

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**APLICAÇÃO DO SISTEMA DIFUSO NA ESTIMATIVA DE  
CLOROFILA a**

**Ludimila Guimarães de Lara Pinto**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

**Universidade Federal de Santa Catarina  
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**APLICAÇÃO DO SISTEMA DIFUSO NA ESTIMATIVA DE  
CLOROFILA a**

**Ludimila Guimarães de Lara Pinto**

**Trabalho apresentado à Universidade  
Federal de Santa Catarina para Conclusão  
do Curso de Graduação em Engenharia  
Sanitária e Ambiental.**

**Orientadora  
Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cátia Regina Silva de Carvalho Pinto**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**

**APLICAÇÃO DO SISTEMA DIFUSO NA ESTIMATIVA DE CLOROFILA a**

**LUDIMILA GUIMARÃES DE LARA PINTO**

**Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental–TCC II**

**BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Cátia Regina Silva de C. Pinto**  
(Orientadora)

---

**Eng.<sup>o</sup> MSc. Júlio César Leão**  
(Co-orientador)

---

**Eng.<sup>a</sup> Lorena Alves Claramunt da Silva.**  
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)  
NOVEMBRO/2007**

Dedico este trabalho a memória do meu avô José Loureiro, uma pessoa muito querida na minha vida.

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelo amor incondicional e incentivo em todos os momentos.

Aos meus irmãos, pelo carinho e compreensão, em especial Mariele e Marcel pela colaboração na fase final do trabalho.

Ao meu namorado Guilherme, pelo amor, carinho e apoio.

À Professora Dr. Cátia, pela orientação, sugestões e imediato atendimento em todas as ocasiões.

Ao Eng.º Júlio Leão, por todos os ensinamentos, co-orientação descontraída e bem humorada, amizade e ajuda na elaboração desse trabalho.

À Eng.ª Lorena, pela amizade, ensinamentos e por prontamente se dispor a participar da banca.

Ao Consórcio ENERCAN, pela concessão dos dados para calibração do sistema.

A todos, que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

## RESUMO

A qualidade da água bruta tem piorado ao longo dos anos devido, principalmente, às atividades antrópicas que causam o aumento da fertilização de lagos e represas. Em decorrência disso, pode haver a floração do fitoplâncton com espécies que podem causar interferências na qualidade das águas. Algumas dessas espécies de algas produzem toxinas que causam riscos à saúde humana e ao meio ambiente, podendo ainda causar mortandades de peixes e outros organismos. A necessidade do controle dos eventos de florações tem incentivado o desenvolvimento de pesquisas para compreender melhor o fenômeno bem como desenvolver ferramentas para auxiliar no prognóstico. Neste sentido, o sistema difuso proposto neste trabalho pode exercer essa função já que modela o comportamento da clorofila *a*, um pigmento fotossintético comum a todos os grupos de algas que é considerado um bom representante da abundância total dos organismos fotossintetizantes. Os sistemas difusos são capazes de identificar relações não lineares complexas, baseando-se somente num conjunto de dados observados e permitem representar, também, expressões qualitativas ou descritivas, tais como "quente" ou "frio", incorporadas em frases simbólicas que são mais naturais e intuitivas do que equações matemáticas. As variáveis de entrada utilizadas no sistema difuso foram: nitrogênio inorgânico, fosfato, temperatura, pH e transparência (profundidade de Secchi); e de saída a clorofila *a*. Foram testados diferentes tipos de inferência e agregação do sistema Mandani além dos diferentes métodos de defuzzificação. Para a calibração do sistema foram utilizados os resultados do monitoramento da qualidade da água do reservatório da usina hidrelétrica de Campos Novos – SC, obtidos no período de dez/06 a out/07. Ainda foram utilizados experimentos computacionais para testar a eficiência do sistema desenvolvido.

Palavras-chave: sistema difuso, clorofila *a* e eutrofização.

## ABSTRACT

The quality of water has aggravated during the years due to human activities that bring the fertilization of lakes and reservoir. Consequently, bloom phytoplankton can produce potent toxins that cause harm in the other ways. Impacts from the bloom of toxic algae are many and diverse, ranging from the death or illness of humans and dead fish. In view of this fact, the necessity of alternatives tools to control blooms becomes evident. In this context, the fuzzy systems proposed in this work can model the chlorophyll *a* evolution. Fuzzy systems are capable of identifying complex non linear relation based only on observed data set and allows for descriptive or qualitative representation of expressions such as "hot" or "cold", incorporating symbolic statements that are more natural and intuitive than mathematical equations. The following physical and chemical variables were used in the system: inorganic nitrogen, phosphates, water temperature, pH, transparency (Secchi depth) and chlorophyll *a*. Samplings were carried out in the period of December 2006 to October 2007 in the freshwater reservoir Campos Novos, Santa Catarina. Were tested different types of implication and aggregation Mandani systems beyond defuzzification modes. Even were used computer experiments to test the system efficiency.

Key-words: Fuzzy systems, chlorophyll *a* and eutrophication.

## SUMÁRIO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>1</b>  |
| <b>2. JUSTIFICATIVA</b> .....   | <b>2</b>  |
| <b>3. OBJETIVOS</b> .....   | <b>2</b>  |
| 3.1 OBJETIVO GERAL .....  | 2         |
| 3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....   | 2         |
| <b>4. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | <b>3</b>  |
| 4.1 EUTROFIZAÇÃO.....   | 3         |
| 4.1.1 <i>Fitoplâncton Tóxico</i> .....  | 3         |
| 4.1.2 <i>Variáveis relevantes no processo de eutrofização</i> .....                             | 5         |
| 4.1.3 <i>Principais eventos de florações de algas tóxicas no Brasil</i> .....                   | 6         |
| 4.1.4 <i>Cianobactérias em Águas para Abastecimento Público e a Legislação Brasileira</i> ..... | 7         |
| 4.2 SISTEMAS DE REGRAS DIFUSAS.....   | 8         |
| 4.2.1 <i>Conceitos básicos da Lógica Difusa</i> .....   | 8         |
| 4.2.2 <i>Modelagem Baseada em Regras Difusas</i> .....  | 14        |
| 4.3 UTILIZAÇÃO DO MATLAB .....  | 16        |
| 4.3.1 <i>Como utilizar o Matlab</i> .....   | 16        |
| 4.3.2 <i>Como utilizar o Fuzzy Logical Toolbox</i> .....  | 17        |
| 4.3.3 <i>Outros comandos úteis no Matlab fora do Fuzzy Logical Toolbox</i> .....                | 27        |
| <b>5. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>30</b> |
| 5.1 ÁREA DE ESTUDO .....  | 30        |
| 5.2 PREPARAÇÃO DOS DADOS .....  | 32        |
| 5.2.1 <i>Variáveis ambientais</i> .....   | 33        |
| 5.2.2 <i>Periodicidade, Coleta e Preservação das amostras</i> .....                             | 33        |
| 5.2.3 <i>Métodos Analíticos</i> .....   | 33        |
| 5.2.4 <i>Pontos de Coleta</i> .....   | 34        |
| 5.3 MODELAGEM BASEADA EM REGRAS DIFUSAS .....   | 36        |
| <b>6. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....  | <b>39</b> |
| 6.1 CALIBRAÇÃO .....  | 40        |
| 6.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....  | 40        |
| 6.3 CENÁRIO AMBIENTAL.....  | 42        |
| <b>7. CONCLUSÕES</b> .....  | <b>44</b> |
| <b>8. CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....  | <b>45</b> |
| <b>9. BIBLIOGRAFIA</b> .....  | <b>47</b> |
| <b>APÊNDICE A – MODELO DE REGRAS DIFUSAS</b> .....  | <b>49</b> |
| <b>APÊNDICE B - ESTRUTURA DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS</b> .....                             | <b>53</b> |

## LISTA DAS TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 4-I: Principais gêneros de cianobactérias produtoras de toxinas que representam risco à saúde humana. .... | 4  |
| Tabela 5-I: Métodos analíticos empregados.....  | 33 |
| Tabela 5-II: Pontos de coleta.....  | 34 |
| Tabela 5-III: Resultados da correlação dos parâmetros com a clorofila <i>a</i> .....                              | 36 |
| Tabela 5-IV: Variáveis lingüísticas e partição dos domínios.....  | 37 |
| Tabela 6-I: Faixa de valores das partições .....  | 39 |

## LISTA DAS FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 4-I: a) Função característica do conjunto “clássico” adolescente. b) Função trapezoidal característica do conjunto nebuloso adolescente..... | 9  |
| Figura 4-II: Variável lingüística representando temperatura ambiente.....   | 10 |
| Figura 4-III: Métodos de implicação.....  | 12 |
| Figura 4-IV: Inferência de duas regras produzindo um conjunto difuso a partir dos valores $x_1$ e $x_2$ dados. ....                                 | 13 |
| Figura 4-V: Representação dos métodos de desfuzzificação .....  | 14 |
| Figura 4-VI: Janela de comando inicial do MATLAB .....  | 17 |
| Figura 4-VII: Tela inicial do Fuzzy Logical Toolbox.....  | 18 |
| Figura 4-VIII: Configurações básicas pré- estabelecidas para o uso do Fuzzy Logic Toolbox .....   | 19 |
| Figura 4-IX: Destaque da seleção de variáveis .....   | 20 |
| Figura 4-X: Mudança do nome das variáveis.....  | 20 |
| Figura 4-XI: Definição do domínio das variáveis .....   | 21 |
| Figura 4-XII: Escolha do número e da forma das funções de pertinência para variáveis .....  | 22 |
| Figura 4-XIII: Função de pertinência trapezoidal .....  | 22 |
| Figura 4-XIV: Funções de pertinência trapezoidal da variável Input 1 .....  | 23 |
| Figura 4-XV: Base de regras.....  | 24 |
| Figura 4-XVI: Cenário resultante da escolha de valores das variáveis de entrada e saída ....  | 25 |
| Figura 4-XVII: Superfície 3D gerada no Fuzzy Logical Toolbox .....  | 26 |
| Figura 4-XVIII: Gravação do sistema fuzzy .....   | 26 |
| Figura 4-XIX: Função de pertinência associada a variável de entrada 1 (input1) .....  | 27 |
| Figura 4-XX: Função de pertinência associada a variável de saída 1 (output1) .....  | 28 |
| Figura 4-XXI: Resumo do sistema fuzzy .....   | 29 |
| Figura 4-XXII: Gráfico da superfície 3D.....  | 29 |
| Figura 5-I: Mapa das regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina .....  | 30 |
| Figura 5-II: Bacia Hidrográfica do rio Uruguai (SB 71 – Bacia do rio Canoas) .....  | 30 |
| Figura 5-III: Localização da UHE Campos Novos .....   | 32 |
| Figura 5-IV: Distribuição espacial dos pontos de coleta monitorados.....  | 35 |
| Figura 6-I: Curva de calibração.....  | 40 |
| Figura 6-II: Diversas curvas de fosfato com a variação de nitrogênio.....   | 41 |
| Figura 6-III: Diversas curvas de pH com a variação de temperatura.....  | 42 |
| Figura 6-IV: Comportamento do nitrogênio e fosfato – verão quente .....   | 43 |
| Figura 6-V: Comportamento da temperatura da água e pH – verão quente.....   | 43 |
| Figura 6-VI: Comportamento da transparência – verão quente .....  | 44 |

## 1. INTRODUÇÃO

As algas contribuem para sustentação da vida aquática e são úteis ao homem de diversas maneiras. Podem ser utilizadas em pesquisas científicas e empregadas como excelentes meios de cultura, fertilizantes devido ao seu elevado teor nutritivo ou como ração para animais.

Porém, um efeito importante verificado em corpos d'água enriquecidos com nutrientes é o crescimento excessivo de algas, resultado do processo de fotossíntese no qual as plantas geram compostos orgânicos e biomassa.

Algumas espécies de algas produzem toxinas que causam riscos à saúde humana e ao meio ambiente, podendo ainda causar mortandades de peixes e outros organismos.

A clorofila "a" é um pigmento fotossintético comum a todos os grupos de algas e é um bom representante da abundância total dos organismos fotossintetizantes, cujo teor quando associado aos fatores físicos e químicos, pode ser utilizado como indicador do estado trófico de um ambiente. Além disso, ela é a mais comum das clorofilas (a, b, c, e d) e representa, aproximadamente, de 1 a 2% do peso seco do material orgânico em todas as algas planctônicas, por essa razão é utilizada como um indicador da biomassa algácea.

Os estudos limnológicos acompanham o processo de evolução da eutrofização e suas conseqüências (neste caso, a floração de algas) associadas à bioindicadores e as condições consideradas ideais para tal ocorrência, podendo citar a relação nitrogênio e fósforo. Esse acompanhamento é realizado através do monitoramento da qualidade da água no qual são observados as concentrações de variáveis físico-químicas e biológicas. A modelagem ecológica também é empregada e é uma das importantes ferramentas do sistema com condições adequadas para prognóstico e alternativas de controle e recuperação.

Um tópico fundamental no gerenciamento de ecossistemas é a elaboração de sistemas de suportes à decisão através dos quais se torna possível tomar medidas mitigadoras para evitar a ocorrência de danos que demandam alto custo.

Com a intenção de disponibilizar uma ferramenta para contribuir na gestão de ambientes aquáticos, pretende-se modelar o comportamento da clorofila<sub>a</sub> como indicador do estado de trofia de um corpo de água, através de um sistema baseado na lógica difusa (fuzzy), com o auxílio do software MATLAB.

As técnicas da teoria dos conjuntos difusos têm alcançado as mais diversas áreas de aplicação. Uma das mais aprofundadas é de controle fuzzy, que tem possibilitado a automação de diversos processos, que vão de tarefas domésticas até o controle de sofisticados processos industriais.

Embora, ao longo dos anos foram desenvolvidos sistemas difusos para descrever controle de processos, são recentes na literatura nacional os modelos que simulam fenômenos biológicos, onde destaca-se trabalhos: PEIXOTO (2005) e MAGNAKO (2005); os quais demonstraram ser promissor a utilização da lógica fuzzy nesse tipo de abordagem.

Em quaisquer dos casos comentados acima, o desempenho do avanço do conhecimento se mostra efetivo após o cumprimento rigoroso da seqüência de etapas relacionadas à simulação de processos, encontrada na literatura.

## **2. JUSTIFICATIVA**

A qualidade da água bruta tem piorado ao longo dos anos devido, principalmente, às atividades antrópicas que causam o aumento da fertilização de lagos e represas. Em decorrência disso, pode haver a floração do fitoplâncton com espécies que podem causar interferências diretas e indiretas na qualidade das águas.

Essas interferências podem ser: direta, graças às substâncias tóxicas que podem ser liberadas na água ou ainda no aumento da turbidez, produzido pela presença dessas espécies aquáticas em grande número; indireta, dadas as dificuldades que causam aos sistemas de tratamento de água, prejudicando mecanicamente a filtração e quimicamente a coagulação e decantação do material sedimentável (MONDARDO, 2004).

Para um eficiente gerenciamento de ambientes aquáticos, tanto para fins de abastecimento público de água como para os demais usos de reservatórios de hidrelétricas, tem sido necessário o uso de ferramentas para auxiliar no prognóstico de processos deletérios da qualidade da água.

O uso da teoria da lógica difusa mostrou-se promissor em controle de processos e também em pesquisas aplicadas, ao longo dos anos. Tem sido eficiente na área de pesquisa teórica e em áreas como de água e solo. Porém, a aplicabilidade desse sistema em estudos de fenômenos biológicos é recente no Brasil, com bibliografias datadas a partir do ano 2000.

A construção e avaliação de um modelo matemático, utilizando a teoria dos conjuntos difusos para relacionar a evolução de processos de floração de algas com o comportamento da clorofila 'a', vêm de encontro com a necessidade evidenciada nos estudos ambientais.

## **3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo geral**

Demonstrar a viabilidade do sistema de lógica difusa, como ferramenta para a modelagem do comportamento da clorofila<sub>a</sub>, constitui o objetivo principal deste trabalho. Como forma de alcançar tal objetivo, propõe-se o desenvolvimento de uma aplicação em que um modelo de regras difusas é utilizado para simular o estado de trofia de um corpo d'água relacionando a um processo de floração de algas.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Definir e verificar um sistema difuso através do uso da ferramenta *Fuzzy Logical Toolbox* contida no software MATLAB;
- Calibrar o sistema;
- Testar cenário ambiental com o auxílio de experimentos computacionais;

## 4. REVISÃO DE LITERATURA

### 4.1 Eutrofização

A eutrofização é o aumento da concentração de nutrientes nos ecossistemas aquáticos que tem como consequência o aumento de suas produtividades. Ela pode ser natural ou artificial, sendo que a primeira é um processo lento e contínuo ao que pode ser chamado de “envelhecimento natural” do lago. A segunda é induzida pelo homem e a origem dos compostos orgânicos é devido às atividades agrícolas e urbanas bem como de efluentes industriais.

De acordo com ESTEVES (1998) a eutrofização artificial é um processo dinâmico, no qual ocorrem profundas modificações qualitativas e quantitativas nas comunidades aquáticas, nas condições físicas e químicas do meio e no nível de produção do sistema, podendo ser considerada uma forma de poluição.

Esse processo propicia um crescimento algal acelerado que ao atingir grandes proporções pode dar-se o esgotamento dos nutrientes disponíveis que resultará no colapso das populações de produtores primários, cuja degradação acelerada pode esgotar o oxigênio presente na massa de água.

Com o grau de intensidade do processo de eutrofização pode-se observar distintas repercussões no nível das interações aquáticas, que podem ir desde a perda de indivíduos, redução da abundância e alteração das relações de dominância, até a eliminação de espécies e redução da diversidade biótica.

Além da redução da qualidade da água e da perda de biodiversidade, as águas eutrofizadas representam risco significativo à saúde de seres humanos e animais. Isto devido especialmente ao crescimento de algas, as quais uma vez em processo de decomposição liberam poderosas toxinas.

Essas toxinas de alguns tipos particulares de algas, que crescem em lagos e reservatórios eutróficos, são venenosas mesmo em concentrações muito baixas.

#### 4.1.1 Fitoplâncton Tóxico

O plâncton consiste em comunidades de organismos de pequeno tamanho, desde alguns micrômetros até poucos milímetros, que vivem em ambientes aquáticos e que se caracterizam por apresentarem pouca ou nenhuma locomoção. Os organismos mais representativos do plâncton compreendem as algas, bactérias, protozoários, rotíferos, cladóceros, copépodos e algumas larvas. O plâncton geralmente constitui a unidade básica da produção de matéria orgânica dos ecossistemas aquáticos. De acordo com a sua natureza, o plâncton encontra-se dividido em três categorias: fitoplâncton (ou plâncton vegetal), zooplâncton (ou plâncton animal) e bacterioplâncton (SIRTORI, 2006).

O fitoplâncton utiliza a luz solar como fonte de energia, esses organismos vegetais transformam substâncias simples, que obtém no meio ambiente, na matéria orgânica necessária a seu crescimento e multiplicação (CARVALHO PINTO-SILVA, 2005).

Muitas espécies conhecidas do fitoplâncton podem crescer e multiplicar-se rapidamente, ocasionando o fenômeno conhecido como floração de algas. Algumas dessas possuem ainda, capacidade de produzir potentes toxinas.

As cianobactérias, também conhecidas como algas cianofíceas por apresentarem clorofila a e pigmentos acessórios hidrossolúveis, são organismos autotróficos, procariotas. Possuem cerca de 150 gêneros conhecidos, dos quais 40 são potencialmente tóxicos (Saker, 1999 apud Ferreira et al 2004).

As toxinas de cianobactérias, conhecidas como cianotoxinas, constituem uma grande fonte de produtos venenosos produzidos por esses microorganismos.

De acordo com MONDARDO (2004), as cianotoxinas podem ser classificadas de acordo com o modo de ação, em: neurotoxinas (anatoxina-a, anatoxina-a(s)), saxitoxinas (Paralytic Shellfish Poisoning – PSP), hepatotoxinas (microscistinas, nodularina), citotoxina (cilindrospermopsina) e endotoxinas ou dermatotoxinas (lipopolissacarídeos, lingbitoxinas e aplisiatoxinas).

As toxinas organofosforadas neurotóxicas são caracterizadas por sua rápida ação e outras que atuam menos rapidamente são identificadas como alcalóides hepatotóxicos. Assim, estes por sua ação farmacológica, são os dois principais grupos de cianotoxinas até agora caracterizados: neurotoxinas e hepatotoxinas.

Segundo AZEVEDO (1998) as neurotoxinas são produzidas por espécies e cepas incluídas nos gêneros: *Anabaena* (apud Carmichael et al., 1990), *Aphanizomenon* (apud Mahamood & Carmichael, 1986), *Oscillatoria* (apud Sivonen et al., 1989), *Trichodesmium* (apud Hawser et al., 1991) e *Cylindrospermopsis* (apud Lagos et al., in press). Os sinais clínicos de intoxicação em animais, por um tipo de neurotoxina (anatoxina-a), mostram uma progressão de fasciculação muscular, decréscimo de movimentos, respiração abdominal exagerada, cianose, convulsão e até a morte, dependendo da dosagem e consumo prévio.

Porém, segundo AZEVEDO (1998), o tipo mais comum de intoxicação envolvendo cianobactérias é causado por hepatotoxinas, que apresentam uma ação mais lenta, causando a morte entre poucas horas e poucos dias, em decorrência de hemorragia intra-hepática e choque hipovolêmico. Os sinais observados após ingestão dessas hepatotoxinas são prostração, anorexia, vômitos, dor abdominal e diarreia (CARMICHAEL & SCHWARTZ, 1984 apud BEASLEY, 1989 ; Azevedo et al., 1998).

Na Tabela 4-I são apresentados os principais gêneros de cianobactérias produtoras de toxinas bem como os órgãos afetados em seres humanos.

**Tabela 4-I: Principais gêneros de cianobactérias produtoras de toxinas que representam risco à saúde humana.**

| Gêneros            | Toxinas  | Estrutura Química   | Tecido/Órgão Alvo               |
|--------------------|--|---------------------|---------------------------------|
| Anabaena           | microscistina, anatoxina-a, anatoxina-a (s), saxitoxina, neosatoxina | peptídeo, alcalóide | fígado, SNC                     |
| Microcystis        | microscistina  | peptídeo            | fígado                          |
| Oscillatoria       | microscistina, anatoxina-a, debromoaplisiatoxina                     | peptídeo, alcalóide | Fígado, tumores epiteliais      |
| Planktothrix       | microscistina, anatoxina-a, aplisiatoxina, lingbiatoxina             | peptídeo, alcalóide | fígado, SNC, tumores epiteliais |
| Nostocales         | microscistina  | peptídeo            | fígado                          |
| Nodularia          | nodularina   | peptídeo            | fígado                          |
| Cylindrospermopsis | cilindrospermopsina, saxitoxina, neosatoxina                         | alcalóide           | fígado, rins, SNC               |

|               |  |           |                            |
|---------------|--|-----------|----------------------------|
| Umezakia      | cilindrospermopsina  | alcalóide | fígado,rins                |
| Aphanizomenon | cilindrospermopsina,<br>anatoxina-a, anatoxina-a (s),<br>saxitoxina, neosatoxina | alcalóide | fígado,rins, SNC           |
| Lyngbya       | saxitoxina, neosatoxina, +<br>aplisiatoxina                                      | alcalóide | SNC, tumores<br>epiteliais |
| Schizothrix   | Aplisiatoxina, lingbiatoxina,<br>debromoaplisiatoxina                            | alcalóide | tumores epiteliais         |
| Todos         | lipossacarídeo   | LPS       | pele/febre                 |

LPS:lipossacarídeo; SNC: sistema nervoso central.

Fonte: Chorus e Bartram,1999 *apud* MONDARDO, 2004

#### 4.1.2 Variáveis relevantes no processo de eutrofização

Diversos autores relatam as faixas ótimas e limites de desenvolvimento dos principais grupos de algas bem como as principais variáveis ambientais relacionadas aos seus crescimentos.

Um estudo sobre a flutuação temporal do fitoplâncton em um lago tropical profundo, lago Lanao nas Filipinas, LEWIS (1978) verificou que a divisão temporal dos nichos dos principais grupos de fitoplâncton ocorre em função da distribuição de nutrientes e luz. Assim, as clorofíceas e cianofíceas têm maior crescimento em alta intensidade luminosa e baixa disponibilidade de nutrientes (ESTEVEVES, 1998).

De acordo com MADIGAN, 1999 *apud* WOSIACK, 2005, a maioria das cianobactérias apresenta melhor crescimento em temperaturas entre 15 a 30°C e atinge sua taxa máxima de crescimento em temperaturas acima dos 25°C, mas algumas espécies podem ser encontradas em temperaturas de até 85 °C (águas termais). O grupo das cianobactérias cresce normalmente em meios alcalinos, nos quais se desenvolvem melhor quando utiliza o íon bicarbonato como fonte de carbono para a fotossíntese. Geralmente não sobrevivem em águas com pH menor que 4 ou 5, ainda que algumas espécies possam sobreviver em águas ácidas.

Do mesmo modo de acordo com FERREIRA (2004), florações de cianobactérias são resultantes do crescimento exponencial de suas células, favorecidos por alta temperatura (> 20°C), pH (~8.0), disponibilidade de fósforo e nitrogênio inorgânico.

Temperatura abaixo de 16°C reduz as taxas de crescimento e temperatura acima de 35°C são letais para muitas espécies de microalgas sendo a faixa ideal entre 18 e 30°C (BOURNE, 1989; COLT, 1996 *apud* CARVALHO PINTO-SILVA et al, 2005).

WOSIACK (2005) observou na Praia Artificial de Entre Rios do Oeste, reservatório de Itaipu, durante um ano de monitoramento, que baixa turbulência, altas temperaturas, altos valores de pH realmente favoreceram o domínio de cianobactérias que predominaram com mais de 85% do total de células do fitoplâncton durante todo o período de estudo. Entretanto foram registrados baixos valores de fósforo total e altos valores de nitrogênio total com uma elevada razão N:P.

Em agosto de 2002, no mesmo estudo, durante a floração de *Microcystis* foi registrado as seguintes variações: temperatura entre 18 e 20°C, pH entre 7.7 e 8.1,

NTK entre 0,24 e 0,31 mg/L, fósforo total entre 0,018 e 0,020 mg/L e razão N:P entre 34 e 42.

No lago Paranoá, no Distrito Federal, cujo fitoplâncton é constituído por praticamente uma espécie de cianofíceia (*Aphanizomenon flos-aquae*), MOURA et al mostraram que os nutrientes, especialmente nitrato e fosfato têm importante papel (ESTEVES,1998).

No mesmo estudo, no lago Descoberto foi verificado que o máximo da biomassa das espécies dominantes ocorreu no período seco, provavelmente devido às melhores condições de radiação subaquática.

#### 4.1.3 Principais eventos de florações de algas tóxicas no Brasil

A descrição de ocorrências de cianobactérias e a contaminação de ambientes aquáticos por suas toxinas têm sido relatadas em vários países, como Inglaterra, China, África do Sul, Alemanha, Itália e Argentina, sendo, portanto, parte da literatura toxicológica mundial.

No Brasil e principalmente no Rio Grande do Sul a ocorrência de florações de cianobactérias tóxicas não é novidade, havendo registros há pelo menos 15 anos.

As florações de cianobactérias vêm aumentando em intensidade e frequência e, atualmente, é possível visualizar-se um cenário de dominância desses organismos no fitoplâncton de muitos ambientes lênticos brasileiros, especialmente durante os períodos de maior biomassa e/ou densidade. Esta dominância é marcante, sobretudo em reservatórios.

O trabalho de TEIXEIRA *et al.* (1993) descreve uma forte evidência de correlação entre a ocorrência de florações de cianobactérias, no reservatório de Itaparica (Bahia) e a morte de 88 pessoas, entre as 200 intoxicadas, pelo consumo de água do reservatório, entre março e abril de 1988 ( JARDIM et al, 2006).

Entretanto, o primeiro caso confirmado de mortes humanas causadas por cianotoxinas ocorreu no início de 1996, quando 130 pacientes renais crônicos, após terem sido submetidos a sessões de hemodiálise em uma clínica da cidade de Caruaru (PE), passaram a apresentar um quadro clínico compatível com uma grave hepatotoxicose. Desses, 60 pacientes vieram a falecer até 10 meses após o início dos sintomas. As análises confirmaram a presença de *microcistinas* e *cilindrospermopsina*, no carvão ativado utilizado no sistema de purificação de água da clínica, e de microcistinas em amostras de sangue e fígado dos pacientes intoxicados (JARDIM et al, 2006).

Também em Pernambuco, no açude Inganzeira, ocorreu uma grande proliferação da cianobactéria *C. raciborskii* ligada às mudanças climatológicas, ocasionadas pelo fenômeno El Nino, em 1997, onde a estiagem provocou uma alta estabilidade da coluna d'água, um longo tempo de retenção da água, um aumento na concentração de nutrientes e elevação das temperaturas (BOUVY *et al.*,1999 *apud* GRELLMANN, 2006).

No Brasil, os gêneros mais comuns em reservatórios e fontes de água doce são *Microcystis*, *Anabaena* e *Cylindropermopsis* (TUNDISI & MATSUMURA-TUNDISI 1992, YUNES et al 2000 *apud* FERREIRA et al, 2004).

Dentre os estudos em reservatórios que apresentam problemas com florações de cianobactérias pode-se destacar os desenvolvidos no reservatório do Irai, cujos dados constam apenas de resumos expandidos apresentados em evento (MEDEIROS

et al., 2003; VITOLA et al., 2003; FERNANDES & LAGOS, 2003; FERNANDES et al., 2003). Estes autores avaliaram a flutuação espacial e vertical das espécies de cianobactérias e da clorofila a. Além do Iraí, o reservatório de Alagados, localizado em Ponta Grossa, (IAP, 2003 – relatório não publicado) passou a ser monitorado semestralmente, desde 2000. Sendo constatadas florações de cianobactérias com predominância de *Cylindrospermopsis raciborskii* no verão e da diatomácea *Asterionella formosa* no inverno (WOSIACK, 2005).

Relatos científicos têm descrito a entrada de diferentes tipos de cianobactérias pela região norte da Laguna dos Patos (RS). Ao alcançarem a região sul da Laguna, encontram águas ricas em nutrientes, derivados dos esgotos domésticos e industriais, produzindo florações extensas, geralmente no verão (YUNES et al, 2006).

Florações de *Anabaena Spiroides* tiveram sua toxicidade comprovada no manancial de Santa Bárbara (represa de abastecimento da cidade de Pelotas, RS), no lago paisagístico do Campus Universitário da Fundação Universidade Federal do Rio Grande, em Rio Grande, RS e no nordeste do Brasil, no complexo lagunar Mundaú / Manguaba, em Alagoas (Yunes, dados não publicados apud FERREIRA, 2004).

Outras ocorrências de florações tóxicas no Brasil foram comprovadas, através de bioensaios, em reservatórios de águas do Rio de Janeiro (AGUIAR & AZEVEDO,1993; BOBED & AZEVEDO,1993; AZEVEDO et al., 1994 apud MATTHIENSEN et al,1999) e São Paulo (ZAGATTO & ARAGÃO, 1992; ZAGATTO, 1995 apud MATTHIENSEN et al,1999).

A ocorrência de cianobactérias no reservatório de Itaipu vem sendo registrada desde 1988 pela equipe de limnologia do Instituto Ambiental do Paraná (IAP, 2001 – Relatório não publicado) através de relatórios internos do próprio instituto. Parte deste relatório, sobre o fitoplâncton do reservatório de Itaipu e sua dinâmica físico-química foi publicada (ANDRADE et al., 1988 apud WOSIACK, 2005).

No reservatório da UHE de Campos Novos as cianobactérias estão presentes, porém, de acordo com o monitoramento realizado pela Epagri/Ciram desde o início do enchimento, até o momento não houve desacordo com o limite recomendado pela Resolução Conama 357/07.

#### 4.1.4 Cianobactérias em Águas para Abastecimento Público e a Legislação Brasileira

JARDIM et al 2006, realizaram um cronograma histórico da legislação brasileira no que diz respeito ao tema abordado. Eles verificaram que em janeiro de 1990 foi publicada pelo Diário Oficial da União a portaria nº 036 do Ministério da Saúde. Essa portaria que substituiu a de nº 056, apesar de algumas inovações, ainda não contemplava o arcabouço de parâmetros químicos e biológicos necessários a um controle mais efetivo da qualidade da água a ser distribuída à população. Com a edição da portaria nº 1469 em 19 de fevereiro de 2001, alguns desses parâmetros como os orgânicos incluindo a microcistina passaram a ser exigidos. Também parâmetros hidrobiológicos como a identificação e a contagem de cianobactérias passaram a ser exigidos no controle. Além da inclusão de novos parâmetros, foram alteradas as frequências para a realização das amostragens daqueles já existentes como a colimetria.

Porém, outros parâmetros de controle ficaram enquadrados dentro das recomendações, dentre eles, as análises químicas para a identificação e quantificação

de saxitoxinas e cilindrospermopsina. Em 27 de março de 2004 foi editada pelo Ministério da Saúde a portaria nº518 com pequenas modificações em relação à nº1469.

## 4.2 Sistemas de Regras Difusas

ZADEH (1965) introduziu formalmente a teoria de conjuntos difusos (*fuzzy*) apresentando-a, também, como uma abordagem alternativa para o tratamento de incertezas, mostrando que, em muitos aspectos, essa teoria se assemelha à teoria de probabilidade, ou seja: o uso do intervalo unitário e o fato de que ambos os conceitos descrevem incertezas.

De acordo com BARBALHO (2001), o trabalho pioneiro de aplicação da lógica *fuzzy* em controle de processos é devido a MAMDANI & ASSILAM (1975), cujos suportes teóricos encontram-se nos artigos de ZADEH (1965). Tal aplicação foi voltada para controlar máquinas a vapor, o que possibilitou a modelagem matemática de “ações” dos operadores (especialistas) das máquinas, tornando suas tarefas automatizáveis.

Desde então, nas diversas áreas de conhecimento, os pesquisadores vêm desenvolvendo algoritmos específicos para o uso desta teoria para a análise de seus modelos, como pode ser encontrado tanto na literatura internacional bem como nacional - onde se recomenda os trabalhos de doutorado: BARROS (1997), RIBACIONKA (1999) e ORTEGA (2001).

No Brasil, estudiosos da faculdade de engenharia agrícola (Feagri- Unicamp) juntamente com professores e alunos de doutorado do IMECC - Unicamp (Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica), desenvolveram sistemas *fuzzy* para descrever modelos teóricos que simulam alguns fenômenos biológicos. Foram estudados temas como a Morte Súbita do Citros, doença que tem dado enormes prejuízos aos plantadores de laranja do Estado de São Paulo, para simular o controle biológico do agente causador da morte súbita, além de estudar os efeitos do controle químico usado contra tal agente como consta em PEIXOTO (2005). Ainda em ecologia, há o trabalho sobre a competição de duas espécies de moscas (uma nativa e outra introduzida vinda da África na década de 70). Para esse caso também foram desenvolvidos alguns sistemas *fuzzy* para simular a competição. Tais resultados têm se confirmado segundo dados como consta em MAGNAKO (2005). Outro trabalho interessante, na área de medicina, trata de proposição de um controlador *fuzzy* para simular a atuação de um especialista (médico) no diagnóstico de câncer de próstata, trabalho que faz parte da tese de doutorado de CASTANHO (2005).

De acordo com SANDRA-SANDRI (1999) essas teorias têm sido utilizadas em aplicações que vão do controle de eletrodomésticos ao controle de satélites, do mercado financeiro à medicina, e tendem a crescer cada vez mais, sobretudo em sistemas híbridos, que incorporam abordagens conexionistas e evolutivas, no que é chamado hoje em dia, de “soft computing”.

### 4.2.1 Conceitos básicos da Lógica Difusa

Ao contrário da lógica booleana, a lógica difusa é multi-valorada ao invés de um elemento ser 100% pertencente a um conjunto ou outro, ou uma proposição ser inteiramente verdadeira ou falsa, a lógica difusa trata com graus de pertinência e

graus de veracidade. Nesse contexto, a lógica booleana passa a ser um caso particular da lógica difusa.

O conceito central na teoria de conjuntos difusos, portanto, é o da Função de Pertinência que representa numericamente o grau de certeza com que um elemento pertence a um conjunto.

### - Conjuntos Fuzzy

Na definição de conjuntos fuzzy, um subconjunto A de um conjunto U é considerado subconjunto fuzzy de U se for descrito como um conjunto de pares ordenados segundo o que segue:

$$A = \{(x, \mu_A(x)); x \in U \mu_A(x) \in [0,1]\}$$

Onde

$\mu_{A(x)}$  é uma função de pertinência que determina com que grau  $\underline{x}$  está em A;

$\mu_{A(x)} = 1$   $\underline{x}$  pertence totalmente ao conjunto A;

$\mu_{A(x)} < 1$   $\underline{x}$  pertence parcialmente ao conjunto A;

$\mu_{A(x)} = 0$   $\underline{x}$  não pertence ao conjunto A

Um conjunto A da teoria dos conjuntos clássica pode ser visto como um conjunto nebuloso específico, denominado usualmente de “clássico”, para o qual  $\mu_A: \Omega \rightarrow \{0,1\}$ , ou seja, a pertinência é do tipo “tudo ou nada”, “sim ou não”, e não gradual como para os conjuntos nebulosos. A seguir, um exemplo citado por SANDRA-SANDRI (1999) para ilustrar essa diferença, na qual as figuras descrevem respectivamente a representação do conceito “adolescente” através de um conjunto “clássico” e de um conjunto nebuloso.

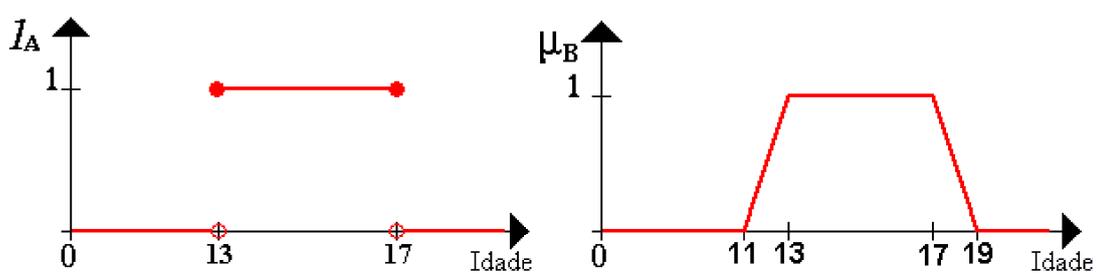


Figura 4-I: a) Função característica do conjunto “clássico” adolescente. b) Função trapezoidal característica do conjunto nebuloso adolescente.

O conjunto “clássico” A não exprime completamente o conceito de “adolescente”, pois uma pessoa com 12 anos e 11 meses seria considerada completamente incompatível com este conceito. Na verdade, qualquer intervalo “clássico” que se tome para representar este conceito é arbitrário. Já o conjunto nebuloso B permite exprimir que qualquer pessoa com idade entre 13 e 17 anos é um adolescente, acima de 19 ou abaixo de 11 não é considerado um adolescente, e no intervalo [11; 13] (respectivamente [17; 19]) é considerado tanto mais adolescente quanto mais próxima de 13 (respectivamente de 17) é sua idade.

Nas “operações” em conjuntos nebulosos, similarmente às operações nos conjuntos “clássicos”, existe a necessidade de proceder as operações de *intersecção*, *união e negação*, entre outras, nos conjuntos nebulosos.

As seguintes regras permitem a determinação da função de pertinência da união e intersecção de conjuntos difusos:

$$\forall A, B \subseteq U \quad \mu_{A \cup B}(u) = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (1)$$

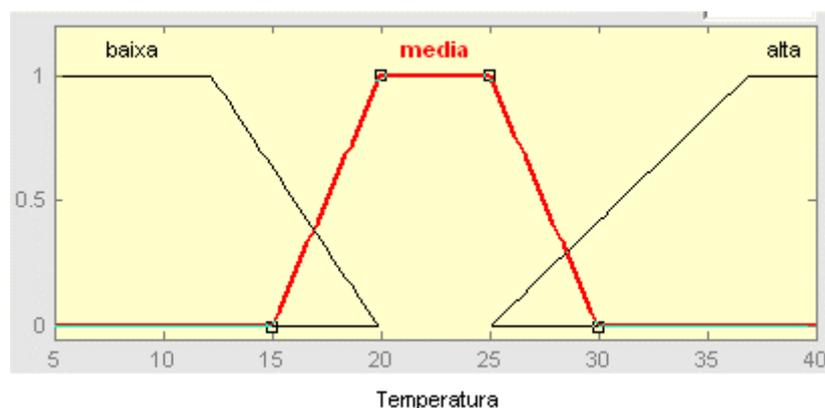
$$\forall A, B \subseteq U \quad \mu_{A \cap B}(u) = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (2)$$

De acordo com a regra (1) acima, a função de pertinência da união é estimada como o valor máximo entre as funções de pertinência de A e B. Isto é consistente com a noção de possibilidade de ocorrência: a realização de A ou B é equivalente à realização do mais fácil ou daquele que tem a máxima possibilidade de ocorrência. A regra (2) mostra que a ocorrência de ambos A e B, ao mesmo tempo, é equivalente à ocorrência do conjunto com a mínima medida de necessidade. Estas regras parecem arbitrárias, mas na verdade são compatíveis com a forma de raciocínio humano, que tende a usar regras baseadas em máximo e mínimo quando a informação é aproximada (ZADEH, 1965).

#### - Variáveis Lingüísticas

Outro conceito subjacente à lógica difusa é o de variável lingüística. As variáveis lingüísticas cumprem na lógica difusa o mesmo papel que as variáveis numéricas nos modelos matemáticos convencionais, com a diferença de que os valores que podem assumir são conceitos expressos em linguagem natural, tais como "alto", "quente", "forte", etc.

A Figura 4-II mostra um exemplo onde uma variável lingüística representando temperatura ambiente é descrita por três conjuntos difusos identificados pelos termos lingüísticos: "baixa", "média" e "alta".



**Figura 4-II: Variável lingüística representando temperatura ambiente**

## - Regras Difusas

Uma regra difusa é uma expressão condicional da forma:

SE < *proposição difusa* > ENTÃO < *proposição difusa* > ,

onde < *proposição difusa* > é uma proposição simples ou combinação de proposições do tipo: “S é N”, onde S é variável lingüística e N termo lingüístico associado a variável S e caracterizado por uma função de pertinência apropriada.

A combinação de proposições é feita através dos operadores lógicos “E” e “OU”. Uma proposição difusa é denominada *premissa ou antecedente* quando descreve as condições verificadas pela regra, e *conclusão ou consequência* quando descreve a ação determinada por esta. Um exemplo que descreve um fato simples é:

Se "fósforo é alto" então "clorofila\_a é alta"

onde *fósforo* e *clorofila\_a* são variáveis lingüísticas, e *alto(a)* é um termo lingüístico, caracterizado por funções de pertinência apropriadas.

Os tipos de controladores sistemas difusos encontrados na literatura são os modelos clássicos, compreendendo o modelo de Mamdani e o de Larsen, e os modelos de interpolação, compreendendo o modelo de Takagi-Sugeno e o de Tsukamoto (SANDRA-SANDRI, 1999). Os modelos diferem quanto à forma de representação dos termos na premissa, quanto a representação das ações de controle e quanto aos operadores utilizados para implementação do controlador.

As regras condicionais difusas, como foram definidas anteriormente, têm sido atribuídas a Mamdani (MAMDANI, E. H., ASSILIAN, S., 1994 apud BARBALHO, 2001), que as utilizou para capturar modos imprecisos de raciocínio em sistemas de controle.

Outro tipo de regra condicional foi proposta por Takagi e Sugeno (TAKAGI, T., SUGENO, M., 1985 apud BARBALHO, 2001). Este tipo de regra utiliza igualmente proposições difusas para descrever o antecedente (condições), mas suas consequências são descritas com expressões não difusas. Estas regras utilizam expressões que são funções lineares das variáveis lingüísticas antecedentes, e são descritas como:

Se "X é A" e "Y é B" então  $z = p \cdot X + q \cdot Y + r$

onde X e Y são variáveis lingüísticas antecedentes, A e B são termos lingüísticos associados a estas variáveis, e p, q e r são constantes. Regras assim descritas são ditas de primeira ordem.

Outra forma, dita de ordem zero, expressa sua consequência como uma função constante, tendo a forma:

Se "X é A" e "Y é B" então  $z = r$

Neste caso, a regra pode ser vista como um caso particular da regra do tipo Mamdani..

Ambos os tipos de regras têm sido extensivamente utilizados em modelagem e sistemas de controle. Regras do tipo Sugeno, embora mais eficientes computacionalmente, são mais complexas e menos intuitivas do que as regras do tipo Mamdani. No decorrer deste trabalho, exceto quando mencionado, será feito menção ao tipo de regra atribuído a Mamdani.

#### - Sistemas de Regras Difusas

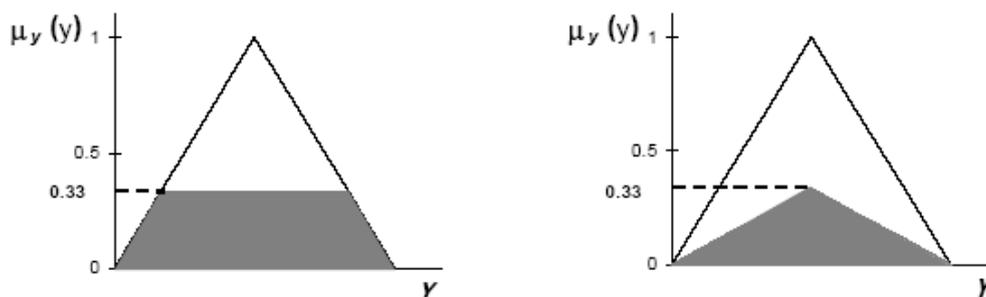
Também conhecidos como *Sistemas de Inferência Difusa*, servem para representar a interdependência entre as variáveis independentes (entrada) e dependentes (saída) de um sistema real.

A partir de valores conhecidos das variáveis de entrada, um sistema de regras difusas pode ser avaliado ou inferido; e os valores das variáveis de saída, obtidos. Neste processo, as regras são inferidas paralelamente, não importando a ordem em que estas são realizadas. A interpretação ou inferência de cada regra consiste na avaliação das proposições antecedentes (premissas), seguida da aplicação das conseqüências.

De acordo com BARBALHO (2001), a avaliação das premissas de uma regra se compõe, em geral, de duas etapas. Primeiramente, os valores numéricos dados para cada variável de entrada são avaliados contra as funções de pertinência associadas à variável correspondente, resultando o grau de pertinência de cada valor nos termos lingüísticos correspondentes. Entende-se esse processo, também, como a transformação dos valores numéricos das variáveis de entrada em números difusos.

Numa segunda etapa, uma função é aplicada aos graus de pertinência obtidos para cada proposição antecedente, produzindo um valor numérico, entre 0 e 1, que representa o grau com que a expressão condicional da regra é satisfeita (grau de aplicabilidade da regra).

Na etapa seguinte, no processo de implicação, existe a modificação dos conjuntos difusos associados com as conseqüências da regra. Dois métodos são geralmente utilizados para esta modificação: no primeiro, denominado implicação de Mamdani, o conjunto difuso é truncado em um nível correspondente ao grau de aplicabilidade da regra; no segundo, o conjunto difuso é reduzido proporcionalmente à este grau. A Figura 4-III exemplifica esses métodos para um grau de aplicabilidade igual a 0.33.



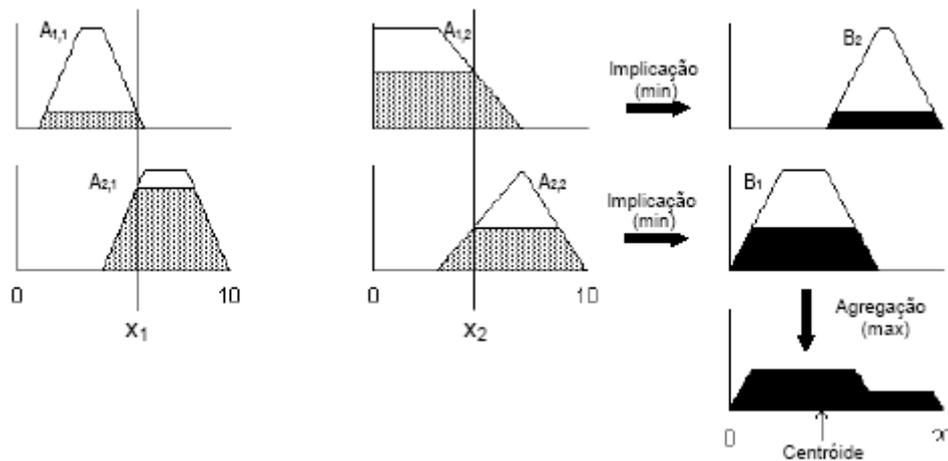
**Figura 4-III: Métodos de implicação**

Fonte: BARBALHO, 2001.

O processo de implicação descrito acima se aplica aos sistemas de regras do tipo Mamdani, no qual a resposta do processo é um conjunto difuso para cada regra.

Quando o sistema de regras é do tipo Sugeno, o processo de implicação se restringe à avaliação das equações não difusas. Neste caso, os graus de aplicabilidade obtidos das avaliações dos antecedentes são utilizados, somente, no cálculo da resposta final do sistema.

Como métodos de agregação de conseqüências, vários esquemas têm sido propostos para a escolha de um valor representativo de um conjunto difuso. Dentre esses métodos, na Figura 4-IV é exemplificado o que aplica a função máxima, correspondente à união dos conjuntos difusos.



**Figura 4-IV: Inferência de duas regras produzindo um conjunto difuso a partir dos valores  $x_1$  e  $x_2$  dados.**

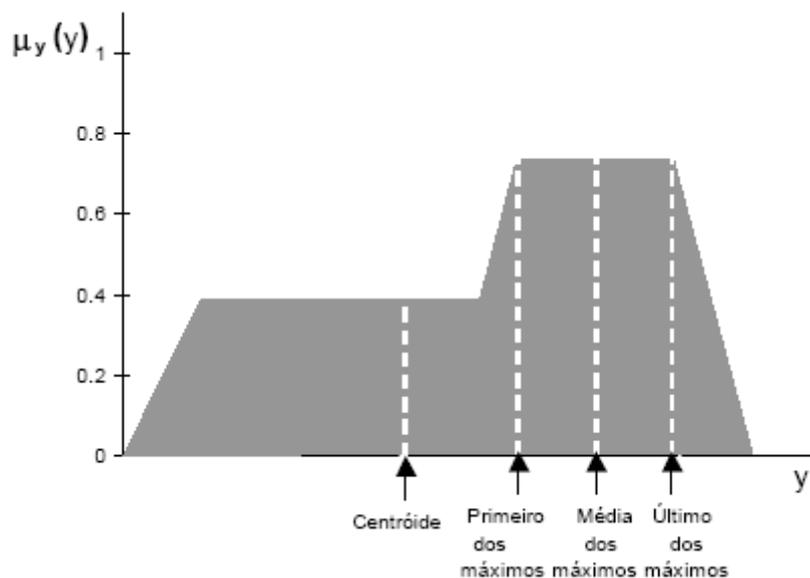
Fonte: BARBALHO, 2001.

Para a escolha de valores numéricos representativos das respostas difusas, utilizada para obter uma única ação de controle precisa, é utilizada a interface de *defuzzificação*.

Os métodos de “*defuzzificação*” mais utilizados são:

1. Primeiro Máximo (SOM): encontra o valor de saída através do ponto em que o grau de pertinência da distribuição da ação de controle atinge o primeiro valor máximo;
2. Método da Média dos Máximos (MOM): encontra o ponto médio entre os valores que têm o maior grau de pertinência inferido pelas regras;
3. Método do Centro da Área (COA): o valor de saída é o centro de gravidade da função de distribuição de possibilidade da ação de controle.

A Figura 4-V ilustra os métodos.



**Figura 4-V: Representação dos métodos de defuzzificação**

Fonte: BARBALHO, 2001.

#### 4.2.2 Modelagem Baseada em Regras Difusas

A modelagem baseada em regras difusas tem como ponto central a definição e a verificação de um sistema de regras. A definição das regras é o procedimento em que o conhecimento e/ou os dados disponíveis são transcritos em regras.

De uma maneira geral, podem-se descrever as tarefas de construção de um sistema difuso brevemente como:

1. Definição do modelo e das características operacionais, para estabelecer as particularidades do sistema e definição das propriedades operacionais como o tipo de controlador, operadores a serem utilizados, defuzzificador, etc;
2. Definição dos termos lingüísticos de cada variável. Para garantir suavidade e estabilidade deve-se permitir que haja uma sobreposição parcial entre conjuntos nebulosos vizinhos;
3. Definição do comportamento do controle, que envolve a descrição das regras que conectam as variáveis de entrada às propriedades de saída do modelo.

É necessária, portanto a definição de alguns parâmetros, obtidos a partir da experiência do projetista. Alguns destes parâmetros são fixos, os denominados parâmetros estruturais, e outros, os parâmetros de sintonização, são aqueles que variam com o tempo:

##### 1. Parâmetros estruturais:

- Número de variáveis de entrada e saída;
- Variáveis lingüísticas;
- Funções de pertinência parametrizadas;
- Intervalos de discretização;
- Estrutura da base de regras;

- Conjunto básico de regras;
- Recursos de operação sobre os dados de entrada.

## 2. Parâmetros de sintonização:

- Universo de discurso das variáveis;
- Parâmetros das funções de pertinência (p.ex. núcleo e suporte);

Para a tarefa de identificação das variáveis independentes (entradas) e dependentes (saídas), em alguns casos, o conhecimento sobre o sistema será suficiente para identificar estas variáveis sem nenhuma dificuldade. Não existe um método estabelecido para identificação das variáveis relevantes, sendo geralmente utilizada uma análise prévia dos dados, baseada num dos seguintes procedimentos:

- visualização gráfica dos dados;
- utilização de técnicas estatísticas de análise de correlação e regressão multivariada;

A partição dos domínios das variáveis selecionadas visa à representação das variáveis numéricas como variáveis lingüísticas. Um aspecto crucial neste processo é a escolha do número de partições de cada variável, pois muitas partições resultarão em grande quantidade de parâmetros a serem ajustados, enquanto um número muito pequeno de partições pode resultar em modelos que não conseguem representar a relação presente no conjunto de dados.

A definição das variáveis lingüísticas se completa com a atribuição de uma função de pertinência e um termo lingüístico a cada partição de domínio.

Várias formas de atribuição de funções de pertinência têm sido sugeridas, mas, até o momento, ainda não se comprovou maior eficácia de uma forma em relação às demais. Por esse motivo, as formas mais simples, tais como as formas triangulares e trapezoidais, são as mais utilizadas. Definida a forma, inicia-se a escolha dos parâmetros de cada função. No caso de funções trapezoidais serem utilizadas, também é atribuído grau zero aos valores mínimos e máximos da partição, mas os outros dois parâmetros são definidos, em geral, subjetivamente. O ajuste desses parâmetros é realizado, em geral, num processo de tentativa e erro. Por fim, para distinguir as diversas partições ou funções de pertinência, atribui-se um nome ou termo lingüístico adequado a cada uma.

Na etapa de descrição das regras, uma base inicial de regras deve ser descrita, a qual será posteriormente ajustada para representar, da melhor forma possível, o conhecimento especialista e/ou o conhecimento implícito nos dados disponíveis. Neste processo, as proposições antecedentes e conseqüências de cada regra são descritas considerando as possíveis interações entre as variáveis selecionadas.

Se  $n$  é o número de variáveis de entrada e  $p$  número de termos lingüísticos associados a cada variável, o número máximo de regras neste sistema será  $np$ .

No caso em que interações entre as variáveis de entrada devam ser consideradas, as regras do sistema terão a forma:

$$\text{SE } X_1 \text{ é } A_{i,1} \text{ E } X_2 \text{ é } A_{i,2} \text{ .... ENTÃO } Y \text{ é } B_i$$

Neste caso, o número máximo de regras será  $pn$ , crescendo, portanto, exponencialmente com o número de variáveis de entrada e de termos lingüísticos definidos para estas variáveis.

A avaliação da redundância de um sistema de regras não deve ser feita com base somente nos antecedentes, mas deve considerar as respostas do sistema. Logo, para saber se uma determinada regra pode ser removida do sistema, deve-se avaliar o sistema com e sem a regra, comparando-se as respostas assim obtidas. Se as respostas são parecidas, então a regra pode ser removida.

Na seqüência, há a etapa que consome mais tempo no processo de modelagem, a de sintonização. Ela é complexa devido à flexibilidade que decorre da existência de muitos parâmetros, exigindo esforço do projetista na obtenção do melhor desempenho do controlador fuzzy. Alguns dos parâmetros podem ser alterados por mecanismos automáticos de adaptação e aprendizado, contudo, normalmente é tarefa do projetista o treinamento e a sintonia da maioria dos parâmetros. Assim, os parâmetros das funções de pertinência associadas aos termos lingüísticos são ajustados com base num conjunto de dados, denominado conjunto de treinamento.

A avaliação de quão bem o sistema de regras "treinado" representa a relação entrada/saída contida nos dados é geralmente feita através da adoção de uma medida de erro. Uma medida de erro freqüentemente utilizada é o erro médio quadrático (soma dos quadrados das diferenças entre as saídas produzidas pelo sistema e as saídas desejadas).

E por fim, a validação é o processo em que o modelo é conceituado quanto ao seu desempenho em termos de eficácia e eficiência computacional. A eficácia está relacionada com a capacidade do modelo em reproduzir as saídas desejadas, quando um conjunto de dados distinto do conjunto para o qual o modelo foi treinado lhe é apresentado. Diz-se que, neste processo, se está avaliando a capacidade de generalização do modelo. O conjunto de dados utilizado é comumente denominado conjunto de validação.

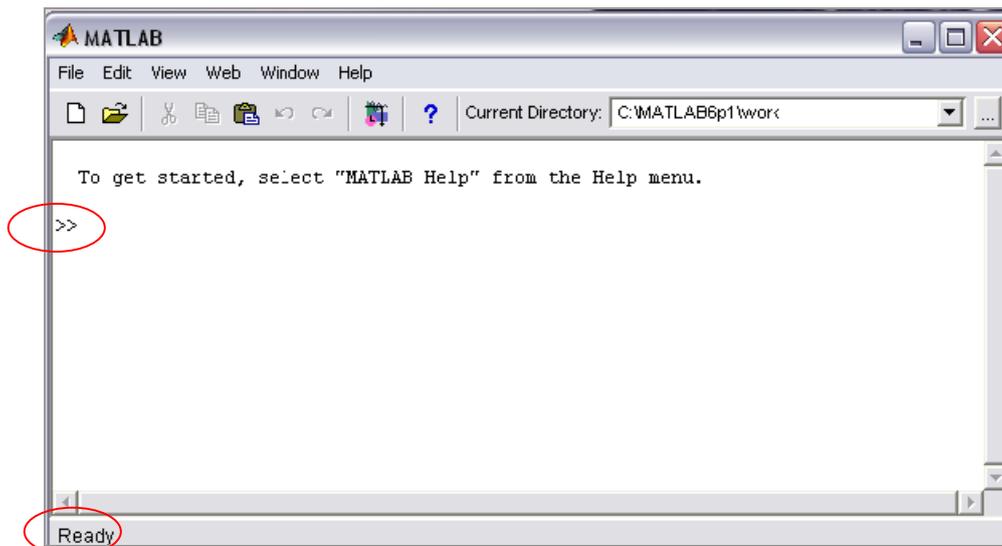
Um aspecto importante na avaliação de desempenho de um modelo está relacionado à sua eficiência computacional que depende, fundamentalmente, da simplicidade do modelo.

### **4.3 Utilização do Matlab**

O Matlab é um ambiente de computação científica que permite a interação com o usuário através de uma janela, denotada por Janela de Comando, onde os comandos devem ser fornecidos pelos usuários para que os cálculos e resultados, realizados através da linguagem Fortran, sejam exibidos. Possui o Fuzzy Logical Toolbox no qual são disponibilizados arquivos e funções destinados ao uso da teoria de conjuntos fuzzy.

#### **4.3.1 Como utilizar o Matlab**

Após clicar no ícone MATLAB no ambiente Windows, aparecerá a referida Janela de Comando, a qual estará pronta para receber os comandos tão logo apareçam os caracteres `>>` e a palavra *Ready*. Os locais estão destacados no canto superior esquerdo e no canto inferior esquerdo da Figura 4-VI respectivamente.



**Figura 4-VI: Janela de comando inicial do MATLAB**

A partir disto podem-se fazer distintos usos do MATLAB, dentre eles o uso de vários toolbox, cada um constando de uma coleção de arquivos destinados a tratar certas classes de problemas científicos. Dentre estes, encontra-se o Fuzzy Logical Toolbox, que é o de interesse deste trabalho, e cujo uso descreve-se a seguir.

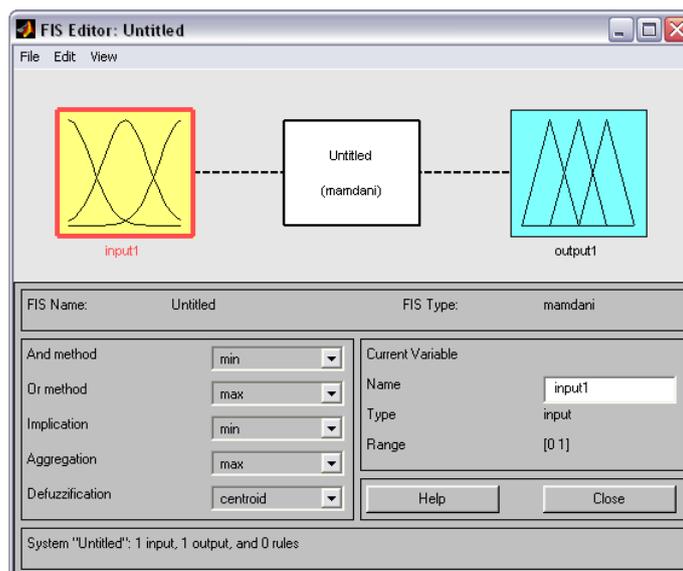
#### 4.3.2 Como utilizar o Fuzzy Logical Toolbox

No *Fuzzy Logical Toolbox* estão disponibilizados arquivos e funções destinados ao uso da teoria de conjuntos fuzzy. Neste caso, recomenda-se o reconhecimento das Palavras-chave associadas ao uso desta teoria.

Na Janela de Comando da Figura 4-VI após o símbolo >> digitar a palavra fuzzy como:

```
>> fuzzy
```

e, em seguida, pressionar a tecla Enter a partir do que aparecerá a tela inicial deste toolbox como mostra a Figura 4-VII.



**Figura 4-VII: Tela inicial do Fuzzy Logical Toolbox**

Como pode ser notada na Figura 4-VII, a opção referente ao tipo de análise fuzzy está destacada com o nome Mamdani. Sendo assim, no que segue descreve-se brevemente do que o sistema Mamdani é constituído.

#### 4.3.2.1 O sistema Mamdani

Conforme citado anteriormente, existem diferentes métodos de inferência fuzzy com diferentes propriedades. O *Fuzzy Logical Toolbox* do MATLAB oferece duas opções: o Método de Mamdani e o Método de Sugeno. Analogamente, existem diversos métodos de defuzzificação já citados neste trabalho. Devido à simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana, todo o conteúdo a seguir será apresentado utilizando-se os seguintes métodos disponibilizados por este toolbox: o Método de Mamdani, na etapa de inferência, e o Método do centro de gravidade (centroid), na etapa de defuzzificação.

De maneira resumida, AMENDOLA et al (2005) define os módulos que indicam a metodologia para a construção do sistema fuzzy:

- 1) Módulo de fuzzificação: é o que modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos fuzzy. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada devem ser atribuídos termos lingüísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo lingüístico, deve ser associado um conjunto fuzzy por uma função de pertinência;
- 2) Módulo da base de regras: é o que constitui o núcleo do sistema. É neste módulo onde “se guardam” as variáveis e suas classificações lingüísticas;
- 3) Módulo de inferência: é onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação fuzzy que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema fuzzy já que ele fornecerá a saída (controle) fuzzy a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada fuzzy;

4) Módulo de defuzzificação: que traduz o estado da variável de saída fuzzy para um valor numérico.

A Figura 4-VIII destaca a configuração básica para o uso do Fuzzy Logic Toolbox, segundo estas especificações, e será mantida como base para todo o desenvolvimento deste trabalho.

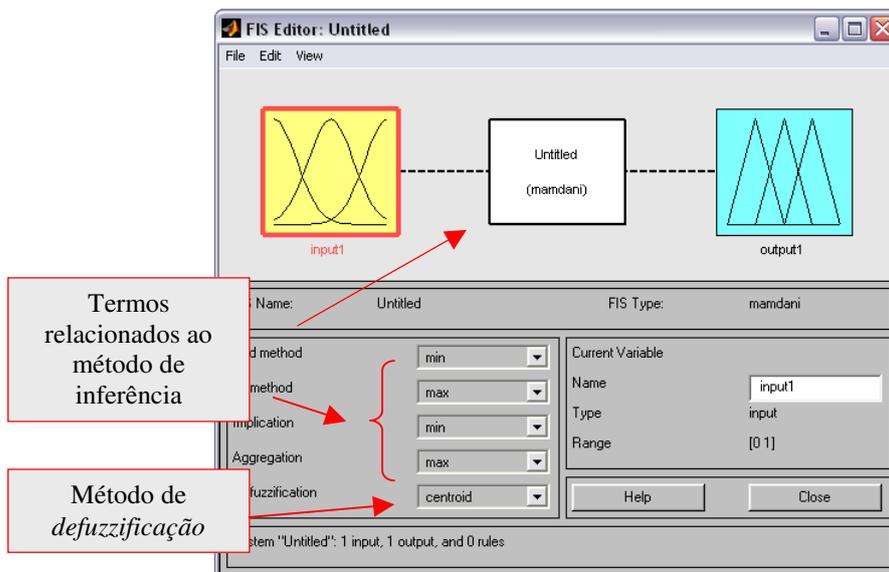


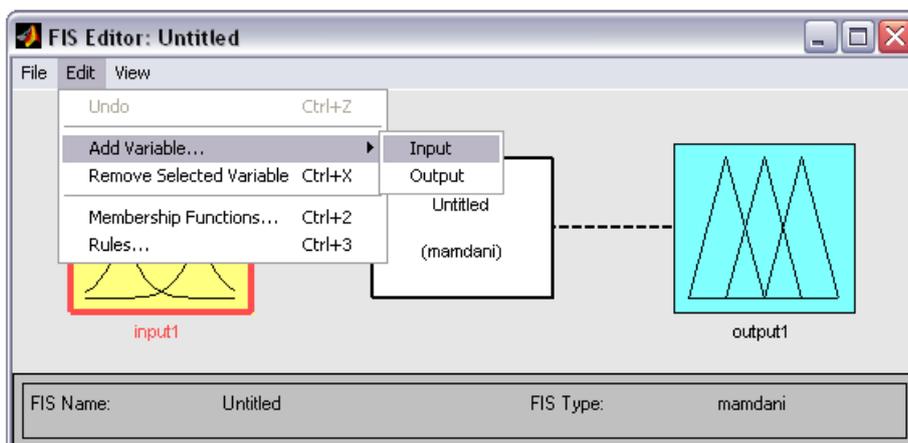
Figura 4-VIII: Configurações básicas pré- estabelecidas para o uso do Fuzzy Logic Toolbox

#### 4.3.2.2 Como adicionar e remover as variáveis de entrada (input) e/ou saída (output)

Para introduzir ou adicionar as variáveis no Fuzzy Logic Toolbox, devem ser criadas “caixas” para guardá-las, o que é feito na tela inicial, para cada uma das variáveis de entrada (caixas amarelas) e/ou variáveis de saída (caixas azuis), selecionando as opções:

Edit → Add Variables → Input / Output

É importante ressaltar que pode haver diversas variáveis de entrada bem como de saída. A Figura 4-IX mostra o destaque.

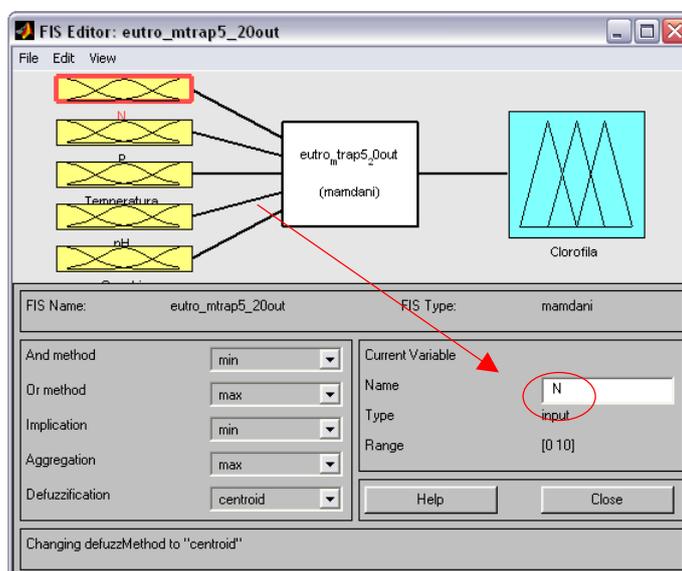


**Figura 4-IX: Destaque da seleção de variáveis**

Do mesmo modo, para remover cada variável basta clicar sobre a “caixa” desejada seguindo a opção: Edit → Remove Selected Variable.

#### 4.3.2.3 Como mudar o nome das variáveis

Para mudar o nome da “caixa” de cada variável (entrada e/ou de saída) basta clicar em cima da mesma, escrever o nome escolhido no local destacado na Figura 4-X e pressionar a tecla Enter.



**Figura 4-X: Mudança do nome das variáveis**

#### 4.3.2.4 Como alterar o domínio das variáveis

De maneira semelhante ao item anterior, para a determinação do domínio de cada uma das variáveis deve-se clicar na “caixa” da variável, alterando-se o que está destacado no que mostra a Figura 4-XI, e pressionar a tecla Enter.

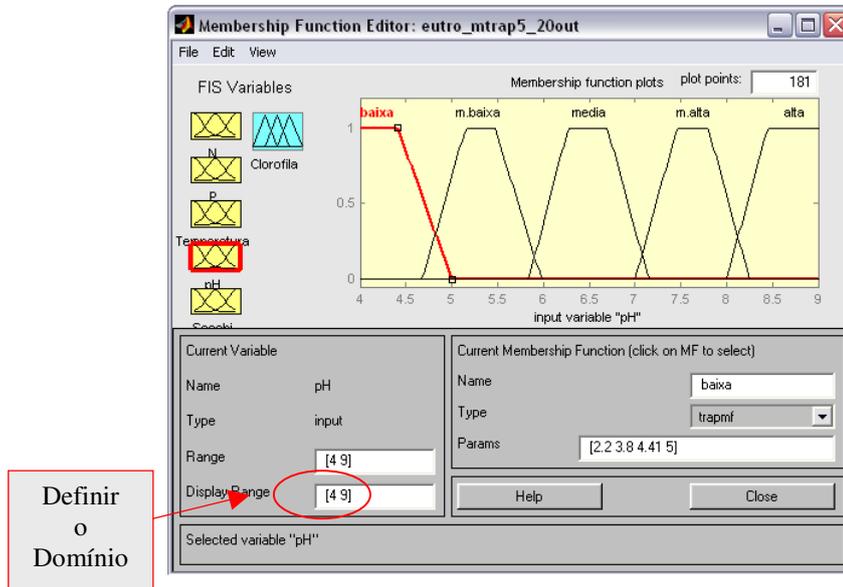


Figura 4-XI: Definição do domínio das variáveis

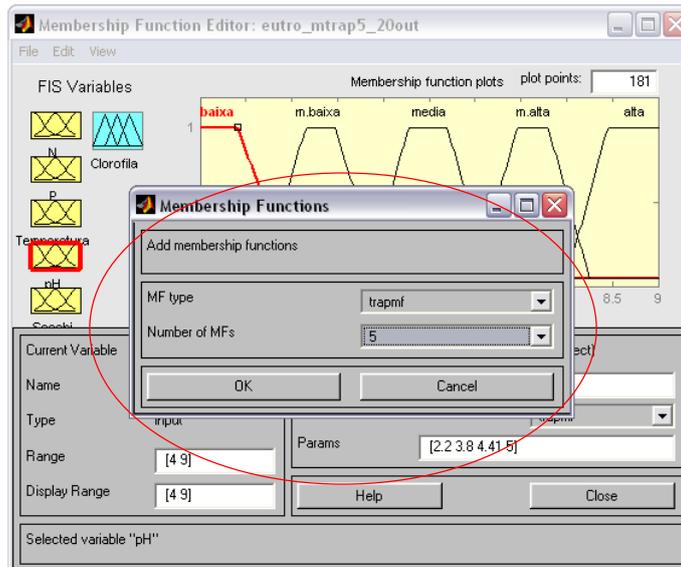
Este procedimento deve ser repetido tantas vezes quanto for o número de “caixas” de variáveis de entrada e/ou saída que se quer alterar o domínio.

#### 4.3.2.5 Funções de pertinência

De acordo com o que consta no item 4.2.1, um conjunto fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência que assume valores dentro do intervalo  $[0,1]$ . Enquanto na teoria de conjuntos clássica, a função de pertinência assume apenas os valores zero - indicando que o elemento não pertence ao conjunto-, ou um - indicando que o elemento pertence ao conjunto-, na teoria de conjuntos fuzzy, os elementos podem estar associados a graus de pertinência entre zero e um indicando que os mesmos podem pertencer parcialmente a um conjunto. Assim, tanto o número quanto o formato das funções de pertinência devem ser escolhidos de acordo com o conhecimento sobre o processo que se quer estudar.

Para se alterar o número e o formato das funções de pertinência das variáveis de entrada deve-se, a partir do que está indicado na Figura 4-XII, pressionar o botão esquerdo do mouse nas seguintes opções:

Edit → Add MFs (Membership Functions)

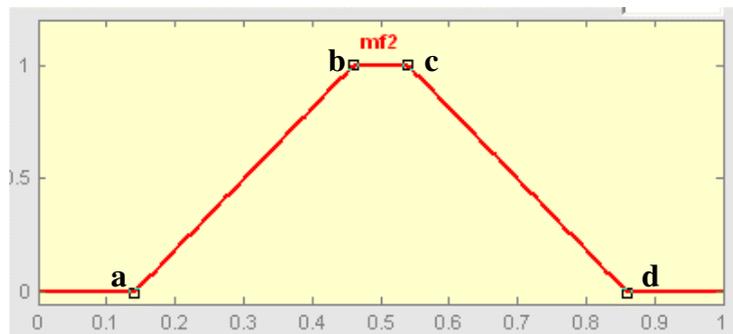


**Figura 4-XII: Escolha do número e da forma das funções de pertinência para variáveis**

Os formatos mais comumente utilizados para funções de pertinência são os triangulares (trimf), os trapezoidais (trapmf) e os gaussianos (gaussmf). Neste item apenas será citado quais procedimentos devem ser seguidos para o formato trapezoidal.

#### Funções de pertinência trapezoidal

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ , onde  $a$  e  $d$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e  $b$  e  $c$  determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1. A Figura 4-XIII exibe uma função de pertinência trapezoidal onde são destacados os pontos  $a$ ,  $b$ ,  $c$  e  $d$ . Nesta Figura encontram-se no eixo vertical os valores da função de pertinência e no eixo horizontal os valores da variável que se quer estudar.

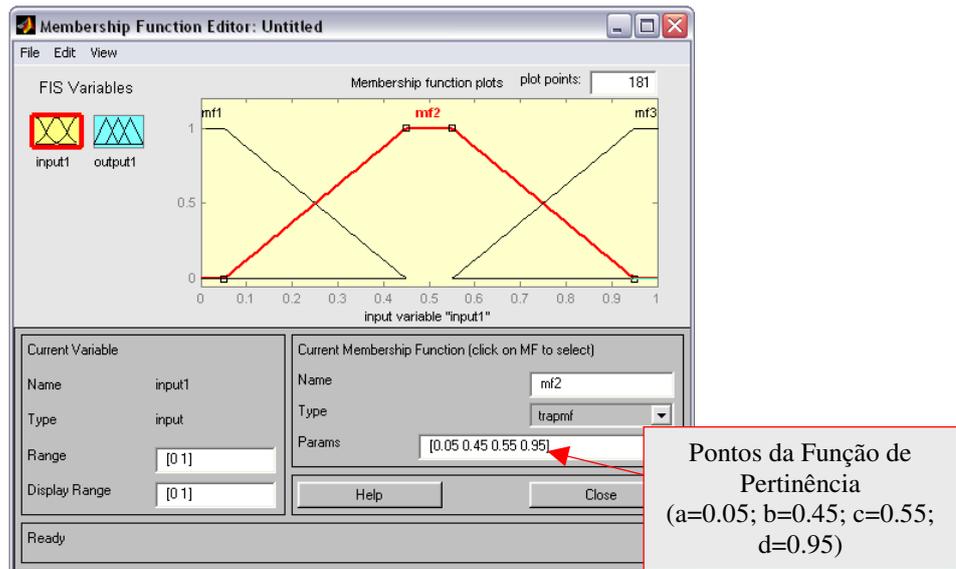


**Figura 4-XIII: Função de pertinência trapezoidal**

Neste caso é acionada a função:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases}$$

Como exemplo, na Figura 4-XIV escolheu-se para a variável de entrada input1, três funções de pertinência com formato trapezoidal. Pressionando-se uma vez em cima da função de pertinência que se quer alterar, esta aparecerá destacada em vermelho, como é o caso da função mf2 que aparece na referente figura. Nos locais indicados, deve-se digitar entre os colchetes, separados por um espaço, os valores de a, b, c, d e pressionar a tecla Enter.



**Figura 4-XIV: Funções de pertinência trapezoidal da variável Input 1**

#### 4.3.2.6 Como criar a base de regras

Após os procedimentos descritos anteriormente, deve-se criar a base de regras. Para tanto, é necessário pressionar o botão esquerdo do mouse em:

Edit → Rules

que aparecerá na Janela conforme mostra a Figura 4-XV.

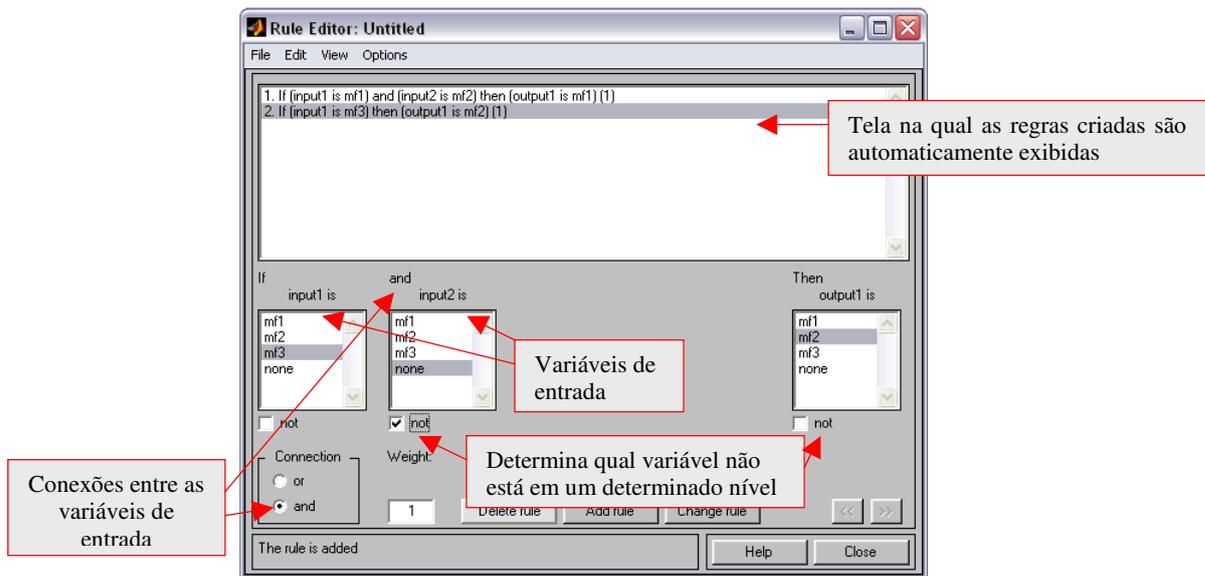


Figura 4-XV: Base de regras

A Figura 4-XV exibe um exemplo em que duas regras já foram inseridas. Na construção de cada regra deve-se definir a conexão entre as variáveis de entrada e as variáveis de saída, através dos operadores lógicos, e pressionar o botão esquerdo do mouse em *add rule*.

No final deste processo tem-se a formação do sistema de controle fuzzy.

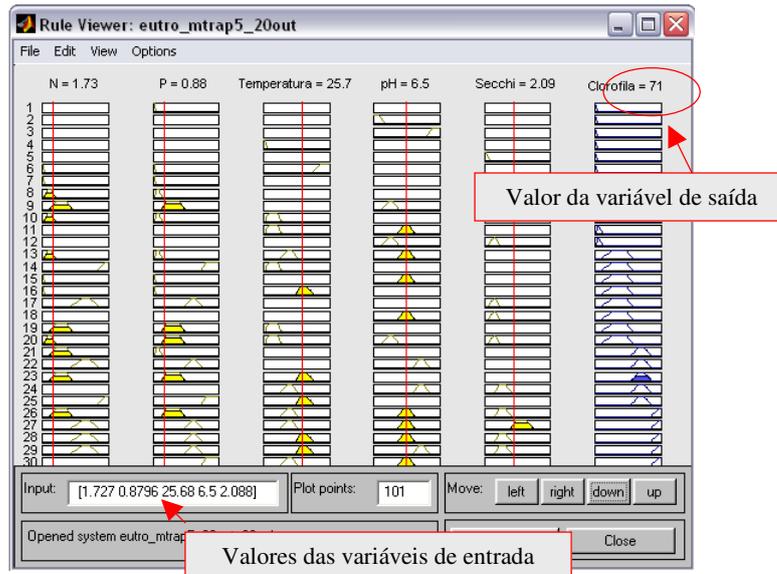
#### 4.3.2.7 Como utilizar o sistema de controle fuzzy

Construído o sistema de controle fuzzy podem-se arbitrar valores numéricos para as variáveis de entrada, simulando cenários factíveis, do ponto de vista do especialista, para observar e analisar os valores obtidos para cada variável de saída.

Para tanto, em qualquer tela dentro do Fuzzy Logical Toolbox, pressionar o mouse em:

View → View Rules

e aparecerá o cenário conforme ilustrado na Figura 4-XVI.



**Figura 4-XVI: Cenário resultante da escolha de valores das variáveis de entrada e saída**

Para se arbitrar diferentes valores para as variáveis de entrada pode-se proceder de duas formas a partir do que mostra a Figura 4-XVI:

- a) Pressionando e arrastando o mouse nas barras verticais vermelhas destacadas; ou
- b) Digitando os valores desejados no local destacado como “valores das variáveis de entrada”,

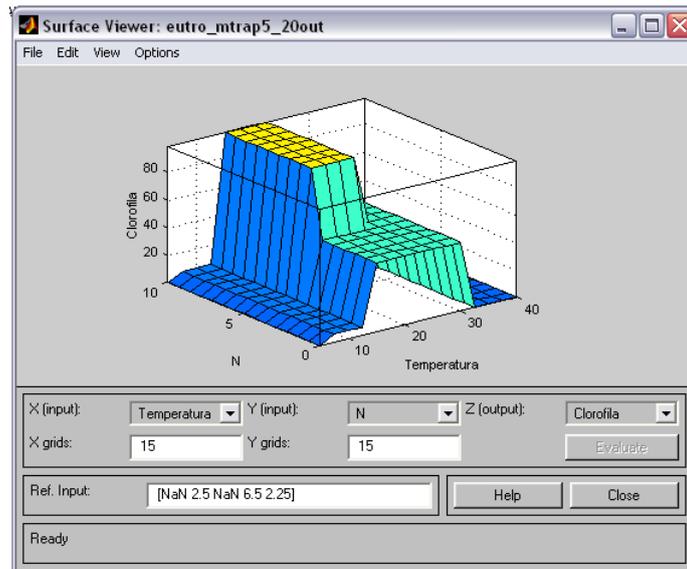
Como, para cada valor atribuído às variáveis de entrada o sistema gera um valor para a variável de saída, nota-se que o sistema fuzzy neste caso desempenha o papel de uma função de duas variáveis com valores reais, cujo gráfico tridimensional (3D) é a superfície gerada pelas operações lógicas específicas.

#### 4.3.2.8 Como visualizar a superfície 3D

Para visualizar-se a superfície formada pelas variáveis de entrada e de saída, em qualquer tela dentro do Fuzzy Logical Toolbox, pressionar o botão esquerdo do mouse em:

View → View Surface

e aparecerá o que está ilustrado na Figura XVII.



**Figura 4-XVII: Superfície 3D gerada no Fuzzy Logical Toolbox**

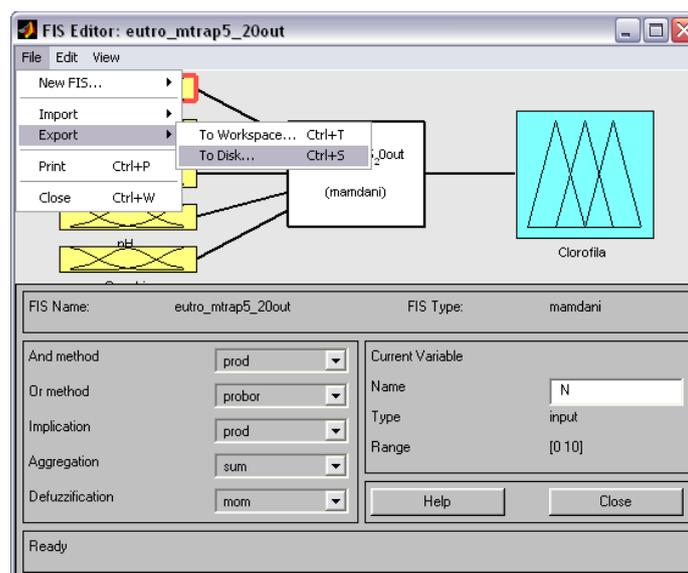
Assim, é possível se obter gráficos bidimensionais de qualquer uma das variáveis de entrada em função da variável de saída.

#### 4.3.2.9 Como salvar e carregar o sistema de controle fuzzy

O sistema de controle fuzzy pode ser salvo a partir de qualquer uma das telas dentro do Fuzzy Logical Toolbox, pressionando o botão esquerdo do mouse em:

File → Export → To disk

como mostra a Figura 4-XVIII.



**Figura 4-XVIII: Gravação do sistema fuzzy**

Do mesmo modo, para carregar o sistema basta clicar em:

File → Import → To disk

E escolher a localização e o nome do arquivo desejado.

#### 4.3.3 Outros comandos úteis no Matlab fora do Fuzzy Logical Toolbox

Os comandos que serão apresentados nesta seção devem ser digitados dentro da janela de comando como aparece na Figura 4-VI.

Para definir uma variável de nome “nome” faça:

```
>>nome = readfis ('nome do arquivo gerado no item 4.3.2.10 ')
```

##### 4.3.3.1 Como gerar gráficos das funções de pertinências associadas às variáveis de entrada

Para gerar os gráficos faça:

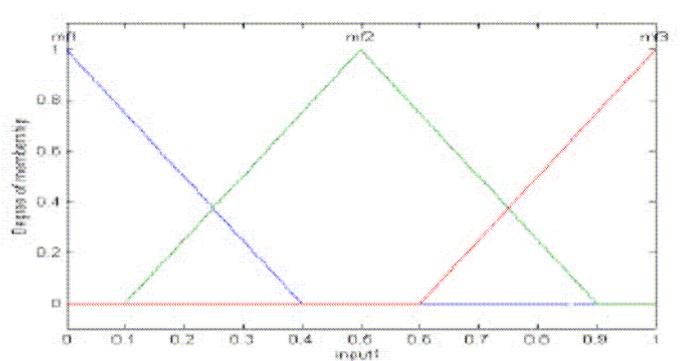
```
>>plotmf (nome, 'input', n)
```

onde n é o número associado à variável de entrada que se queira obter o gráfico.

Por exemplo, para n=1, faça:

```
>>plotmf (nome, 'input', 1)
```

Do que aparecerá o que mostra a Figura 4-XIX:



**Figura 4-XIX: Função de pertinência associada a variável de entrada 1 (input1)**

#### 4.3.3.2 Como gerar gráficos das funções de pertinências associadas às variáveis de saída

Para gerar os gráficos de pertinência faça:

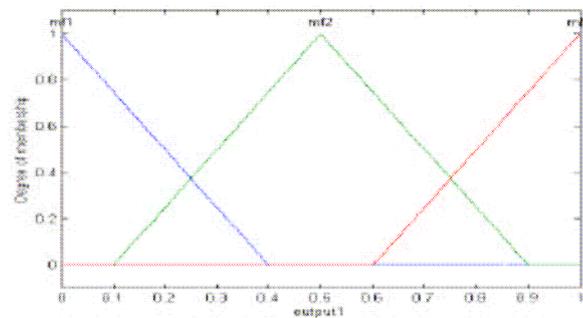
```
>> plotmf (nome,'output',n)
```

Onde n é o número associado à variável de saída que se querem obter o gráfico.

Por exemplo, para n=1, faça:

```
>> plotmf (nome,'output',1)
```

Do que aparecerá o que mostra a Figura 4-XX:



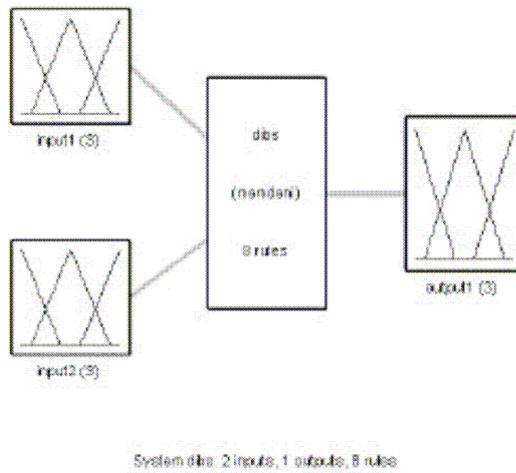
**Figura 4-XX: Função de pertinência associada a variável de saída 1 (output1)**

#### 4.3.3.3 Como obter o resumo do sistema de controle fuzzy

Para obter o resumo do sistema de controle digitar:

```
>>plotfis (nome)
```

Do que aparecerá o que mostra a Figura 4-XXI:



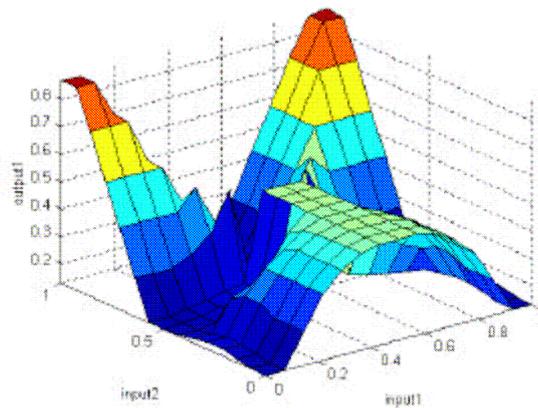
**Figura 4-XXI: Resumo do sistema fuzzy**

#### 4.3.3.4 Como gerar o gráfico da superfície 3D

Para gerar a superfície 3D digitar:

>>gensurf (nome)

Do que aparecerá o que mostra a Figura 4-XXII.

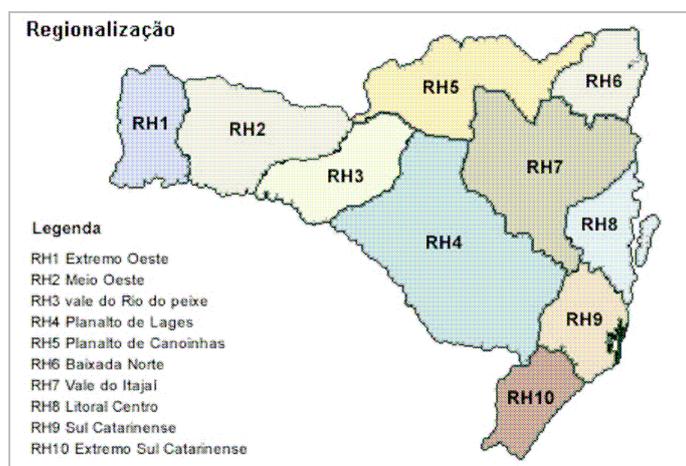


**Figura 4-XXII: Gráfico da superfície 3D**

## 5. MATERIAL E MÉTODOS

### 5.1 Área de Estudo

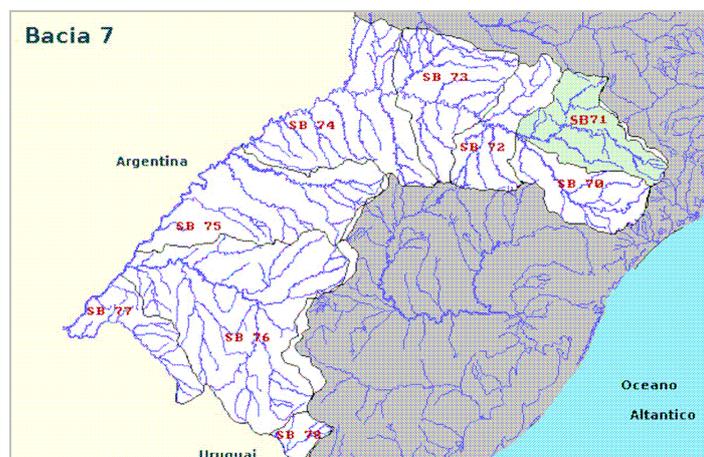
A bacia hidrográfica do rio Canoas é uma das maiores do estado de Santa Catarina e nela está localizado o Aquífero Guarani, a principal reserva de água doce do mundo situada no subsolo. Juntamente com a bacia do rio Pelotas compõe a “Região Hidrográfica do Planalto de Lages – RH4” e apresenta a maior área física e a menor densidade demográfica do estado catarinense em relação às outras regiões (Figura 5-I).



**Figura 5-I: Mapa das regiões hidrográficas do estado de Santa Catarina**

Fonte: Diagnóstico Geral das Bacias Hidrográficas de Santa Catarina. SDS, 1995.

Pertencente às microrregiões do Meio Oeste Catarinense e Serrana, é parte integrante da bacia hidrográfica do rio Uruguai, e por esta razão pode-se designá-la por “sub-bacia de seção do rio Canoas” (Figura 5-II).



**Figura 5-II: Bacia Hidrográfica do rio Uruguai (SB 71 – Bacia do rio Canoas)**

Fonte: Atlas Hidrológico. ANEEL/SRH, 1997.

A bacia do rio Canoas drena uma área com cerca de 14.690km<sup>2</sup>, apresenta uma densa rede de drenagem (densidade de drenagem igual a 1,66km/km<sup>2</sup>) e uma vazão mínima de 280m<sup>3</sup>/s. A declividade média é elevada e seus cursos d'água apresentam fortes declividades.

Quanto ao rio Canoas, suas nascentes localizam-se no município de Urubici, na Serra da Anta Gorda, um dos esporões da Serra Geral, e banha mais de 12 municípios. Na margem direita seu principal afluente é o rio Marombas e na esquerda, é o rio Caveiras.

Segundo a classificação de Köppen, o clima da bacia é caracterizado como temperado úmido ou subtropical úmido de verão fresco (Cfb). A temperatura média anual varia de 16°C a 18°C, sendo que as temperaturas máximas absolutas se dão em janeiro e ficam próximas a 36°C, enquanto as mínimas absolutas correspondem a julho e estão próximas a -5°C. As médias de umidade relativa do ar são elevadas durante todo o ano, com mínima em torno de 68% em novembro e máxima próxima de 81% em junho (EPAGRI/CIRAM, 2005).

A área está dividida em duas grandes unidades geomorfológicas regionais: o Planalto dos Campos Gerais e o Planalto Dissecado Rio Iguaçu/Rio Uruguai. O relevo dessas unidades caracteriza-se por vales, às vezes profundos, encaixados com patamares, dissimulados ou não, nas encostas e frequentemente há formação de corredeiras e pequenas cachoeiras.

A vegetação é dita principalmente pelo clima, que é quente e úmido durante grande parte do ano, porém possui um período considerável de caráter frio o que é capaz de restringir a absorção de água e minerais e a proliferação apreciável de espécies tropicais, assim como provavelmente desencadeia processos hormonais responsáveis pela decidualidade florestal, caracterizando a região da Floresta Estacional Decidual. Já a região da Floresta Ombrófila Mista apresenta uma estratificação vertical característica e peculiar ao longo das costas íngremes da calha do Rio Canoas a partir da foz do Rio Ibicuí, ocupando altitudes geralmente acima de 400m. Atualmente a cobertura vegetal se constitui em floresta secundária, vegetação secundária em estágio médio inicial e médio de regeneração natural (capoeirinhas, capoeiras e capoeirões), pastagem (savanas) e agricultura cíclica. As áreas de reflorestamento são de *Pinus* sp e *Eucalyptus* sp, devido à existência das indústrias transformadoras de celulose na região (HOFFMANN et al, 2003).

A população pertencente à bacia representa cerca de 8,8% da população catarinense. Estima-se que apenas 41,54% dos habitantes da região apresentam qualquer tipo de esgotamento sanitário, cerca de 53,29% dos domicílios possuem serviço de limpeza pública e que 52% são abastecidos com água potável pela rede pública de distribuição (HOFFMANN et al, 2003).

Os municípios de Lages e Curitiba possuem as maiores populações com 160.000 e 37.000 habitantes respectivamente e contribuem com as maiores cargas poluidoras na bacia. A sub-bacia do Rio Caveiras, um dos principais afluentes do rio Canoas, é a que recebe maior quantidade de efluentes sanitários e industriais, pois possui o maior número de indústrias e tem Lages como principal contribuinte.

As indústrias da madeira são as principais fontes de poluição industrial, a maioria é de pequeno porte, mas estão presentes em todos os municípios (maior concentração em Lages, Campos Novos e Curitiba). Estas geram principalmente resíduos sólidos em forma de serragens e uma parte deste é jogado nos mananciais hídricos. Outras atividades industriais que também se encontram em grande

quantidade na região são as indústrias de vestuário, calçado e artigos de tecidos, indústrias de produção de minerais não-metálicos, entre outros. Há também outros tipos de indústrias de alto potencial poluidor nas maiores cidades, como as indústrias de papel e papelão, químicas e de peles.

Nesse contexto destaca-se a localização na foz do rio Canoas, do reservatório da UHE Campos Novos. O primeiro enchimento do reservatório iniciou em dezembro de 2005, mas devido ao rompimento ocorrido em uma comporta de um dos túneis de desvio em junho de 2006, o segundo enchimento iniciou em novembro de 2006.

A UHE Campos Novos é um dos empreendimentos do setor elétrico mais importante em implantação em Santa Catarina, seja pelo porte da barragem, pela profundidade do reservatório ou pela quantidade de energia elétrica que é produzida. Localiza-se na divisa dos municípios de Campos Novos (margem direita do rio Canoas) e Celso Ramos (margem esquerda), distante a 380km de Florianópolis, capital do Estado (Figura 5-III).



**Figura 5-III: Localização da UHE Campos Novos**

Fonte: ENERCAN, 2007.

O reservatório da usina tem uma área de 32,9 km<sup>2</sup>, sendo 8,7 km<sup>2</sup> calha do rio Canoas, possui volume total de 1.477 hm<sup>3</sup> e 53 km de comprimento.

Os municípios de Campos Novos, Celso Ramos, Abdon Batista e Anita Garibaldi, todos localizados em Santa Catarina, possuem áreas atingidas pelo reservatório da hidrelétrica.

## 5.2 Preparação dos dados

As informações utilizadas neste estudo fazem parte de um banco de dados de um monitoramento de qualidade das águas superficiais do reservatório da usina hidrelétrica de Campos Novos, em Santa Catarina.

### 5.2.1 Variáveis ambientais

As variáveis utilizadas para calibração do sistema difuso foram definidas com base na bibliografia existente sobre o processo de eutrofização e floração de algas, descritas no item 4.1 deste trabalho. Assim, as variáveis de entrada do sistema difuso são: nitrogênio, fósforo, temperatura, pH e transparência (profundidade de Secchi); e de saída a clorofila a. Foram utilizadas técnicas estatísticas de análise de correlação para definição das formas mais relevantes de N e P. Os dados que estavam relacionados a clorofila zero foram eliminados.

### 5.2.2 Periodicidade, Coleta e Preservação das amostras

Os dados utilizados para calibração referem-se aos resultados das coletas realizadas durante o período de dez/06 a out/07 com periodicidade mensal.

A coleta e preservação das amostras, bem como a determinação da maioria das variáveis físico-químicas e biológicas foram realizadas pelo laboratório de análises de água, efluentes e agroquímicos da Estação Experimental da Epagri de Itajaí (EE-Itajaí).

A metodologia aplicada na coleta e preservação das amostras, bem como na análise dos parâmetros selecionados, foi realizada de acordo com as recomendações do Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20ª Edição e da Environmental Protection Agency – EPA. Na impossibilidade de seguir rigorosamente os procedimentos internacionais, foram adotados os procedimentos adaptados e difundidos pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB.

As amostras de água foram coletadas com frascos de polietileno branco na camada superficial do corpo hídrico. Imediatamente após a coleta, as amostras foram resfriadas e acondicionadas em temperatura inferior a 4°C para posteriormente serem enviadas ao laboratório num prazo máximo de 48h.

Dentre os parâmetros utilizados neste trabalho, o pH, a transparência e temperatura da água foram medidos em campo.

### 5.2.3 Métodos Analíticos

A Tabela 5-I lista os métodos analíticos empregados para realizar as determinações dos parâmetros estudados.

**Tabela 5-I: Métodos analíticos empregados**

| <b>Parâmetros</b> | <b>Método Analítico</b> |
|-------------------|-------------------------|
| Clorofila a       | Espectrometria VIS      |
| Fósforo total     | Colorimetria            |
| Transparência     | Disco de Secchi         |
| Nitrogênio        | Titulometria            |
| pH                | Potenciometria          |
| Temperatura       | Potenciometria          |

#### 5.2.4 Pontos de Coleta

Os pontos de coleta monitorados nos 11 meses de estudo são apresentados na Tabela 5-II com uma breve descrição da sua localização e coordenados UTM.

**Tabela 5-II: Pontos de coleta**

| <b>Ponto</b> | <b>Localização</b>  | <b>Município</b> | <b>Coordenadas UTM</b> |         |
|--------------|---|------------------|------------------------|---------|
| PA           | Próximo à comunidade de Barra do Arroio                                 | Abdon Batista    | 485440                 | 6945280 |
| PB           | Cerca de 1km da foz Lajeado dos Antunes                                 | Anita Garibaldi  | 479372                 | 6944461 |
| PC           | Cerca de 1km da foz Rio Ibicuí  | Campos Novos     | 476621                 | 6948401 |
| PD           | Próximo à confluência com o Arroio dos Félix                            | Campos Novos     | 474519                 | 6943541 |
| PE           | Próximo ao eixo da barragem   | Campos Novos     | 469386                 | 6945359 |
| P6           | Na ponte entre os municípios de Abdon Batista e Anita Garibaldi         | Abdon Batista    | 497897                 | 6942533 |
| P7           | Balsa da comunidade de Bom Jesus  | Abdon Batista    | 491722                 | 6940861 |
| P10          | Jusante da UHCN, na área de remanso da usina hidrelétrica de Machadinho | Campos Novos     | 460368                 | 6947517 |

A espacialização dos pontos de coleta de água, cujas coordenadas geográficas encontram-se listadas na tabela acima, está distribuída no mapa georreferenciado do reservatório da UHE Campos Novos, como apresentado na Figura 5-IV.



### 5.3 Modelagem baseada em regras difusas

As seguintes estruturas foram definidas para desenvolver o sistema de regras difusas no Fuzzy Logical Toolbox:

#### 1. Parâmetros estruturais

- Variáveis de entrada e saída

Conforme citado no item 5.2.1, as variáveis de entrada do sistema difuso são: nitrogênio, fósforo, temperatura, pH e transparência (profundidade de Secchi); e de saída a clorofila *a*. Essas variáveis foram analisadas graficamente, quando se buscou identificar as melhores correlações entre as formas de N e P e clorofila. Como resultado, verificou-se que o nitrogênio inorgânico e o fosfato seriam as formas de N e P com melhor correlação, conforme observado na Tabela 5-III.

Portanto, o sistema é composto de algumas variáveis de entrada e apenas uma de saída, o que, na literatura é descrito como MISO, posto que em Inglês MISO significa “multiple input and simple output”.

**Tabela 5-III: Resultados da correlação dos parâmetros com a clorofila *a***

|                                | Correlação com a clorofila <i>a</i> |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Nitrito (mg/L N)               | -0,25                               |
| Nitrogênio orgânico (mg/L N)   | -0,19                               |
| Nitrogênio Inorgânico (mg/L N) | 0,63                                |
| Nitrogênio total (mg/L N)      | 0,26                                |
| Fósforo Total (mg/L P)         | 0,26                                |
| Fosfato (mg/L P)               | 0,29                                |
| Temperatura (°C)               | 0,40                                |
| pH (unidades)                  | 0,24                                |
| Secchi (m)                     | 0,24                                |

- Partição dos domínios e Variáveis lingüísticas

Para a definição da partição dos domínios avaliou-se as duas principais dificuldades que poderiam existir. Deste modo, muitas partições podem resultar em grande quantidade de parâmetros a serem ajustados, enquanto um número muito

pequeno de partições pode resultar em modelos que não conseguem representar a relação presente no conjunto de dados. Assim, definiu-se 5 partições para as variáveis de entrada e 9 para a variável de saída, esta última para obter um ajuste mais fino.

As variáveis lingüísticas atribuídas as partições estão descritas na Tabela 5-III e foram definidas com base na concentração dos parâmetros físicos, químicos e biológicos. As descrições lingüísticas para cada variável estão descritas no Apêndice A.

**Tabela 5-IV: Variáveis lingüísticas e partição dos domínios**

| <b>Varáveis lingüísticas de entrada</b> | <b>Significado</b> |
|---|--------------------|
| baixa                                   | baixa              |
| m. baixa                                | média baixa        |
| média                                   | média              |
| m.alta                                  | média alta         |
| alta                                    | alta               |
| <b>Varáveis lingüísticas de saída</b>   | <b>Significado</b> |
| extrema.b                               | extremamente baixa |
| muito.b                                 | muito baixa        |
| baixa                                   | baixa              |
| m.baixa                                 | média baixa        |
| média                                   | média              |
| m.alta                                  | média alta         |
| alta                                    | alta               |
| muito.a                                 | muito alta         |
| extrema.a                               | extremamente alta  |

- Estrutura da base de regras

As regras (Apêndice A) foram descritas considerando as possíveis interações entre as variáveis selecionadas, interações estas que são baseadas nas informações contidas na bibliografia existente sobre a eutrofização e eventos de florações de algas. As regras do sistema têm a forma:

“SE *nitrogênio* é *médio* E *temperatura* é *alta* OU..... ENTÃO *clorofila* é *médio*”

- Funções de pertinência

Até o momento, ainda não se comprovou maior eficácia de uma forma em relação às demais. Por esse motivo, as formas mais simples, tais como as formas triangulares e trapezoidais, são as mais utilizadas. Neste trabalho, por ser em nível de graduação, optou-se pela forma trapezoidal.

- Sistema de inferência

Ambos os tipos de regras, Mamdani e Takagi-Sugeno, têm sido extensivamente utilizados em modelagem e sistemas de controle. Regras do tipo Sugeno, embora mais eficientes computacionalmente, são mais complexas e menos intuitivas do que as regras do tipo Mamdani. Por isso, utilizou-se o tipo Mamdani.

- Método de defuzzificação

Foram testados os principais métodos: Primeiro Máximo (SOM); Método da Média dos Máximos (MOM) e Método do Centro da Área (COA) e biseção.

## 2. Parâmetros de sintonização

- Ajuste das regras

Após a definição de regras é realizado o ajuste dos parâmetros que envolve um processo de tentativa e erro, em que o conjunto de regras é sistematicamente inferido com base nos valores dados para as variáveis de entrada e os resultados desta inferência são comparados aos valores dados para as variáveis de saída.

- Calibração do sistema

A calibração do sistema foi realizada com o auxílio de um experimento computacional. Este consistia na automática verificação da relação entrada/saída contida nos dados através da adoção de uma medida de erro, neste caso o erro médio quadrático (soma dos quadrados das diferenças entre as saídas produzidas pelo sistema e as saídas desejadas). A estrutura do experimento computacional encontra-se no Apêndice B.

- Validação

O modelo é avaliado quanto ao seu desempenho em termos de eficácia e eficiência computacional. A eficácia consistiu na verificação da capacidade do modelo em reproduzir as saídas desejadas. A eficiência computacional está relacionada com a simplicidade do modelo proposto.

## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da definição das variáveis do sistema e das partições dos domínios citados no item 5.3, gerou-se um conjunto inicial de regras. Para melhor identificação dessas houve a necessidade de expandir o número de partições para a variável de saída (clorofila a). Assim, as variáveis de entrada permaneceram com 5 partições e a variável de saída ampliou para 9. O detalhamento da faixa de valores das partições encontra-se na Tabela 6-I.

**Tabela 6-I: Faixa de valores das partições**

| <b>Variáveis Lingüísticas (entrada)</b> | <b>Nitrogênio Inorgânico (mg/L N)</b> | <b>Fosfato (µg/L P-PO<sub>4</sub>)</b> | <b>Temperatura (°C)</b>   | <b>pH</b> | <b>Transparência (m)</b> |
|---|---------------------------------------|--|---------------------------|-----------|--------------------------|
| baixa                                   | 0 - 1,0                               | 1,0 - 20                               | 5 - 12                    | 4 - 5     | 0,1 - 0,5                |
| m. baixa                                | 0,5 - 2,0                             | 10 - 40                                | 7 - 18                    | 4,5 - 6,5 | 0,35 - 1,2               |
| média                                   | 1,5 - 3,0                             | 30 - 60                                | 15 - 25                   | 6,3 - 7,5 | 1,0 - 2,1                |
| m.alta                                  | 2,5 - 4,5                             | 50 - 80                                | 21 - 31                   | 7,0 - 8,5 | 1,8 - 3,3                |
| alta                                    | 3,5 - 6,0                             | 70 - 150                               | 28 - 42                   | 8,0 - 10  | 2,5 - 4,5                |
|   |                                       | <b>Variáveis Lingüísticas (saída)</b>  | <b>Clorofila a (µg/L)</b> |           |                          |
|   |                                       | extrema.b                              | 1 - 5                     |           |                          |
|   |                                       | muito.b                                | 3,3 - 11                  |           |                          |
|   |                                       | baixa                                  | 8,8 - 17                  |           |                          |
|   |                                       | m.baixa                                | 14 - 25                   |           |                          |
|   |                                       | média                                  | 22 - 41                   |           |                          |
|   |                                       | m.alta                                 | 35 - 65                   |           |                          |
|   |                                       | alta                                   | 50 - 80                   |           |                          |
|   |                                       | muito.a                                | 70 - 100                  |           |                          |
|   |                                       | extrema.a                              | 96 - 110                  |           |                          |

Na etapa de ajuste das regras, primeiramente foram identificados, visualmente, os maiores desvios de resposta entre a variável de entrada e a saída desejada. Posteriormente, identificaram-se as regras que estavam influenciando a resposta em cada caso. Os parâmetros das funções de pertinência (p.ex.núcleo e suporte) foram, então, modificados, de forma a corrigir os desvios encontrados. Estas modificações, contudo, devido à interdependência entre as regras, requereram, por algumas vezes, o ajuste de outras regras que não aquelas relacionadas aos maiores desvios. Por esse motivo, alguns destes desvios não puderam ser corrigidos, para o que seria necessária a inclusão de novas regras.

Para a avaliação de quão bem o sistema de regras representava a relação entrada/saída contida nos dados, utilizou-se um experimento computacional para verificar automaticamente a medida do erro médio quadrático. Quando o desempenho do modelo de regras difusas foi considerado insatisfatório, um novo conjunto de regras foi selecionado e o modelo novamente ajustado.

## 6.1 Calibração

Na etapa de calibração, foram testados diferentes tipos de inferência e agregação do sistema Mandani além dos diferentes métodos de defuzzificação. O menor erro médio quadrático foi obtido utilizando a opção de inferência pelo mínimo (min) e agregação pelo máximo (max) além da defuzzificação pelo método do centróide. A Figura 6-I exibe o gráfico resultante da calibração do sistema difuso desenvolvido.

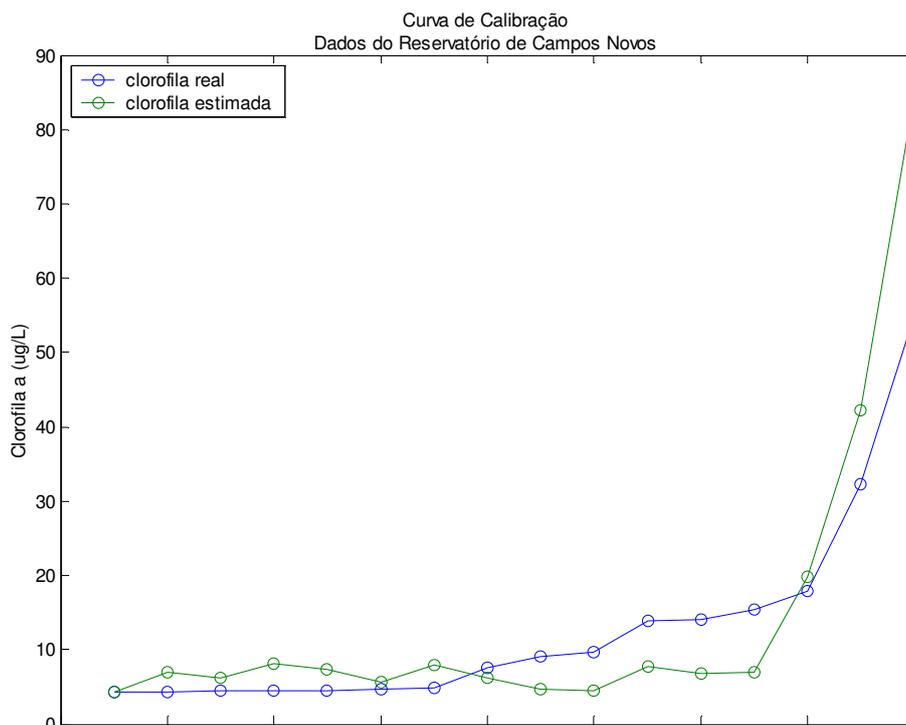


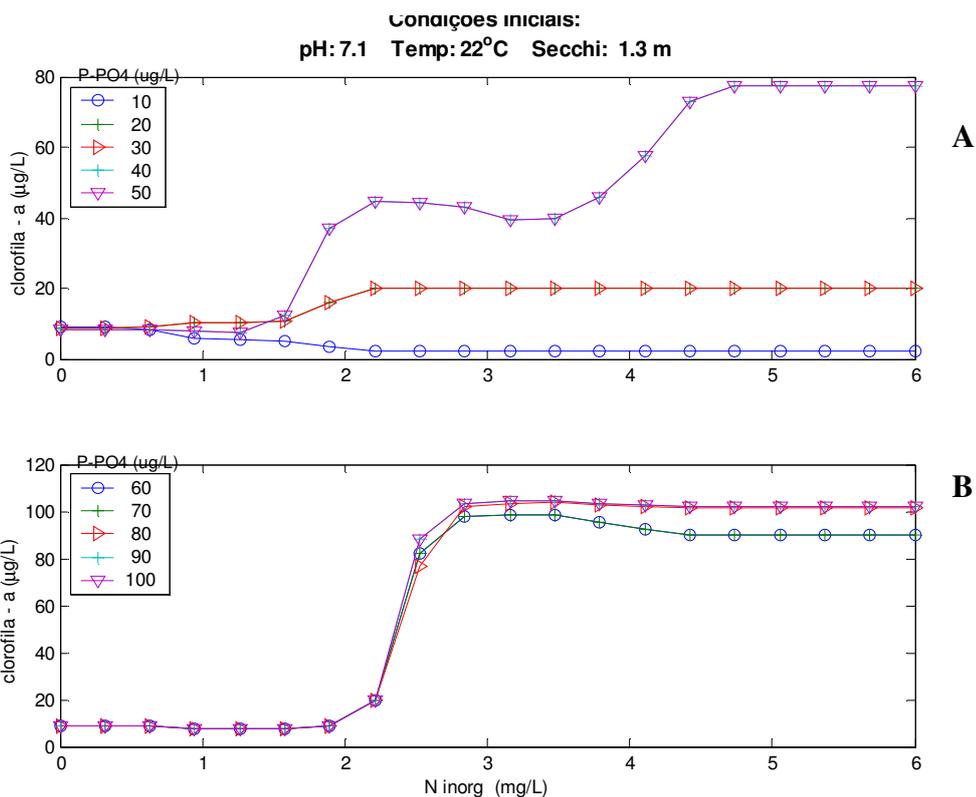
Figura 6-I: Curva de calibração

No trecho acima de 20 µg/L, e portanto nas faixas mais altas dos valores, o sistema está superestimando a clorofila *a* real. Neste caso é desejável esse comportamento uma vez que o resultado contrário poderia subestimar uma possível floração de algas. Porém, verifica-se que um ajuste fino do sistema ainda pode ser realizado para haver a utilização segura do mesmo.

## 6.2 Análise de sensibilidade

Nessa análise é possível verificar a sensibilidade da produção de clorofila *a* numa dada condição. Também, pode ser verificada a maior variação em *y* para uma dada variação em *x*.

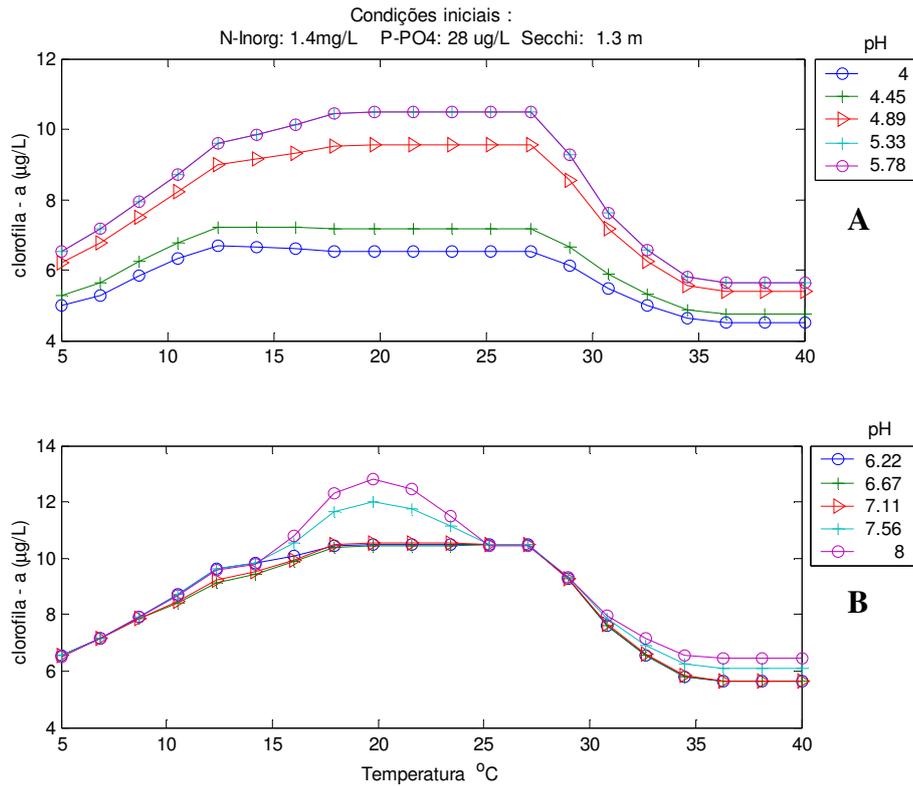
Foram inseridos como condição inicial os valores médios dos parâmetros do banco de dados do monitoramento. Na Figura 6-II constam as curvas de diferentes concentrações de fosfato a partir da variação do nitrogênio.



**Figura 6-II: Diversas curvas de fosfato com a variação de nitrogênio**

O gráfico 'A' indica que no sistema não há aumento significativo de clorofila *a* quando se observa a primeira curva de concentração (10 µg/L). Nas curvas seguintes, 20 e 30 µg/L P-PO<sub>4</sub>, praticamente sobrepostas, há um aumento na clorofila *a* a partir de 1,5 mg/L de N, seguida de uma estabilização. Nas duas últimas curvas, 40 e 50 µg/L P, verifica-se a consolidação do aumento da clorofila *a* quando o nitrogênio encontra-se acima de 4,0 mg/L. Portanto, nesse gráfico é indicado que haverá um aumento significativo de clorofila *a* a partir de 40 µg/L P-PO<sub>4</sub> combinado a faixa acima de 4,0 mg/L N.

No gráfico 'B' o sistema demonstra pequenas oscilações para diferentes concentrações de fosfato. Para o refinamento do sistema pode ser realizado um ajuste nas regras de combinação de fosfato e nitrogênio, nas faixas 'média.alta' e 'alta' respectivamente.

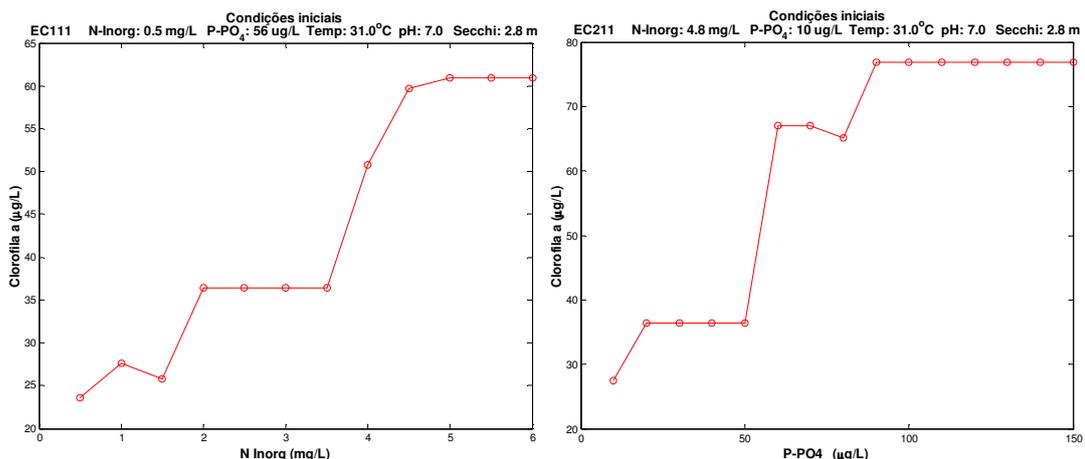


**Figura 6-III: Diversas curvas de pH com a variação de temperatura**

Conforme esperado, na Figura 6-III observa-se o aumento da clorofila *a* acompanhando as curvas de concentrações de pH e a variação da temperatura. Assim, quando pH e temperatura são baixos a clorofila *a* tem baixa concentração. A medida que se aproxima dos valores ideais (em torno de 18 e 22°C), há um aumento na produção do pigmento. Também constata-se nesse sistema, assim como no comportamento real, que os nutrientes tem bastante influência na produção da clorofila *a* em função desse gráficos não exibirem altas concentrações da mesma quando avaliados apenas esses dois parâmetros (pH e temperatura).

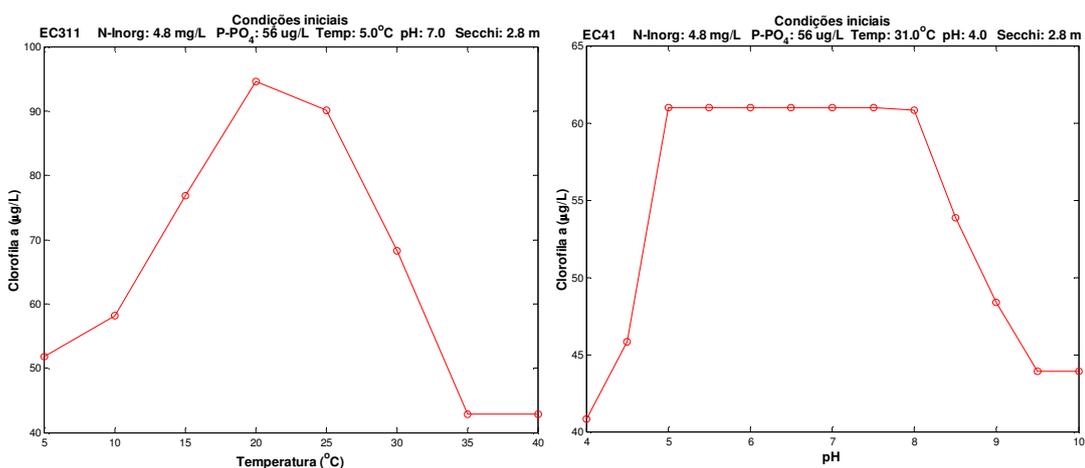
### 6.3 Cenário Ambiental

O experimento computacional apresentado na seqüência permite a observação da variação de um parâmetro, em termos de concentração, combinado à constância dos demais. Foram testados diversos cenários, mas optou-se por exemplificar apenas um. Deste modo, as Figuras 6-IV a 6-VI exibem o comportamento do sistema na condição de um verão quente. Para tal, foram inseridos os maiores valores de N, P, temperatura e profundidade de Secchi registradas no banco de dados do longo de todo o período de monitoramento, porém o pH foi inserido com um valor próximo da idealidade (7,0) do desenvolvimento das algas.



**Figura 6-IV: Comportamento do nitrogênio e fosfato – verão quente**

Os gráficos de nitrogênio e fosfato apresentaram desempenho próximo do desejado. Exceção para um ponto na faixa ‘média.baixa’ do N ( 1,5 mg/L) e outro na faixa ‘alta’ do fosfato (70 µg/L) que deveriam apresentar elevação de clorofila *a*.



**Figura 6-V: Comportamento da temperatura da água e pH – verão quente**

A temperatura demonstrou comportamento considerado satisfatório já que a maior produção de clorofila *a* ocorreu na faixa ótima, entre 20 e 25°C. Na faixa ‘baixa’ (5 a 12°C) poderia existir um crescimento menos acentuado da produção do pigmento.

Quanto ao pH, este também apresentou maior produção de clorofila *a* na faixa considerada ideal para o desenvolvimento das algas (6 a 8) o que demonstra bom desempenho. Igualmente, a curva poderia indicar menor crescimento da produção na faixa ‘baixa’ (<5).

A Figura 6-VI exibe a variação da transparência, favorecendo o crescimento da produção da clorofila *a* a partir de poucos centímetros (0,1m). No comportamento da curva verifica-se apenas um dado contraditório, no valor 0,5 m de profundidade, o qual em vez de ter um ligeiro pico na produtividade deveria estar menos acentuado. Porém, para os demais pontos observa-se a performance esperada para algumas

espécies de algas que tem o seu crescimento favorecido com o aumento da luminosidade.

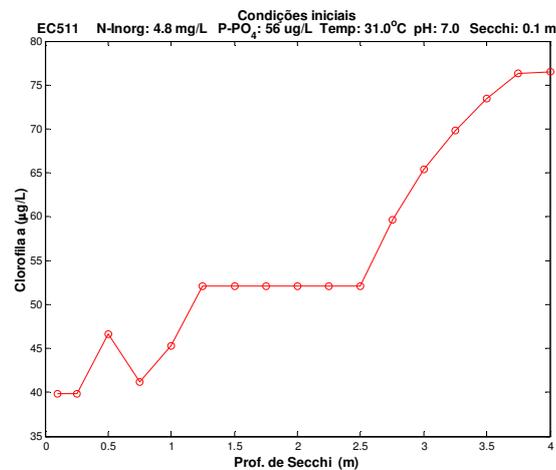


Figura 6-VI: Comportamento da transparência – verão quente

## 7. CONCLUSÕES

Com base no exposto apresentado, conclui-se que:

- No resultado da calibração (item 6.1) evidenciou-se um comportamento desejável do sistema para altas concentrações de clorofila *a*, uma vez que o resultado contrário poderia subestimar uma possível floração de algas. Porém, verifica-se que um ajuste fino ainda pode ser feito para tornar o sistema mais robusto.
- Na análise de sensibilidade (item 6.2) foi observado bom desempenho do pH, temperatura e transparência assim como das curvas de diferentes concentrações de fosfato a partir da variação do nitrogênio (gráfico 'A'). Apenas no gráfico 'B', as concentrações de fosfato e nitrogênio, nas faixas 'média.alta' e 'alta', podem ser melhoradas para não apresentar a leve queda exibida na concentração de clorofila *a*.
- Na condição de um cenário ambiental simulado, no caso caracterizado por verão quente, o nitrogênio e fosfato apresentaram desempenho próximo do desejado com exceção de um ponto no gráfico de N (1,5 mg/L) e outro no de P (70 µg/L) que deveriam apresentar elevação de clorofila *a*. A temperatura e o pH também demonstraram bom desempenho já que a maior produção de clorofila *a* ocorreu nas faixas consideradas ótimas para o desenvolvimento de algas (entre 20 e 25°C e 6 a 8 unidades, respectivamente). Um detalhe apenas nas faixas 'baixas' de ambos que poderia existir um crescimento menos acentuado da produção do pigmento. E por fim, no comportamento da curva da transparência verificou-se apenas um dado contraditório, no valor 0,5 m de

profundidade, o qual apresenta um ligeiro pico na produtividade e deveria estar menos acentuado. Porém, para todos os demais pontos a performance foi alcançada como previsto.

- O sistema proposto, de modo geral, reproduziu bem a dinâmica esperada para a produção da clorofila *a*.
- A investigação empreendida neste trabalho envolveu a sistematização de uma metodologia para identificação e ajuste de um modelo de regras difusas e sua aplicação em um estudo de caso prático. Cabe mencionar que não se realizou a otimização do modelo de regras difusas necessário para a aplicação prática. Um melhor desempenho deste modelo sempre pode ser obtido através da avaliação do número de regras. Isto, contudo, pode demandar um tempo muito grande para o ajuste das mesmas, uma vez que este ajuste é realizado num processo de tentativa e erro.

## 8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

- Neste trabalho pretendeu-se, tão somente, mostrar a possibilidade de se obter uma representação do processo de incremento da produtividade do meio, baseando-se, principalmente, num conjunto de dados, e que o modelo assim construído possa, de fato, constituir uma ferramenta alternativa em situações com necessidade de prognósticos.

- O padrão de flutuação do fitoplâncton em lagos tropicais é controlado por alterações abruptas e repentinas das condições bióticas e abióticas do meio, sendo que nestes ecossistemas o número de tais alterações é muito maior do que em lagos de regiões temperadas (LEWIS, 1978 apud ESTEVES, 1998).

Assim, recomenda-se além do uso de ferramentas de prognóstico, como a que foi desenvolvida neste trabalho, o conhecimento da dinâmica da comunidade fitoplânctônica, bem como os fatores bióticos como herbivoria e parasitismo, estes que podem controlar a variação temporal dessa comunidade.

- Infelizmente nenhuma técnica de prevenção é simples. Porém, o casamento de uma ferramenta de caráter preditivo aliado ao conhecimento das flutuações temporais e espaciais da composição e biomassa do fitoplâncton pode subsidiar de maneira imediata decisões de órgãos públicos e privados no sentido de evitar danos à população como aquele citado neste trabalho, ocorrido no Estado de Pernambuco em 1996.

- A prevenção de florações de algas tóxicas é a abordagem mais coerente a ser adotada pelos responsáveis pelo uso de um manancial, para evitar os problemas potenciais de toxicidade e de gosto e odor na água, causados por esses eventos. E considerando os aspectos relacionados aos problemas ambientais e de saúde pública, fica evidente a necessidade da formação de uma rede de acompanhamento de

florações no país, sobretudo em reservatórios de abastecimento de água, para prever e controlar tais eventos.

## 9. BIBLIOGRAFIA

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas Hidrológico. ANEEL/SRH, 1997.

AZEVEDO, S.M.V. Toxinas de Cianobactéria: Causas e Conseqüências para a Saúde Pública. Medicina on Line, v.1, Ano 1, n.3. julho/agosto/setembro,1998.

BARBALHO, V. M. S. Sistemas baseados em conhecimento e lógica difusa para simulação do processo chuva-vazão. Rio de Janeiro. 2001. 94 f. Tese (Ciências em Engenharia Civil) - COPPE/UFRJ.

BARROS, L.C. Sobre sistemas dinâmicos fuzzy: Teoria e Aplicações. Tese de doutorado IMECC-UNICAMP, Campinas. 1997. 103p. Disponível em: <www.feagri.unicamp.br>.

CARVALHO PINTO-SILVA, C.R. Incidência de Fitoplâncton Tóxico na Costa Catarinense: Impacto na Saúde Pública e no Meio Ambiente. Florianópolis. 2005.168p. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina.

CASTANHO, M.J.P., Construção e avaliação de um modelo matemático para prever a evolução do câncer de próstata e descrever seu crescimento utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. Tese de Doutorado. FEEC/UNICAMP, Campinas. 2005 125p. Disponível em: <www.feagri.unicamp.br>.

ENERCAN. Campos Novos Energia S.A. Disponível em <<http://www.enercan.com.br>>. Acesso em: 07 de outubro de 2007.

EPAGRI/CIRAM. Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina. Monitoramento da Qualidade das Águas Superficiais da Bacia do Rio Canoas. Relatório Final da Fase Rio – Monitoramento Físico-Químico.2005.

ESTEVES, F. A. Fundamentos de Limnologia. Rio de Janeiro: Interciência, 1998. 2ª. ed.

FERREIRA, A.H.F. et al. Ocorrência de Anabaena Spiroides (Cianobactéria) no estuário de Lago dos Patos (RS, Brasil) no verão-outono de 1998. Atlântica, Rio Grande, 26 n. único: 17-26, 2004.

GRELLMANN, C. Aspectos da morfologia e da ecologia de *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszinska) Seenayya et Subba Raju e da produção de cianotoxinas na Lagoa do Peri, Florianópolis, SC, Brasil. Florianópolis. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.

HOFFMANN, D. M.; CUNHA, H. D.; CLARAMUNT, L. A.; et al. Planejamento estratégico sustentável dos recursos hídricos da bacia do Rio Canoas. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 110p.

JARDIM, F.A; AZVEDO, Sandra M.O.F. Cianobactérias em Águas para Abastecimento Público e o Cumprimento da Legislação Brasileira. Boletim da Sociedade Brasileira de Limnologia. n.35 (3).2006.

MATTHIENSEN, A., YUNES, J.S. e CODD, G.A. Ocorrência, Distribuição e Toxicidade de Cianobactérias no Estuário da Lagoa dos Patos, RS. Rev.Brasil Biol.39 (3). 361-376. Setembro de 1999.

MAGNAGO, K.F., Abordagem Fuzzy em Modelos Populacionais Discretos: Metapopulação de Moscas Varejeiras. Tese de Doutorado. IMECC/UNICAMP, Campinas. 2005. Disponível em: <www.feagri.unicamp.br>.

MONDARDO, R.I. Influência da Pré-oxidação na Tratabilidade das Águas via Filtração Direta Descendente em Manancial com Elevadas Concentrações de Microalgas e Cianobactérias. Florianópolis. 2004. Dissertação. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina.

PEIXOTO, M. S., Sistemas dinâmicos e controladores fuzzy: um estudo sobre a dispersão da morte súbita dos citros em São Paulo. Tese de Doutorado. IMECC/UNICAMP, Campinas. 2005.

SANDRA-SANDRI, C.C. Lógica Nebulosa. V Escola de Redes Neurais.1999. ITA/São José dos Campos – SP.

SDS. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável. Diagnóstico Geral das Bacias Hidrográficas de Santa Catarina. Cd Rom, Florianópolis, 1995.

SIRTORI, C. Estudo da potencialidade do processo fotoeletroquímico para remediação de águas contaminadas por cianobactérias. Dissertação. Setor de Ciências Exatas, Universidade Federal do Paraná.2006.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS. FEAGRI & IMECC. Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5. 2004.

YUNES, J.S; LEMES, A.F.G. O ambiente e as cianobactérias. Unidade de Pesquisas em Cianobactérias, UPC/FURG. 2006.

WOSIACK, A.C (2005). Dinâmica da Comunidade de Cianobactérias da Praia Artificial de Entre Rios do Oeste, Reservatório de Itaipu, Pr. Curitiba, Universidade Federal do Paraná

ZADEH, L. A., 1965. Fuzzy sets. Information and Control 8, 338-353.

## APÊNDICE A – MODELO DE REGRAS DIFUSAS

### A.1 Descrições Linguísticas das Variáveis de Entrada

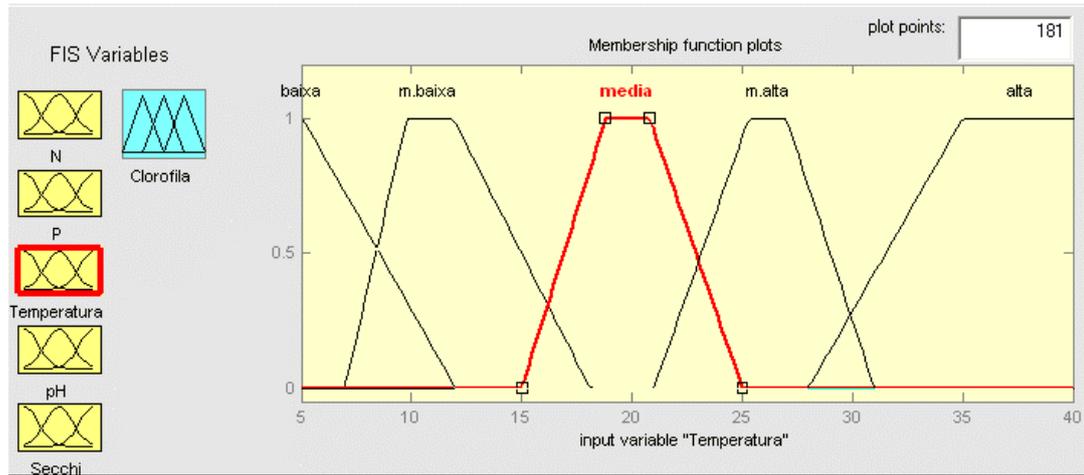


Tabela A 1: Descrição linguística da variável de entrada Temperatura

### A.2 Descrições Linguísticas das Variáveis de Saída

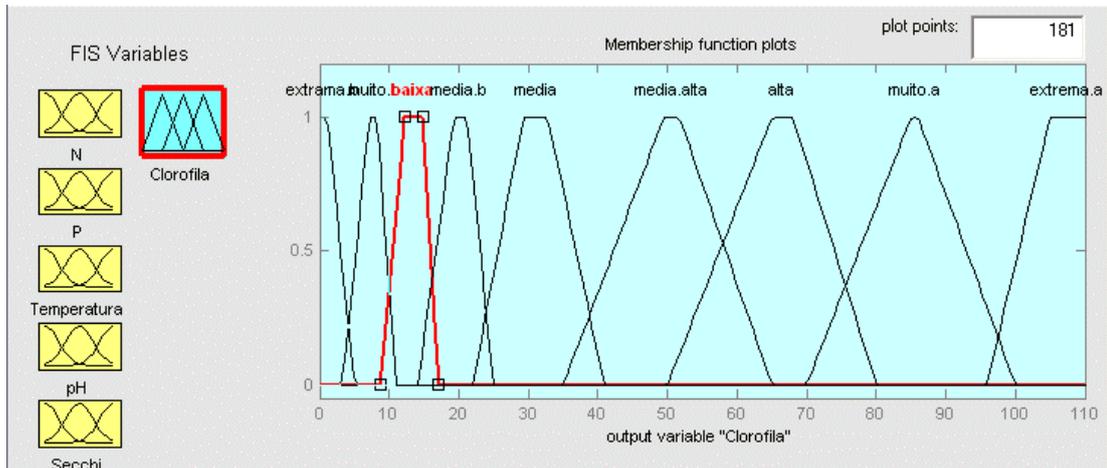


Tabela A 2: Descrição linguística da variável de saída

### A.3 Base de Regras Difusas

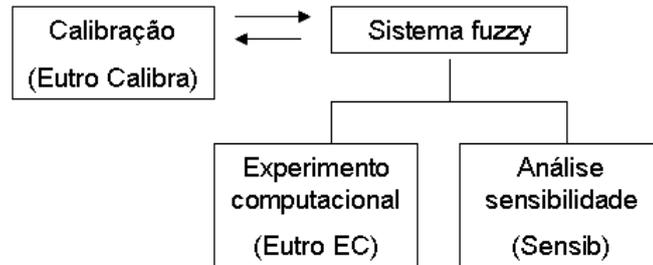
1. If (N is baixa) or (P is baixa) or (ph is baixa) then (clorofila is extrema .b)
2. If (temperatura is alta) or (ph is alta) then (clorofila is extrema .b)
3. If (temperatura is baixa) then (clorofila is extrema.b)
4. If (secchi is alta) then (clorofila is extrema.a)
5. If (N is baixa) and (P is baixa) then (clorofila is muito.b)
6. If (N is m.baixa) and (P is m.baixa) then (clorofila is baixa)
7. If (N is media) and (P is media) and (ph is m.baixa) then (clorofila is muito.b)
8. If (N is m.baixa) and (P is m.baixa) and (temperatura is m.baixa) then (clorofila is muito.b)
9. If (temperatura is m.baixa) and (ph is media) then (clorofila is muito.b)
10. If (ph is m.baixa) and (secchi is m.baixa) then (clorofila is muito.b)
11. If (N is m.baixa) and (P is m.baixa) and (temperatura is media) and (ph is media) then (clorofila is baixa)
12. If (N is baixa) and (P is baixa) and (ph is media) then (clorofila is baixa)
13. If (N is baixa) and (P is baixa) and (temperatura is m.alta) then (clorofila is baixa)
14. If (N is m.alta) and (P is m.alta) and (secchi is m.baixa) then (clorofila is baixa)
15. If (ph is media) and (secchi is m.baixa) then (clorofila is baixa)
16. If (N is media) and (P is media) and (temperatura is m.baixa) then (clorofila is baixa)
17. If (N is m.baixa) and (P is media) and (temperatura is m.baixa) and (ph is m.baixa) and (secchi is m.baixa) then (clorofila is baixa)
18. If (N is media) and (P is m.baixa) then (clorofila is media.b)
19. If (N is m.alta) and (P is m.alta) and (ph is m.alta) then (clorofila is extrema.a)
20. If (N is media) and (P is media) and (temperatura is m.alta) then (clorofila is media.b)
21. If (temperatura is media) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is media.b)
22. If (N is alta) and (P is alta) and (temperatura is m.alta) then (clorofila is muito.a)

23. If (N is media) and (P is media) and (temperatura is media) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is media.alta)
24. If (N is m.alta) and (P is m.alta) and (temperatura is media) and (ph is media) and (secchi is m.alta) then (clorofila is extrema.a)
25. If (N is m.alta) and (P is m.alta) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is muito.a)
26. If (N is m.alta) and (P is m.alta) and (temperatura is m.alta) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is alta)
27. If (N is alta) and (P is alta) and (temperatura is media) and (ph is media) then (clorofila is extrema.a)
28. If (N is alta) and (P is m.alta) and (temperatura is media) and (ph is media) then (clorofila is extrema.a)
29. If (temperatura is alta) then (clorofila is extrema.b)
30. If (N is baixa) then (clorofila is baixa)
31. If (N is baixa) and (P is media) and (temperatura is media) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is extrema.b)
32. If (N is baixa) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is extrema.b)
33. If (N is baixa) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is extrema.b)
34. If (N is m.baixa) and (P is m.baixa) and (temperatura is media) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is extrema.b)
35. If (N is baixa) and (P is media) and (temperatura is alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is media.b)
36. If (N is m.baixa) and (P is media) and (temperatura is alta) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is muito.b)
37. If (N is baixa) and (P is m.baixa) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is muito.b)
38. If (N is m.baixa) and (P is media) and (temperatura is alta) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is muito.b)
39. If (N is m.baixa) and (P is media) and (temperatura is alta) and (ph is alta) and (secchi is media) then (clorofila is muito.b)
40. If (N is m.alta) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is m.alta) then (clorofila is baixa)

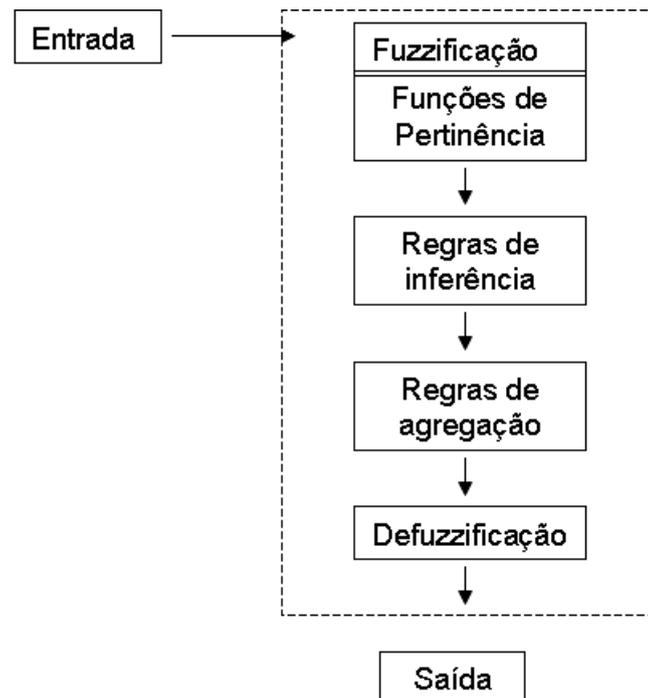
41. If (N is m.baixa) and (P is m.baixa) and (temperatura is alta) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is baixa)
42. If (N is m.alta) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is media.alta)
43. If (N is media) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is m.alta) and (secchi is media) then (clorofila is media.b)
44. If (N is m.alta) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then ( clorofila is media.b)
45. If (N is media) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is media.alta)
46. If (N is alta) and (P is media) and (temperatura is m.alta) and (ph is media) and (secchi is media) then (clorofila is muito.a)
47. If (N is baixa) then (clorofila is muito.b)
48. If (Secchi is baixa) then (clorofila is baixa)
49. If (N is m.alta) and (P is alta) then (clorofila is extrema.a)
50. If (N is alta) and (P is m.alta) then (clorofila is muito.a)
51. If (N is alta) and (P is alta) and (temperatura is media) and (ph is media) and (secchi is m.alta) then (clorofila is extrema.a)
52. If (N is m.alta) and (P is m.alta) and (temperatura) then (clorofila is extrema.a)
53. If (N is m.alta) and (temperatura is m.alta) then (clorofila is muito.a)
54. If (ph is baixa) then (clorofila is extrema.b)
55. If (ph is alta) then (clorofila is extrema.b)
56. If (temperatura is baixa) then (clorofila is extrema.b)
57. If (temperatura is alta) then (clorofila is extrema.b)
58. If (N is alta) and (P is alta) then (clorofila is extrema.a)

## APÊNDICE B - ESTRUTURA DOS EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS

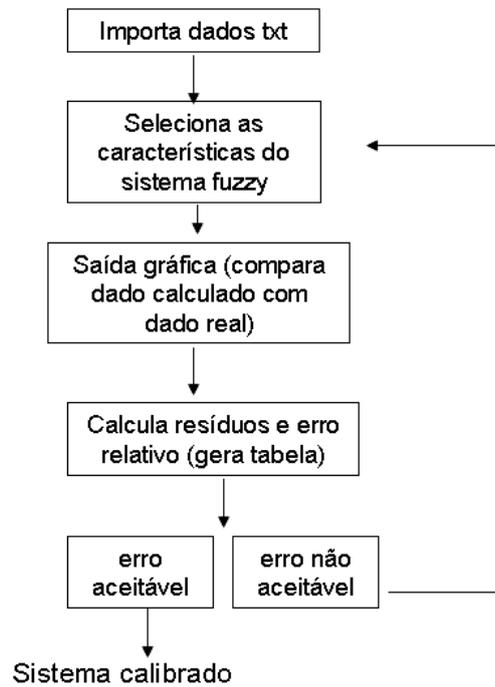
### B.1 – Lógica do sistema utilizado



### B.2 – Sistema Fuzzy



### B.3 – Sistema Eutro Calibra



### B.4 – Sistema Eutro EC

