ao contrário da programação tradicional (VIEIRA, 2004).

Os dados selecionados foram então reunidos em uma matriz de ordem 236x28 onde cada um dos intervalos são subconjuntos de ordem 118x28 desta matriz, após a escolha dos dados iniciais, desenvolveu-se um algoritmo em MATLAB para a obtenção das correlações entre estes conjuntos de dados. A seguir, fez-se a análise dos valores de correlação entre as variáveis da matriz, a fim de se verificar quais substâncias e em que pontos estas substâncias possuíam uma relação significativa que pudesse gerar dados que servissem de entrada para o modelo a ser desenvolvido.

Considerou-se significativa toda correlação com valor acima de 0,5 ou abaixo de -0,5. As variáveis que apresentaram valor significativo foram reagrupadas em matrizes de ordem 236x2, onde a primeira coluna formada pelo conjunto de medições da substância que foram medidas em um ponto mais próximo do início da sequencia dos processos de tratamento representava a entrada, enquanto a segunda coluna formada pelas medições feitas no ponto mais próximo da saída do sistema de tratamento representava a saída.

Estas matrizes, cujos dados foram considerados representantes do comportamento padrão do sistema, serviram de origem para duas matrizes secundárias de ordem 118x2. A primeira matriz, que compreendia o primeiro intervalo foi utilizada para treinamento do sistema neuro-fuzzy a ser



desenvolvido e a segunda matriz, composta por medições do segundo intervalo, foi utilizada para a avaliação do sistema neuro-fuzzy criado. Faz-se necessário ressaltar que, para cada par de variáveis com correlação significativa, foi desenvolvido um modelo neuro-fuzzy já que o padrão de relacionamento entre as variáveis varia de acordo com o tipo de substância e o ponto em que seu nível de concentração está sendo medida.

O comportamento de uma substância em relação à outra e a relação com ela mesma em um ponto diferente do sistema de tratamento é desconhecido, por isso utilizou-se uma tabela contendo os parâmetros tais como o tipo e o número de funções de pertinência, o tipo de função de pertinência de saída e o número de épocas e resultados, com o valor do erro de treinamento e o de teste dos modelos desenvolvidos na tentativa de se encontrar o melhor modelo que descrevesse o comportamento da relação existente.

A análise dos resultados encontrados foi feita baseada no valor do erro de teste, com relação aos dados de checagem, alcançado pelo modelo obtido. O critério de menor erro foi utilizado para a escolha do melhor modelo.

Como resultado pode citar primeiramente a matriz de correlação obtida. A matriz encontrada foi de ordem 28 e do tipo simétrica, ou seja, o valor  $ixj$  é igual ao valor  $jxi$  da matriz. Notou-se ainda que a matriz possuía na diagonal principal, apenas com valores unitários. Na matriz, as células que representavam uma correlação significativa foram marcadas com preenchimento vermelho, como se pode ver na Figura 5.1.

	DGO	Cigarro	Fenóis	OD	NitrosenTotal	O&G	Sulfato	DGO	Cigarro	Fenóis	OD	NitrosenTot	O&G	Sulfato	DGO
	teste01	teste02	teste03	teste04	teste05	teste06	teste07	teste01	teste02	teste03	teste04	teste05	teste06	teste07	teste01
DGO	teste01	0,011996	0,132175	-0,05728	0,077370003	0,286367	0,031088	0,100426	0,026299	-0,02194	-0,13208	0,122596	-0,04274	-0,0416	0,023377
Cigarro	teste02	0,051966	1	0,032815	-0,1365	-0,170046633	-0,07636	0,243162	-0,00256	0,234362	0,006074	0,186605	0,084026	0,045608	-0,00185
Fenóis	teste03	0,132175	0,032815	1	-0,46886	0,14618218	0,008544	0,460036	0,008	-0,07767	0,038903	-0,00747	0,00657	0,01638	0,026608
OD	teste04	-0,05728	-0,1365	-0,46886	1	-0,436330175	-0,04117	-0,77967	0,171853	-0,1467	-0,06818	-0,00323	-0,36148	0,006108	0,142147
NitrosenTotal	teste05	0,07737	0,17405	0,142147	-0,43423	1	0,166172	0,455096	-0,04011	0,008744	0,081807	0,00052	0,00543	-0,00548	0,207412
O&G	teste06	0,286367	-0,07636	0,008544	-0,04117	0,166172	1	-0,00262	-0,00246	-0,01006	-0,01475	-0,00225	0,045425	0,006315	-0,02746
Sulfato	teste07	0,031088	0,243162	0,460036	-0,27962	0,432066221	-0,00262	1	0,106428	-0,0064	0,003333	0,19637	0,182201	-0,0008	0,37642
DGO	teste01	0,100426	0,026299	0,0085	0,121823	-0,048107728	-0,00246	0,106428	1	-0,04232	-0,0588	0,27847	-0,00486	-0,02925	-0,01015
Cigarro	teste02	0,243162	0,243162	-0,27967	-0,1467	0,088743788	-0,01006	-0,0494	-0,04232	1	0,01047	0,001911	0,018386	0,132206	-0,00471
Fenóis	teste03	-0,07767	0,038903	0,038903	-0,00854	0,081800285	-0,01475	0,003333	-0,0588	0,01047	1	-0,10486	0,077464	-0,00824	0,024382
OD	teste04	-0,1467	-0,06818	-0,00323	-0,00323	-0,00613265	-0,00225	-0,10637	-0,27967	0,001911	-0,10486	1	-0,13462	0,019082	-0,00425
NitrosenTotal	teste05	0,17405	0,00854	0,00854	-0,26148	0,166172	0,455096	0,166172	-0,04011	0,008744	0,081807	0,00052	1	0,008417	0,204023
O&G	teste06	-0,04274	0,045608	0,01638	0,006108	-0,00225	-0,00246	-0,00246	-0,00246	0,106428	-0,0064	0,003333	0,19637	0,182201	1
Sulfato	teste07	-0,0416	-0,00185	0,026608	0,142147	0,207412	0,00246	0,106428	-0,04232	0,01047	0,001911	0,018386	0,132206	-0,00471	0,37642
DGO	teste01	0,023377	0,331871	0,011482	0,088583	0,041635744	-0,04232	0,200268	0,000003	0,000003	-0,00367	0,207388	-0,00425	-0,00023	0,127888
Cigarro	teste02	0,03366	0,00648	-0,00914	-0,05337	0,127919277	-0,04896	0,016308	0,04818	0,32228	-0,00388	0,01191	0,000007	0,072262	-0,02178
Fenóis	teste03	-0,04724	0,182386	0,020465	-0,04472	-0,152129996	-0,03549	0,230986	0,136028	-0,05727	0,042086	-0,02299	0,157362	-0,04276	0,371434
OD	teste04	-0,12823	0,12456	-0,14788	0,182386	-0,166888888	-0,18188	-0,16438	0,003041	0,103577	-0,00101	0,029488	-0,18045	0,025778	-0,02801
NitrosenTotal	teste05	0,054148	0,136295	0,020465	-0,24011	0,103777022	0,043045	0,21875	-0,00363	0,133523	0,049665	-0,00546	0,100584	0,236257	0,000033
O&G	teste06	-0,00899	0,078168	0,078926	-0,04175	-0,074825748	-0,03008	0,00445	-0,0781	0,170218	-0,01548	0,00687	0,115184	0,172236	-0,00445
Sulfato	teste07	-0,00746	0,018206	-0,04038	0,27204	-0,017543266	0,005837	0,095313	-0,0374	0,000214	0,013078	0,00677	0,008707	0,029402	0,221442
DGO	teste01	-0,13433	0,194824	-0,05888	0,200036	-0,041638821	-0,05263	-0,00323	0,007028	0,032488	-0,01482	0,196538	0,074879	0,026438	0,184814
Cigarro	teste02	-0,12823	0,25678	-0,00433	0,108404	-0,002431857	-0,00604	-0,00366	-0,10486	0,209902	0,105646	0,137527	0,119463	0,008438	0,386108
Fenóis	teste03	-0,05025	0,004774	-0,02336	0,001422	0,01303334	0,005724	0,011965	0,00361	0,025996	0,000137	0,012218	-0,00718	-0,00442	0,070254
OD	teste04	0,041428	-0,07306	-0,05483	-0,02824	-0,100910284	-0,12718	0,078668	0,188918	-0,00647	-0,04623	0,006835	-0,15478	-0,02317	-0,17025
NitrosenTotal	teste05	-0,04805	0,047466	0,012832	-0,037731	0,231181154	-0,03433	-0,04813	-0,07304	0,0004827	-0,07324	0,117509	0,173077	-0,00048	0,094388
O&G	teste06	0,03122	0,052703	-0,01368	-0,02567	0,022471263	0,004158	-0,01188	-0,00047	0,032773	0,032588	0,023562	-0,03187	0,007442	0,022346
Sulfato	teste07	-0,10049	0,36398	-0,04028	0,129947	0,081277164	0,004734	-0,02831	-0,14192	0,103334	0,026346	0,246777	0,136883	0,057514	0,307367

**Figura 5.1 - Auto-correlação e correlação cruzada entre algumas das variáveis**

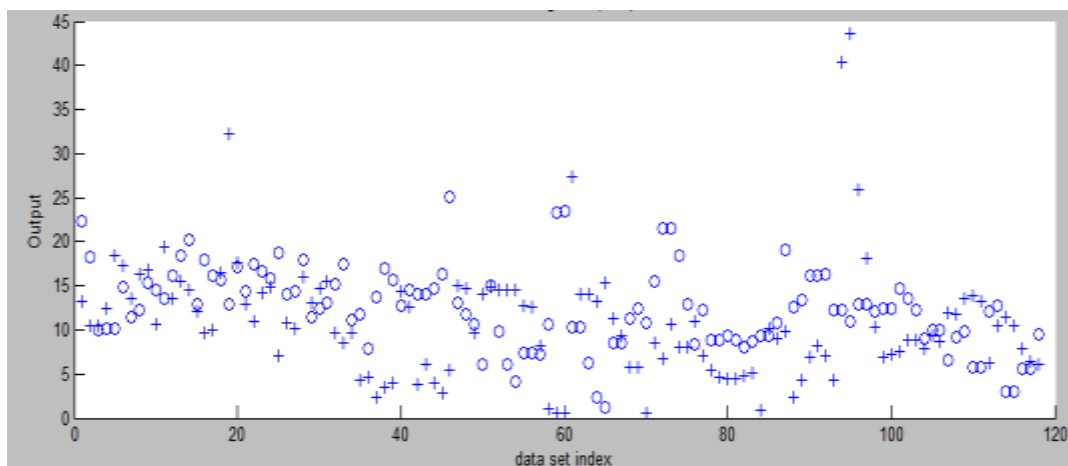
A partir da análise da matriz de correlação, foi feita a modo de exemplo, a Figura 5.2 representada abaixo, que relaciona o valor das correlações significativas encontradas com os parâmetros químicos com seus respectivos pontos de medição.

<b>Substância</b>	<b>Local de medição</b>	<b>Substância</b>	<b>Local de medição</b>	<b>Referência adotada</b>	<b>Correlação</b>
Nitamon Total	tambor	Nitamon Total	flotador	t5f5	0,599837507
Nitamon Total	tambor	Nitamon Total	lagoa	t5l5	0,623773223
Nitamon Total	flotador	Nitamon Total	lagoa	f5l5	0,765329483
O&G	flotador	O&G	lagoa	f6l6	0,912284457
Sulfeto	flotador	Sulfeto	lagoa	f7l7	0,722443063

**Figura 5.2 - Relação das principais correlações encontradas**

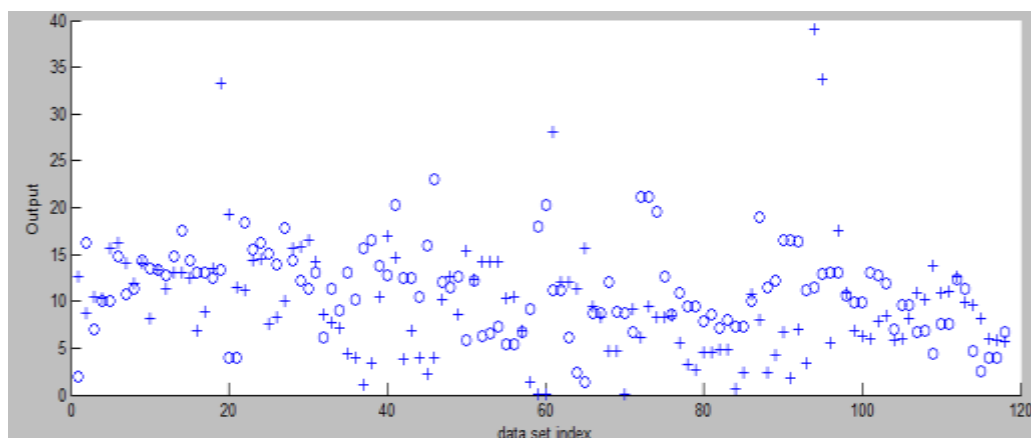
Notou-se que os maiores índices de correlação encontrados foram entre a mesma substância medida em pontos diferentes do sistema, que foi o Nitrogênio Amoniacal total, que já demonstra a existência de algum padrão nos resultados dos processos de tratamento dos efluentes, confirmando os resultados da modelagem fenomenológica. Foi observado ainda que a substância Nitamon Total apresenta significativo nível de correlação ao longo de todo o sistema de tratamento, conforme a proximidade dos valores demonstrados na Figura 5.2.

A validação e os dados de treinamento dos modelos são apresentados através da Figura abaixo. Nos gráficos, são representados os dados do conjunto de treinamento, (+) representa os dados do conjunto de validação e (\*) os dados de saída do modelo obtido.



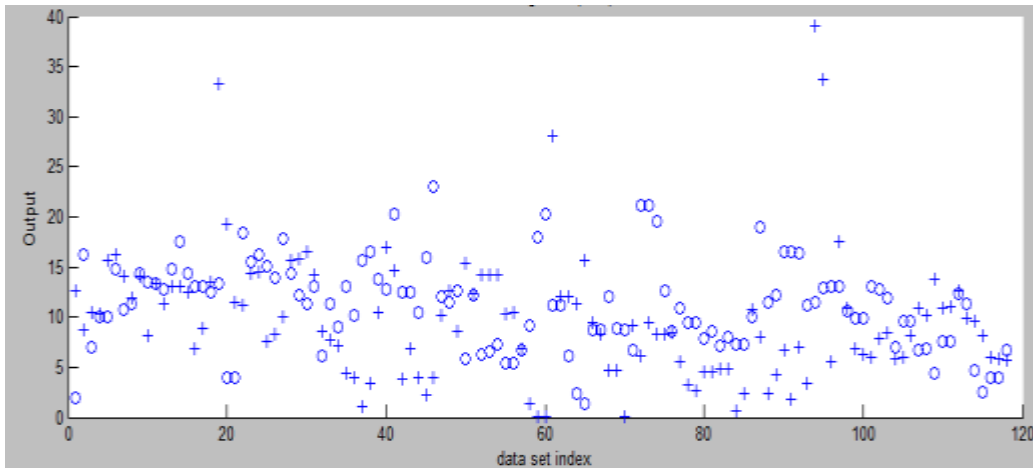
**Figura 5.3 - Dados de treinamento e validação do modelo obtido**

Os dados apresentados na Figura 5.3 demonstram a validação do modelo obtido através da proximidade dos valores de correlação obtidos nos testes e treinamentos, além disso, mostram a efetividade dos resultados obtidos.



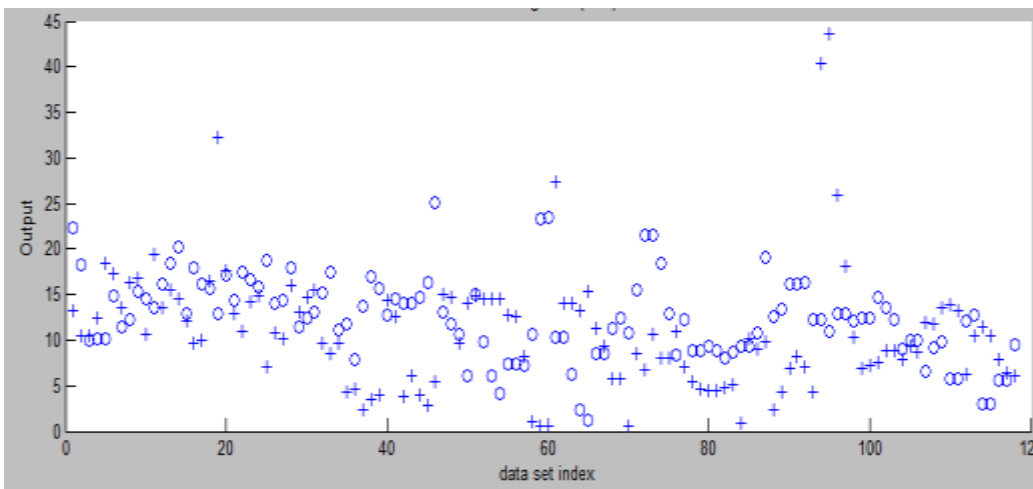
**Figura 5.4 - Dados de treinamento e validação do modelo (t515)**

A figura 5.4 mostra o desempenho do modelo identificado como t515, em demonstrar a correlação desejada realizada para o componente químico Nitrogênio Amoniacal total, que compõe o efluente analisado, o resultado obtido foi satisfatório, pois foi observado que a correlação entre os pontos de medição e os componentes químicos analisados, apresentou menor erro sendo satisfatórios os resultados.

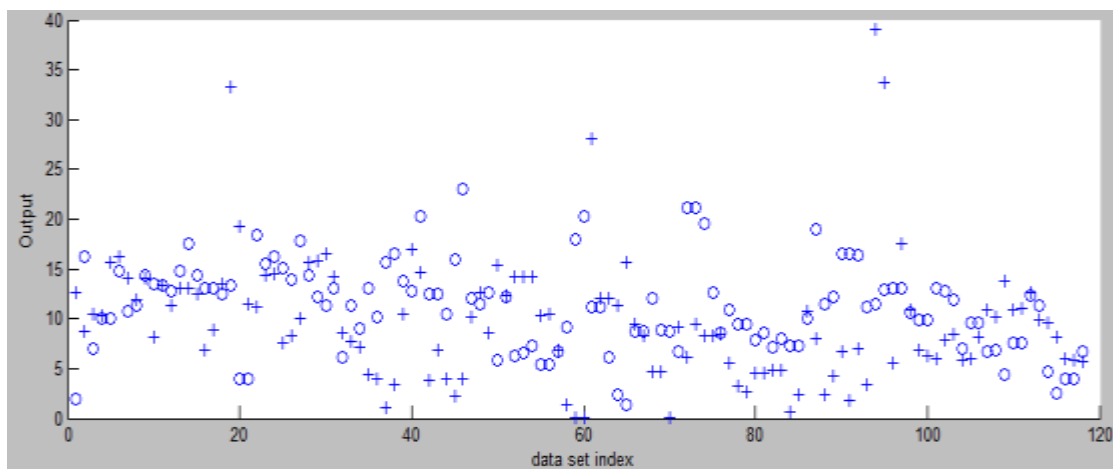


**Figura 5.5 - Dados de treinamento e validação do modelo (f515)**

Assim como na Figura 5.4 os dados apresentados na Figura 5.5 também apresentaram uma boa correlação entre os componentes químicos analisados e os pontos de medição



**Figura 5.6 - Dados de treinamento e validação do modelo (f616)**



**Figura 5.7 - Dados de treinamento e validação do modelo (f717)**

Na Figura 5.6 e 5.7 os dados do componente químico Óleos e Graxas também apresentaram resultados de validação satisfatórios, com menor valor de erro. Foram considerados os componentes químicos Óleos e Graxas e Nitrogênio Amoniacal total por apresentarem maior criticidade no processo de tratamento de efluentes.

Ao analisar os gráficos dos dados de treinamento e validação que foram utilizados nos cinco modelos obtidos, foi possível constatar que os dados pertencentes aos dois conjuntos estão em um intervalo de valores semelhantes, o que demonstrou a efetividade da escolha dos conjuntos iniciais. Os modelos encontrados utilizaram função do tipo linear e otimização com backpropagation.

O algoritmo utilizado foi do tipo linear de otimização para treinamento de redes em multicamadas baseado no aprendizado supervisionado por correção de erro, denominado backpropagation. Estes são sistemas do tipo RNA (Redes Neurais Artificiais) e tem como principal objeto o aprendizado supervisionado de determinada rede dada uma série de padrões, em outras palavras é possível desenvolver um software capaz de aprender, dado os padrões a ele ensinados, calculando os valores sem que sejam programados explicitamente (CARVALHO, 2000).

O treinamento é a atividade que leva a rede ao aprendizado, é chamado de algoritmo de aprendizado um conjunto de regras bem definidas para a solução de um problema de aprendizado. Existem muitos tipos de algoritmos de aprendizados específicos para determinados modelos de redes neurais, estes algoritmos diferem entre si principalmente pelo modo como os

pesos são modificados. Aprendizagem para uma rede neural envolve o ajuste desses pesos (CARVALHO, 2000).

A principal vantagem em se usar o backpropagation é que ele trabalha com multicamadas e resolve problemas “não linearmente separáveis” que alguns algoritmos não resolvem. São chamados de multicamadas, pois possuem no mínimo 3 camadas (CARVALHO, 2000).

De forma geral o backpropagation funciona da seguinte forma, durante o treinamento a rede opera em uma sequência de dois passos, no primeiro o padrão é apresentado à camada de entrada da rede. A atividade resultante flui através da rede, camada por camada, até que a resposta seja produzida pela camada de saída. No segundo passo, a saída obtida é comparada a saída desejada para esse padrão particular. Se não estiver correta o erro é calculado. O erro é propagado a partir da camada de saída até a camada de entrada e os pesos das conexões das unidades das camadas internas vão sendo modificadas conforme o erro é retropropagado (CARVALHO, 2000).

As redes que utilizam backpropagation trabalham com uma variação de regra delta apropriado para redes multicamadas: regra delta generalizada. A regra delta padrão essencialmente programa um gradiente descendente no quadrado da soma do erro para funções de ativação lineares. Redes sem camadas intermediárias podem resolver problemas onde a superfície de erro tem a forma de um parabolóide com apenas um mínimo (CARVALHO, 2000).

Depois que a rede estiver treinada e o erro estiver em um nível satisfatório, ela poderá ser utilizada como ferramenta para classificação de novos dados, para isso a rede deverá ser utilizada apenas no modo progressivo (feed-forward), ou seja, novas entradas são apresentadas à camada de entrada, são processadas nas camadas intermediárias e os resultados são apresentados na camada de saída como no treinamento, mais sem a retropropagação do erro. A saída apresentada é o modelo dos dados na interpretação da rede (CARVALHO, 2000).

A primeira escolha da saída do tipo linear deveu-se ao fato de que apesar dos modelos baseados neste tipo de saída e no tipo constante possuem desempenho semelhante em relação à redução do erro de validação, os modelos que usavam este último tipo exigiam uma carga computacional muito maior, muitas vezes exigindo o dobro ou o triplo da quantidade de épocas utilizadas pelo modelo com saída linear (HERRERA *et.al*, 2011).

A escolha da utilização da otimização com backpropagation deveu-se não só ao melhor desempenho desse método como à “constância” maior do resultado. Quando foi utilizado o método de otimização do híbrido não foi possível identificar um padrão no comportamento do

modelo, a eficiência do modelo variava muito e de forma irregular. Ao utilizar o método do backpropagation, foi possível até mesmo identificar pequenos padrões de comportamento do modelo que auxiliaram na descoberta do melhor modelo.

Na Figura 5.8 são apresentados os resultados dos modelos obtidos utilizando algoritmos backpropagation para cada relação significativa, os erros de treinamento e validação dos modelos de cada modelo analisado apresentaram valores variados, porém todos se mostraram válidos e com resultados satisfatórios.

<b>Referência adotada</b>	<b>Tipo de função de pertinência</b>	<b>Qtd. de funções de pertinência</b>	<b>Tipo de função de saída</b>	<b>Qtd. de épocas</b>	<b>Método de Otimização</b>	<b>Erro de treinamento</b>	<b>Erro de validação</b>
t5f5	gaussmf	60	linear	275	backpropagation	3,7325	5,4721
t5l5	gauss2mf	10	linear	120	backpropagation	3,6985	5,2321
f5l5	gbellmf	5	linear	215	backpropagation	2,82	2,5281
f6l6	gbellmf	5	linear	70	backpropagation	5,0487	5,0781
f7l7	pimf	4	linear	150	backpropagation	3,5468	5,0615

**Figura 5.8 - Resumo dos modelos obtidos**

## 6. CONCLUSÕES

Os resultados apresentados comprovaram a possibilidade de encontrar um modelo geral ou híbrido para representar os comportamentos estático e dinâmico dos processos que se executam em uma unidade de tratamento de efluentes com as características apresentadas pelo efluente originado do processamento de petróleo.

Os modelos e submodelos foram determinados especificamente para poder estabelecer um modelo base de simulação para processos de Tratamento de Efluentes, porém os modelos apresentados são gerais e podem ser ajustados para quaisquer variáveis que apresente maior necessidade de acompanhamento, pelo grau de criticidade apresentado ao processo de tratamento.

Aos modelos obtidos podem ser aplicados dados reais, de forma *online*, para a determinação em tempo real de seu comportamento. Para isso é necessário à utilização de uma base de dados (composta pelos dados relativos ao processo) que esteja conectada ao programa de simulação, para obter automaticamente os dados que sejam necessários em cada rodada dos programas ou estes dados para a realização da simulação podem ser inseridos manualmente, permitindo a obtenção de qualquer cenário desejado, proporcionando maior confiabilidade ao processo de tratamento, pois assim é possível tomar ações preventivas contra problemas e distúrbios operacionais que possam causar o não atendimento dos limites legais de devolução de efluentes ao corpo hídrico.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amor, L., Eiroa, M., Kennes, C., Veiga, M.C., 2005. Phenol biodegradation and its effect on the nitrification process. *Water Research* 39, 2915–2920.

Andrews, J. F., 1968. A mathematical model for the continuous culture of microorganisms utilizing inhibitory substrates. *Biotechnology and Bioengineering* 10, 707–723.

Aguirre, L.A. 2007. Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais. 3<sup>o</sup> edição rev. e ampl. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 9648: (1986) Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário Procedimento, Rio de Janeiro.

Barber, W.P. and Stuckey, D.C., 2000, Nitrogen removal in a modified Anaerobic Baffled Reactor (ABR): 1, Denitrification, *Water Res*, 34:2413–2422.

Bing-Jie N., Fang Fang, Wen-Ming X., Han-Qing Y. 2008. Growth, maintenance and product formation of autotrophs in activated sludge: Taking the nitrite-oxidizing bacteria as an example. *Water Research* 42: 4261 – 4270.

Benjamin, S., Magbanua Jr., Bowers, A.R., 2006. Characterization of soluble microbial products (SMP) derived from glucose and phenol in dual substrate activated sludge bioreactors. *Biotechnol. Bioeng.* 93, 862–870.

Bohlin, T. 2006. Practical grey-box process identification theory and applications (Vol. XX). Springer.

Boskovic J.D., Narendra K.S. 1995 “Comparison of linear, non-linear and neural-network based adaptive controllers for a class of fed-batch fermentation processes”. *Automatica*, Vol 31 No. 6, p. 817-840 .

Braile, P. M. 1989. Manual de tratamento de águas residuárias industriais. CETESB, São Paulo, 1979 CETESB. Operação e manutenção de lagoas anaeróbias e facultativas. Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental, São Paulo, 91p.

Cameron, I., Hangos, K. 2001. *Process Modelling and Model Analysis (Process Systems Engineering)*. Academic Press. Cap. 18 (Computer Aided Modelling)

Campos, J. R. 1999. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. PROSAB/ FINEP, Rio de Janeiro.

Codrons, B. 2005. *Process modelling for control - A unified framework using standard black-box techniques (Vol. XXXIII)*. Springer.

Carvalho, A.P.L. 2000, Home Page: “Percepção Multicamadas”. Departamento de Ciências da Computação. USP-SP. <http://www.icmc.sc.usp.br>. Consulta em: 19/08/2015

Dasha, R. R., Gaur, A., Balomajumder, C. 2009. Cyanide in industrial wastewaters and its removal: A review on biotreatments. *Journal of Hazardous Materials* 163: 1–11.

Fica-Piras, P. R. 2002. Estimacão de parâmetros na remoo de nitrogênio amoniacal em efluentes industriais mediante biorreatores trifásicos. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Vol. 2, 388-95, Recife.

Fang, H. H. P., Zhou, G.M., 1997. Denitrification of phenolic wastewater by immobilized sludge. *Environmental Technology* 18, 827–834.

Ferreira Filho, S. S.; Além Sobrinho, P. 1998. Considerações sobre o tratamento de despejos líquidos gerados em estações de tratamento de água. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. v.3, n.5, p.128 – 136. Rio de Janeiro.

Furumai H, Rittmann B.E. 1992. Advanced modeling of mixed populations of heterotrophs and nitrifiers considering the formation and exchange of soluble microbial products. *Water Sci Technol* 26(3-4), 493-502.

Golla PS, Overkamp TJ. 1990 Simple solutions for steady-state biofilm reactors. *Journal of Environmental Engineering* 116 (5), 829-36.

Guisasola, A., Jubany, I., Baeza, J.A., Carrera, J., Lafuente, J., 2005. Respirometric estimation of the oxygen affinity constants for biological ammonium and nitrite oxidation. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 80, 388–396.

Herrera, F.B., et.al., 2010. Estudo do Processo da ETI. Relatório Técnico.

Herrera, F.B., et.al., 2011. Estrutura dos modelos e do processo de modelagem, relatório parcial do modelo tecnológico das instalações (modelos mecânicos, químicos e biológicos). Relatório Técnico.

Jang, J-S.R., 1993. ANFIS, Adaptive Network Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, v. 23, no. 3, p. 665-685.

J.C. Lee, H. Wathington, Multipurpose system, in: *Proceedings of the Chemical Engineers Symposium Series No. 38, Vol. I, 1974, Paper B2, Institute of Engineers, London.*

Johansen, T. A.; Shorten, R. e Murray-Smith, R. 2000. On the interpretation and identification of dynamic Takagi-Sugeno models. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(3):297–313.

Lima, A. F. 1996. Caracterização e estudo cinético da bioconversão da matéria orgânica dissolvida em efluente da Petrobrás no Rio Grande do Norte. Dissertação (Mestrado em ciências da Engenharia Química) 136p. Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Lith, P.J., et.al., 2002. A structured modelling approach for dynamic hybrid fuzzy-first principles models, *Journal of Process Control*, 12, pp. 605-615.

Lith, P.J. 2002. Hybrid fuzzy-first principles modeling. Twente University press, Enschede.

Löfberg, J. 2004. YALMIP : A toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In *Proceedings of the CACSD Conference*, Taipei, Taiwan.

Mozelli, L.A. 2008. Controle Fuzzy para sistemas Takagi-Sugeno: Condições Aprimoradas e aplicações. 99 f. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica) – UFMG, Belo Horizonte.

Machado, A., *et. al.* 2007, Inteligência computacional. Aplicada à administração, economia e engenharia em MATLAB. Thomson Learning, São Paulo.

Mariano, J. B. 2001. Impactos Ambientais do Refino de Petróleo. (Dissertação de Mestrado Ciências), COPPE/UFRJ; Rio de Janeiro.

Martínez, B.L., 2008 “Identificación borrosa de sistemas no lineales mediante algoritmo de agrupamiento incremental con aplicación a un proceso fermentativo” Tesis de Grado Doctoral. Universidad Central “Marta Abreu” de las Villas, Cuba.

Marques, José Roberto. 2005. Meio Ambiente Urbano. Rio de Janeiro/RJ: Ed. Forense Universitária.

Menezes, C.T.B., Leal Filho, L.S., Santo, E.L., Rubio, J., da Rosa, J.J., Galatto, S.L., Izidoro, G., 2004. Tratamento de drenagem ácida de mina: experiência da carbonífera Metropolitana. XX

Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, Florianópolis-Brazil, vol. 2, pp. 599–607 (in Portuguese).

Muniz, L. 2008. A operação do biodrum. Relatório Técnico.

Muñoz, W., *et. al.*, 2006 “ Estimación de variables de operación de un biorreactor con células”. Rev. Fac. Nac. Agr. Medellín, vol. 59, No. 2, p. 3467-3478. 2006

Mussati, M., Aguirre, P. e Scenna, N. 1999. Modelado, Simulación y Optimización de Procesos Químicos. En: Capítulo XVIII- modelado del proceso de digestión anaeróbica en reactores simples. ISBN: 950-42-0022-2 – (1999).

Nelles, O. (2001). Nonlinear system identification. Springer. Berlin. 2001

Nolasco, D., Helou, L. C. (1998), Emprego de Modelos Dinâmicos em Projetos e Otimização de Estações de Tratamento de Águas Residuárias. Engenharia Sanitária e Ambiental, Rio de Janeiro, vol. 3, Nº 3 e 4, p.103-112, Out/Dez 1998.

Oliveira, R. C. G.; Oliveira, M. C. K. 2000. Remoção de contaminantes tóxicos dos efluentes líquidos oriundos da atividade de produção de petróleo no mar. Bol. Tec. Petrobras. v.43, n.2, p129-136.

Psichogios, D.C, Ungar, L.H., 1992. A hybrid neural network - first principles approach to process modelling, AIChE J. 38 (10) pp. 1499–1511.

Roffel, B., Betlem, B.H.L., 2006. Process Dynamics and Control. Modeling for control and prediction. John Wiley & Sons, Ltd

Roubos, J.A., *et. al.*, 1999. Hybrid model development for fed-batch bioprocesses; combining physical equations with the metabolic network and black-box kinetics, 6th UK Workshop on Fuzzy Systems, Brunel University, Uxbridge, UK, pp. 231–9.

Rubio, J., Santander, M., 1997. Oil/water emulsions separation by induced air carrier flotation. In: 5th Southern Hemisphere Meetings on Mineral Technology, Buenos Aires, May 6–9, Proceedings, pp. 125–128.

Sanchez, C.E.M. 2009. Controle por aprendizado acelerado e neuro-fuzzy de Sistema servo hidráulico de alta frequência. 130 f. (Dissertação de mestrado em Engenharia Mecânica). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro 2009.

Santiago, V. M. J., Spier, M. J., Coimbra de Almeida, J. H., Santa Anna, L. M. M., Waschburger, R. L. 2000. Remoção de amônia em lagoas aeradas promovida por inoculação contínua de bactérias nitrificantes produzidas em reator de biomassa fixa, rotativo - caso REFAP. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Sevaljevica, M., Stanojevic, M., Simic, S., Pavlovic, M. 2009. Thermodynamic study of the aeration kinetic in treatment of refinery waste water in bio-aeration tanks. Desalination 248 (2009) 941–960.

Sugeno, M. e Kang, G. T. 1986. Structure identification of fuzzy model. Fuzzy Sets and Systems, 28:329–346.

Takagi, T. e Sugeno, M. 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 15(1):116–132.

Tanaka, K. e Wang, H. O. 2001. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. John Wiley & Sons.

Tanscheit, R.; Gomide, F. e Teixeira, M. C. M. 2007. Modelagem e controle nebuloso. In Aguirre, L. A., editor, Enciclopédia de Automática: Controle & Automação, volume 3, pp. 283–324. Blucher.

Teixeira, M. C. M. e Assunção, E. 2007. Extensões para sistemas não-lineares. In Aguirre, L. A., editor, Enciclopédia de Automática: Controle & Automação, volume 1, pp. 218–246. Blucher.

Thompson, M.L., Kramer, M.A. 1994. Modeling chemical processes using prior knowledge and neural networks, *AIChE J.* 40 (8) pp. 1328–40.

Tocchetto, M. R. L.; Pereira, L. C. 2007. Reuso de água em atividades industriais de alto impacto ambiental e a conservação de recursos naturais. *Revista Brasileira de Agroecologia.* v.2, n.1. Porto Alegre.

Toyoda, M., Moriya, K., Aizawa, J., Konno, H., Inagaki, M., 1999. Environmental Technology for Oil Spills. In: Hupka, Miller (Eds.). Technical University of Gdansk, Gdansk, pp. 139–142.

UNEP (1987); Environmental Management Practices in Oil Refineries and Terminals – An Overview; United Nations Environment Programme: Paris, 1987.

Vasiliadou, I.A., Tziotzios, G., Vayenas D.V. 2008. A kinetic study of combined aerobic biological phenol and nitrate removal in batch suspended growth cultures. *International Biodeterioration & Biodegradation* 61, 261–271.

Van Can H.J.L., et. al. 1999. “An efficient model development strategy for bioprocess based on neural networks in Macroscopic balances: part II” *Biotechnology and Bioengineering*, Vol 62, No. 6, p. 666-680, March, 1999.

Van Ham, N.J.M., Behie, L.A., Svrcek, W.Y., 1983. The effect of air distribution on the induced air flotation of fine oil in water emulsions. *Canadian Journal of Chemical Engineering* 61 (4), 541–547.

van Lith, P.F. 2002. Hybrid Fuzzy First Principles Modeling, University of Twente.

Vieira, J.M.N. 2004. Matlab num instante. Disponível em: [http://www.ieeta.pt/vieira/Matlab num instante](http://www.ieeta.pt/vieira/Matlab%20num%20instante). Consulta em: 18/08/2015

Von Sperling, M. 2005. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol. 1. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG. 3ª ed. Belo Horizonte, 2005.

Von Sperling, M. 2005. “Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos”. Vol. 1, 3ª . edição, DESA, Ed. UFMG.

Zeng, K.; Zhang, N.-Y. e Xu, W.-L. 2000. A comparative study on sufficient conditions for Takagi-Sugeno fuzzy systems as universal approximators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(6):773–780.

Zhou, S.; Lam, J. e Zheng, W. X. , 2007. Control design for fuzzy systems based on relaxed nonquadratic stability and  $H_\infty$  performance conditions. *IEEE Transactions on FuzzySystems*, 15(2):188–199.

Ying, H. 2000. General SISO Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent are universal approximators. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(6):91–107.



## **ANEXOS**

### **Anexo 1 – Abreviaturas**

ETE - Estação de Tratamento de Efluentes

API - (American Petroleum Institute)

OD - Oxigênio Dissolvido

O&G - Óleos e Graxas

DQO - Demanda Química de Oxigênio

PEAD - Polietileno de Alta Densidade

SAO - Separação de Água e Óleo

BAC - Bacia de Água Contaminada

BAO - Bacia de Água Oleosa