

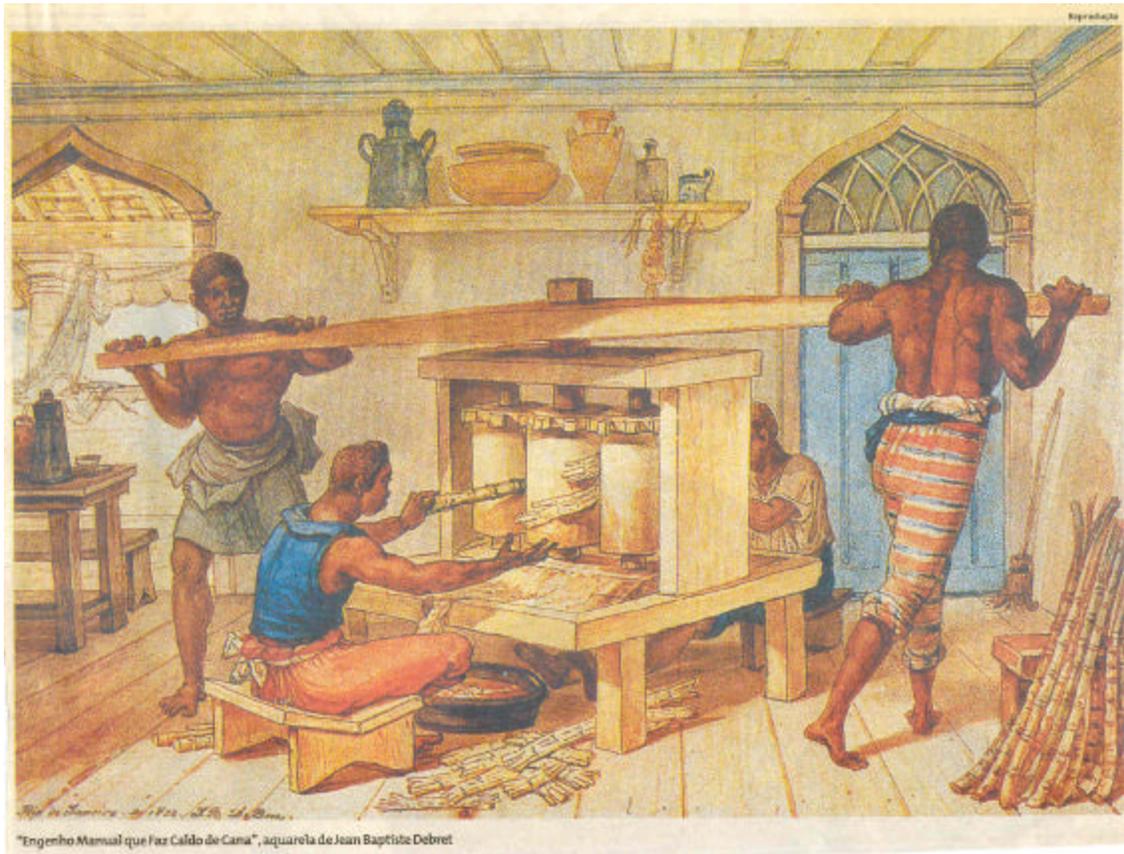
Manual do uso da teoria dos conjuntos *Fuzzy* no *MATLAB* 6.5.

Profa. Dra. Mariangela Amendola
Msc. Anderson Luiz de Souza
Prof. Dr. Laécio Carvalho Barros

FEAGRI & IMECC/ UNICAMP

Resumo: Este manual é o produto de uma revisão do manual disponibilizado em 2004, que além de apresentar com detalhes os comandos básicos para o uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* no ambiente de computação científica *MATLAB* 6.5, cita referências bibliográficas onde o usuário pode complementar seus estudos teóricos para a interpretação adequada dos resultados do uso desta ferramenta no processo de suporte à decisão de sistemas que, aqui, são os agrícolas ou biológicos.

Versão II, maio de 2005.



Notar que nesta cópia da aquarela de Debret há um erro, descoberto em 1994 somente porque apreciado por um estudante de engenharia mecânica.

1. Introdução e notas históricas.

Dentre os processos físicos de interesse/competência do profissional da área de Engenharia Agrícola, é possível reconhecer aqueles da FEAGRI/UNICAMP que vêm sendo investigados cientificamente com a finalidade de gerar conhecimentos que permitam a tomada de decisão no “momento” de seu planejamento ou implementação otimizada.

Diretamente relacionados com o conteúdo das disciplinas que ensinamos no curso de graduação a partir de 1986, (FA 408-Matemática Aplicada a Agricultura), estão aqueles processos que podem ser **modelados matematicamente**, como problemas de resolução de equações diferenciais ordinárias, sujeitas à condições de contorno e/ou iniciais. Relacionados com o que ensinamos em outras disciplinas, tanto no curso de graduação (FA 374 - Cálculo Numérico, FA 012 - Métodos Numéricos para Equações Diferenciais, FA 019- Secagem Avançada), quanto no curso da pós-graduação (AP 132/508 - Introdução a Matemática Aplicada e Computação Científica, AP 518 - Matemática Aplicada e computação Científica, AP 181- Estudo Dirigido em Água e Solo, e AP 185 – Estudo Dirigido em Tecnologia Pós Colheita), estão aqueles processos que podem ser modelados matematicamente como problemas de: determinação de zeros de funções não lineares; resolução de sistemas de equações algébricas, lineares ou não lineares; resolução de equações diferenciais ordinárias; integração numérica; ajuste de curvas; bem como resolução de equações diferenciais parciais - que são os problemas usuais das pesquisas de diversas engenharias, em particular da Engenharia Agrícola.

Somente em 2000, a partir do momento que aprofundamos o contato com alguns dos processos físicos estudados junto aos especialistas da área de Construções Rurais e Ambiente (zootecnia de precisão), verificamos a ineficiência do uso de metodologias associada às ferramentas matemáticas tradicionais, como as relacionadas acima, o que nos fez procurar novas ferramentas matemáticas junto ao IMECC. Neste sentido, por ocasião do X Congresso Latino Americano de Biomatemática, realizado no IMECC em 2001, por meio de um dos mini-cursos oferecidos (BARROS, 2002), concluímos pela seleção de uma ferramenta matemática adequada, que é a baseada na **Teoria de Conjuntos Fuzzy**.

A partir desta seleção, nossas expectativas foram além daquelas inicialmente propostas. Foi possível identificar também a utilização do uso desta teoria para a pesquisa de processos que envolvem a resolução de equações diferenciais dependentes de parâmetros, como os que requerem o conhecimento do movimento de água no solo.

O que está por trás de toda essa versatilidade da utilização desta teoria *fuzzy* é a possibilidade de modelar e manipular matematicamente informações vagas e imprecisas, naturais da linguagem humana e, portanto, as fornecidas pelos especialistas (não matemáticos) ao caracterizar os processos estudados.

Esta manipulação é feita a partir da composição de variáveis escolhidas para modelar matematicamente o processo em questão, quando a implicação das variáveis independentes nas dependentes é estabelecida por um conjunto de **regras lingüísticas** baseadas no conhecimento de **especialistas**.

As técnicas da teoria dos conjuntos *fuzzy* 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.

Em produtos de bem de consumo, como máquinas de lavar, televisões, câmeras de filmar, entre outros, o Japão foi o pioneiro a explorar o potencial da lógica *fuzzy*, ainda na década de 80. De acordo com a literatura, 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. Este trabalho influenciou outros pesquisadores a explorarem controladores *fuzzy* na teoria de controle, como, por exemplo, o controlador de Sugeno, que não é contemplado neste manual.

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 - dentre um número enorme de bons livros citamos KLIR & YUAN (1995) e PEDRYCZ & GOMIDE (1998) -, bem como nacional - onde indicamos os trabalhos de doutorado: BARROS (1997), RIBACIONKA (1999) e ORTEGA (2001)-.

Também na área de pesquisa teórica tem tido bastante avanço em tópicos como equações e inclusões diferenciais, equações de diferenças e sistemas dinâmicos gerais, assuntos esses que podem ser encontrados em BARROS et al (2004).

Por outro lado o uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* mostrou-se promissor também em pesquisas aplicadas, como pode ser constatado em várias oportunidades na ocasião do Ciclo de Palestras / 2002 a 2004, realizado na FEAGRI sob nossa coordenação (www.agr.unicamp.br), e do que resultou distintos tipos de projetos de vários níveis (iniciação científica, mestrado, doutorado e pós doutorado), bem como trabalhos apresentados em congressos ou publicados em revistas.

Em geral, estas aplicações são trabalhos de análise de condições de conforto em galpões de criação animal como função da composição de duas variáveis que traduzem o ambiente térmico gerado em galpões. O trabalho pioneiro foi o realizado por AMENDOLA et al (2004), para simular condições de conforto em galpões de criação de frangos de corte a partir da composição das variáveis independentes de temperatura e umidade relativa do ar. Os resultados, que constam do ANEXO 2 , foram tomados como exemplo e incentivaram o desenvolvimento de outros trabalhos de mesma natureza, como por exemplo, ainda para frangos de corte, por MOURA et al (2004) e por AMENDOLA & WATANABE (2005); para suínos como consta em QUEIROZ et al (2004); bem como outros projetos em andamento atualmente sob orientação da Professora Irenilza da FEAGRI.

Além disso, do oferecimento da disciplina AP 182N- Estudo Dirigido em Construções Rurais e Ambiência, resultou um outro projeto para animais em geral como consta em AMENDOLA, MOLLO & CRUZ (2005).

Aplicações em outras áreas da FEAGRI, como da área de Água e Solo para a caracterização de propriedades de solos, seguem com a orientação do Professor Matura, enquanto que da área de Tecnologia Pós Colheita, referentes à caracterização da qualidade de produtos como função da composição das variáveis que exercem influência na sua preservação para o consumo ainda estão em desenvolvimento.

Por outro lado e enquanto isso, juntamente com o Professor Rodney Bassanezi e alunos de doutorado do IMECC, foram desenvolvidos sistemas *fuzzy* para descrever modelos teóricos que simulam alguns fenômenos biológicos. Um dos temas estudados foi a Morte Súbita do Citros, doença que tem dado enormes prejuízos aos plantadores de laranja do Estado de São Paulo. Neste tema os sistemas *fuzzy* desenvolvidos são para descrever a evolução dessa doença. Outros sistemas *fuzzy* foram desenvolvidos para estudar uma relação do tipo presa - predador 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 biólogos 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. Esse último trabalho faz parte da tese de doutorado de CASTANHO (2005) que foi desenvolvida juntamente com o Professor Vendite, do IMECC, e com o Professor Akebo da FEEC.

Em quaisquer dos casos comentados acima, o desempenho do avanço do conhecimento se mostrará efetivo após o cumprimento rigoroso da clássica seqüência de etapas relacionadas à simulação de processos, como se encontra na literatura, as quais são intensamente discutidos em todas as disciplinas citadas e brevemente comentadas no que segue.

Antes de qualquer etapa para o conhecimento de um processo físico, é de fundamental importância a **descrição física** do mesmo, o que só é possível após exaustiva **observação, coleta adequada, identificação e análise de dados importantes** (variáveis, parâmetros, interações, etc...), que podem ser obtidos experimentalmente. Ressalta-se que esta etapa mostra-se mais ou menos adequada ao processo em estudo, de acordo como os limites do conhecimento atual que o pesquisador tem dos mesmos. Isto pode ser completamente compreendido a partir das observações sobre a aquarela de Debret (extraído da Folha de São Paulo em 1994), e apresentada na primeira página deste manual.

A partir desta etapa, pode-se avançar a investigação científica daqueles processos através da sua **descrição** em uma linguagem universal, isto é, através de um **modelo matemático**. São diversos os tipos de modelos que podem ser reconhecidos nesta etapa, o que envolve também os limites do conhecimento atual que o pesquisador tem tanto do processo quanto dos modelos. Isto pode ser compreendido a partir da referida identificação de metodologias que se deu após 2000.

É fato que tais modelos podem envolver variáveis, parâmetros ou fatores de difícil obtenção experimental ou que são coletados desordenadamente e/ou extraídos da literatura; ou ainda adequados a problemas não característicos daquelas classes de problemas matemáticos para os quais se tem como obter a solução exata (objeto de estudo da área de matemática). Sendo assim, em geral, torna-se necessário **simplificar** o modelo matemático **e/ou** procurar métodos de resolução que gerem **soluções**

aproximadas, os denominados **métodos numéricos** (objeto de estudo da Matemática Aplicada), ou ainda procurar usar pacotes de computação científicos apropriados para a análise requerida.

Em qualquer caso, a obtenção das tais soluções e/ou análises requer muitos cálculos, e sendo assim torna-se necessário o uso de computadores.

Para tanto, a partir da elaboração de um **algoritmo** associado a um **método de resolução ou análise** adequadamente selecionado, há que se elaborar um **programa de computação científica** em uma linguagem eficiente (Pascal, Fortran, C, C++, etc.) que traduza aquele algoritmo; **ou** usar algum **pacote de computação científica** (“software”), como, por exemplo, o MATLAB, o Mathematica, o MAPLE, PCC, etc... Nesta etapa, ressalta-se “o perigo” associado ao uso de “caixas pretas” por pesquisadores que não especialistas da área de matemática aplicada e computação científica. Este perigo pode ser compreendido tanto pela inadequada entrada de dados quanto pela interpretação dos resultados que o uso de um programa requer ou gera.

Tendo avançado nas etapas anteriores, para se obter soluções e/ou análises procuradas, revela-se necessária a tarefa de **validação** do conjunto de etapas acima descritas, o que pode indicar a necessidade de reformulá-las até que se garanta a legitimidade das mesmas.

Finalmente, e de fundamental importância, pode-se efetuar a **simulação ou análise** daquele processo em estudo, objetivando o seu **planejamento, controle** ou **implementação melhorada**.

Como reconhecer os processos/sistemas; identificar as variáveis e parâmetros importantes; classificar o tipo de problema físico; identificar o modelo matemático que pode ser associado; selecionar o método e/ou a ferramenta para a busca da análise do modelo; construir o algoritmo associado; desenvolver ou usar pacotes de computação científica; interpretar resultados; analisar as possíveis fontes de erros; e, se necessário, retomar algumas das etapas anteriores? Estas são as questões que os pesquisadores da área de matemática aplicada e computação científica buscam para atingir sucesso na Simulação Matemática ou Numérica de processos.

2. Como identificar um processo passível da análise segundo a teoria dos conjuntos *fuzzy*

Antes de iniciar a seqüência de instruções associadas ao uso da teoria dos conjuntos *fuzzy* no MATLAB, seguem alguns conceitos que devem ser observados porque essenciais para a identificação, pelo usuário especialista, do conjunto de variáveis importantes do processo em estudo que devem ser da classe das denominadas variáveis *fuzzy*.

O primeiro conceito está associado a 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:

$$A = \{(x, \mathbf{m}_A(x)); \quad x \in U \quad \mathbf{m}_A(x) \in [0,1] \}$$

onde

$\mathbf{m}_A(x)$ é uma função de pertinência que determina com que grau x está em A:

$$\begin{aligned} \mathbf{m}_A(x) &= 1 && x \text{ pertence totalmente ao conjunto } A; \\ 0 < \mathbf{m}_A(x) < 1 && x \text{ pertence parcialmente ao conjunto } A; \\ \mathbf{m}_A(x) &= 0 && x \text{ não pertence ao conjunto } A. \end{aligned}$$

Sendo assim, a álgebra entre os conjuntos *fuzzy* não segue a teoria clássica usual, em especial devido ao fato de que as operações de união e de intersecção de um conjunto e seu complementar são diferentes de 1 e vazio respectivamente, e portanto operações específicas entre os conjuntos *fuzzy* devem ser estabelecidas (detalhes teóricos estão no ANEXO 1).

Outro conceito essencial é o reconhecimento desta caracterização de variáveis da existência do que consiste uma base de regras entre as mesmas. Isto se estabelece a partir do conhecimento do especialista na forma de proposições do tipo “se E1 e/ou E2 então S1”, onde E1 e E2 referem-se a classificações lingüísticas das variáveis de entrada e S1 a de saída, as quais, a partir do uso desta teoria, se mostra como conseqüência das operações “e/ou” algébricas acima referidas, onde “e” designa união e “ou” intersecção (detalhes práticos estão no ANEXO 2).

Outros conceitos são brevemente explicados à medida que forem requeridos.

3. Utilização do *MATLAB*

O *MATLAB* é um ambiente de computação científica, disponível na FEAGRI desde 2000, 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 *FORTTRAN*, sejam exibidos. Os passos para esta interação são descritos no que segue.

3.1 Como entrar e/ou executar no *MATLAB*

Para entrar e/ou executar no *MATLAB* em ambiente Windows, deve-se colocar o cursor em cima do ícone como o que segue, no caso da versão 6.1:



e então pressionar o botão esquerdo do *mouse* no mesmo, a partir do que aparecerá a referida Janela de Comando, a qual estará pronta para receber os comandos tão logo apareçam os caracteres `>>` e a palavra **Ready** nos locais que estão destacados no canto superior esquerdo e no canto inferior esquerdo da Figura 1 respectivamente.

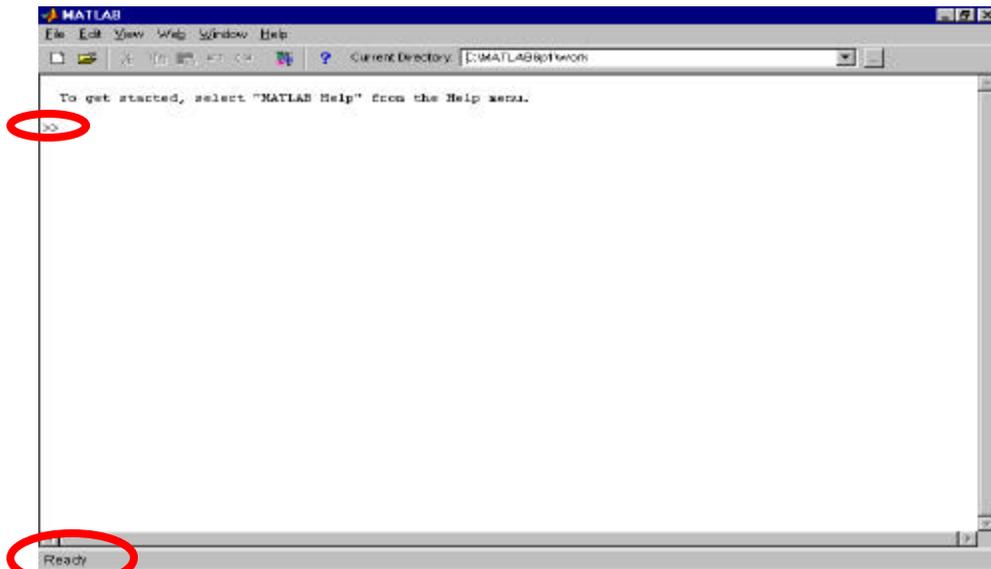


Figura 1: Janela de Comando do *MATLAB* que mostra `>>` e a informação *Ready*

A partir disto pode-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 neste manual, e cujo uso descreve-se no que segue.

3.2 Do que consta 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, que estão sublinhadas na seqüência de comandos relacionados como segue.

3.2.1 Como entrar no *Fuzzy Logical Toolbox*

Na Janela de Comando da Figura 1 após >> 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 o que aparece na Figura 2a.

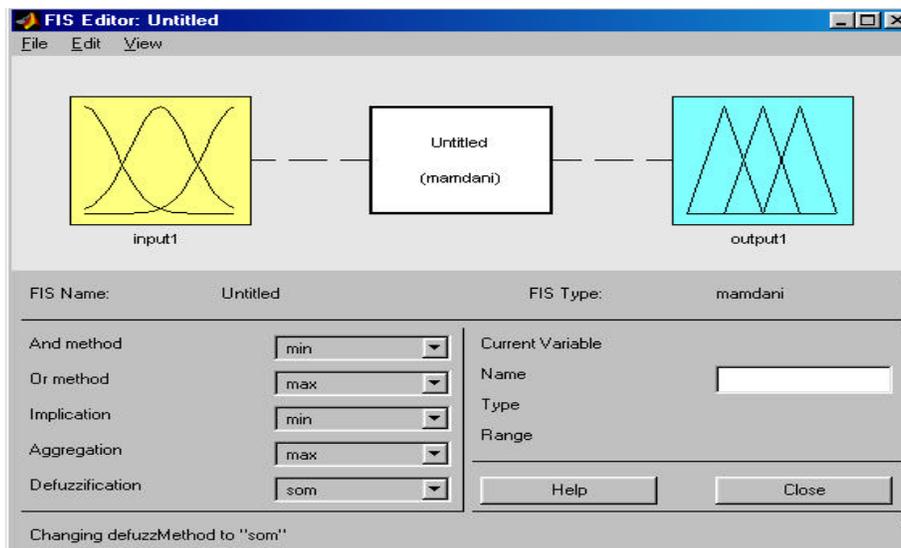


Figura 2a: Tela inicial do *Fuzzy Logical Toolbox*.

Como pode ser notada na Figura 2a, 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.

3.2.2 O sistema de Mamdani

Em geral, um sistema *fuzzy* faz corresponder a cada entrada *fuzzy* uma saída *fuzzy*. No entanto, espera-se que a cada entrada *crisp* (um número real, ou par de números reais, ou n-upla de números reais) faça corresponder uma saída *crisp*. Neste caso, um sistema *fuzzy* é uma função de \mathbb{R}^n em \mathbb{R} , construída de alguma maneira específica. Os módulos que seguem indicam a metodologia para a construção desta função:

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

É importante ressaltar que existem diferentes métodos de inferência *fuzzy* com diferentes propriedades. O *Fuzzy Logic toolbox* do MATLAB oferece duas opções: o Método de Mamdani e o Método de Sugeno. Analogamente, existem diversos métodos de *defuzzificação*. Devido à simplicidade e eficiência, além de ser bastante condizente com a intuição humana, todo o conteúdo desta apostila foi preparado 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*. Nota-se que há casos específicos em que se recomenda o uso do método de Sugeno (ver manual do MATLAB).

Para um melhor entendimento destes e de outros métodos de inferência e de *defuzzificação*, sugere-se a leitura de PEDRYCZ & GOMIDE (1998).

A Figura 2b destaca a configuração básica para o uso do *Fuzzy Logic Toolbox*, segundo estas especificações, e será mantida como base para todo o desenvolvimento

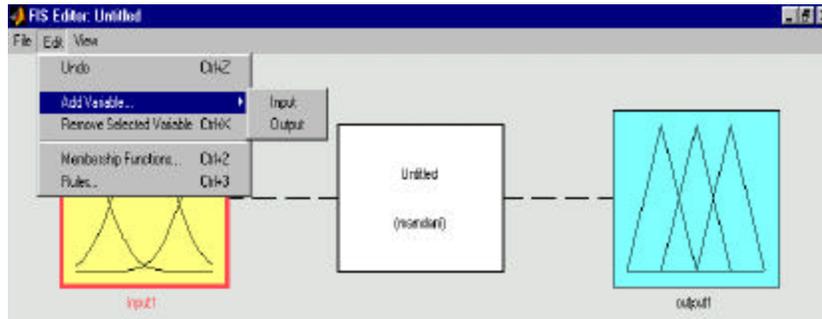


Figura 3: Destaque das opções seleccionadas para a introdução das variáveis de entrada e/ou saída

É importante ressaltar que pode haver diversas variáveis de entrada bem como de saída. Porém, neste manual, será tomado o sistema de duas variáveis de entrada e uma de saída, o que, na literatura é descrito como MISO, posto que em Inglês MISO significa “multiple input and simple output”; outros sistemas são descritos por MIMO (multiple input and multiple output).

3.2.4 Como remover variáveis de entrada e/ou de saída

Para remover “caixas” de variáveis de entrada e/ou de variáveis de saída, pressionar o botão esquerdo do mouse uma vez na “caixa” correspondente à variável que se quer remover, seguindo a opção:

E d i t ➤ **R e m o v e S e l e c t e d
V a r i a b l e**

como mostra o que está destacado na Figura 4.

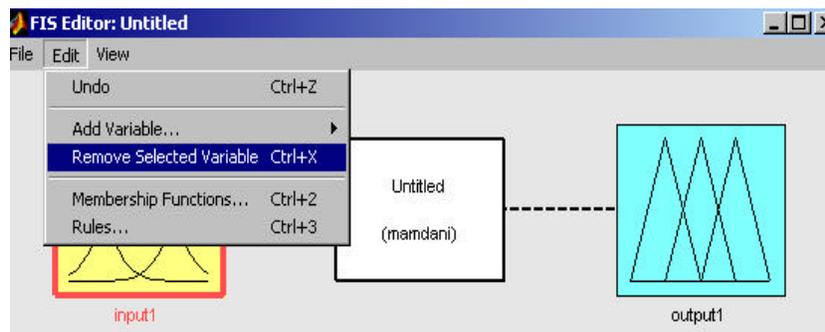


Figura 4: Opção seleccionada para a remoção de variáveis de entrada e/ou saída

3.2.5 Como mudar o nome das variáveis de entrada e/ou saída

Nesta etapa serão dados nomes às variáveis de entrada e de saída. Para mudar o nome das “caixas” das variáveis de entrada, e/ou de saída, pressionar o botão esquerdo do mouse em cima da “caixa” que se quer renomear, escrever o nome escolhido no local destacado em vermelho no canto inferior direito como indicado nas Figuras 5a e/ou 5b respectivamente e pressionar a tecla *Enter*.

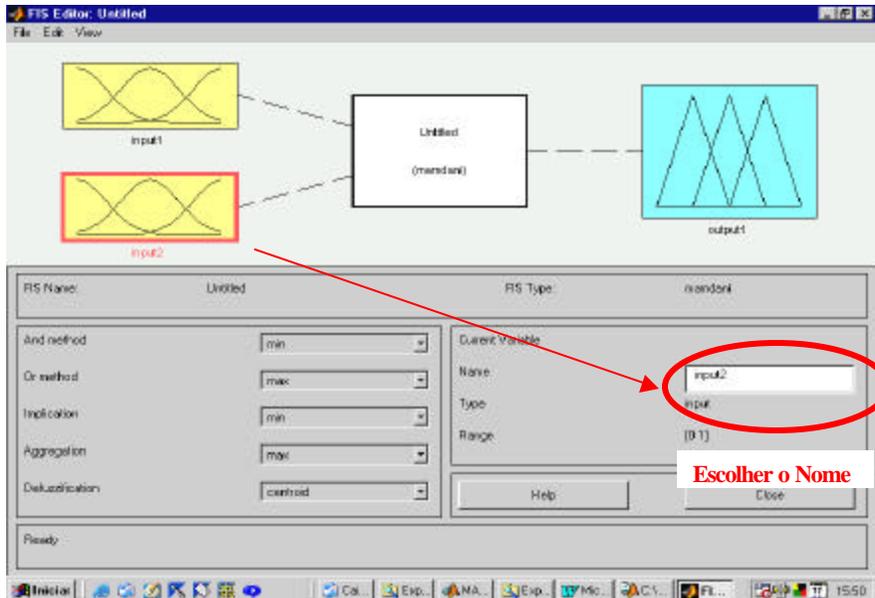


Figura 5a: Mudança do nome das variáveis de entrada

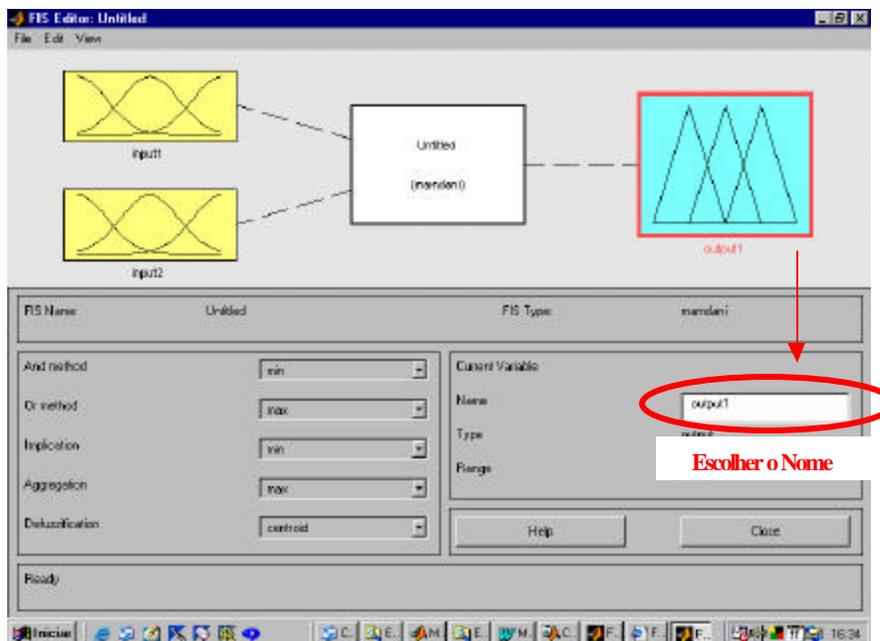


Figura 5b: Mudança do nome das variáveis de saída

3.2.6 Como alterar o domínio das variáveis de entrada e/ou saída

A primeira alteração que deve ser feita dentro das “caixas” das variáveis de entrada e/ou saída, para que estas fiquem representativas do problema que se quer estudar, é a determinação do domínio de cada uma dessas variáveis. Para tanto se deve pressionar o botão esquerdo do mouse na “caixa” da variável, alterando-se o que está destacado no que mostram as Figuras 6a, no caso das variáveis de entrada, e 6b no caso das variáveis de saída, e pressionar a tecla *Enter*.

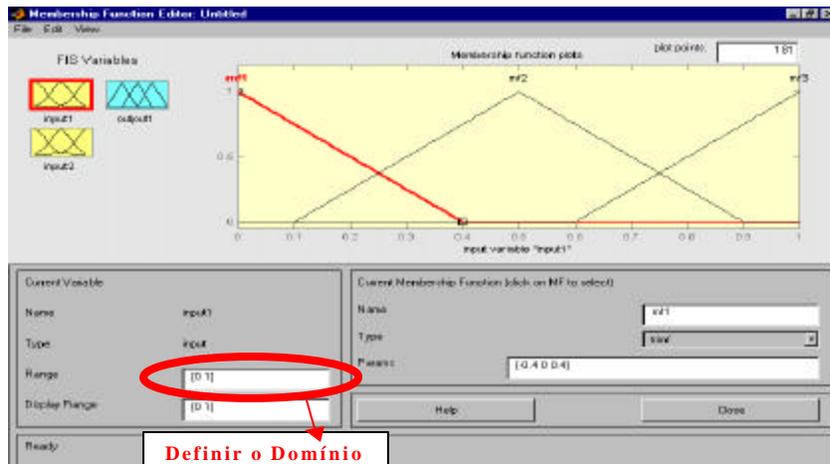


Figura 6a: Definição do domínio das variáveis de entrada

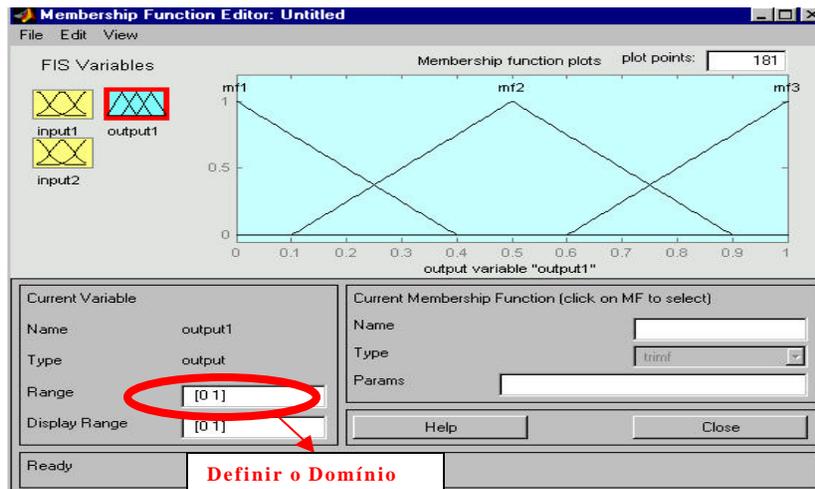


Figura 6b: Definição do domínio das variáveis de saída

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.

3.2.7 Funções de pertinência.

De acordo com o que consta na secção 3.2.2, 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.

A princípio, qualquer função que associe valores entre zero e um a elementos de um dado conjunto, pode ser tomada como função de pertinência. Entretanto, na escolha de tais funções, deve-se levar em conta o contexto em que estas serão utilizadas na representação das variáveis lingüísticas. Neste sentido, 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. Uma breve descrição de funções de pertinência do método de Mamdani pode ser vista no ANEXO 1.

3.2.7.1 Como alterar o número e o formato das funções de pertinência

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 6a, pressionar o botão esquerdo do mouse nas seguintes opções:



e posteriormente, em:



A partir do que aparecerá o que mostra a Figura 7a.

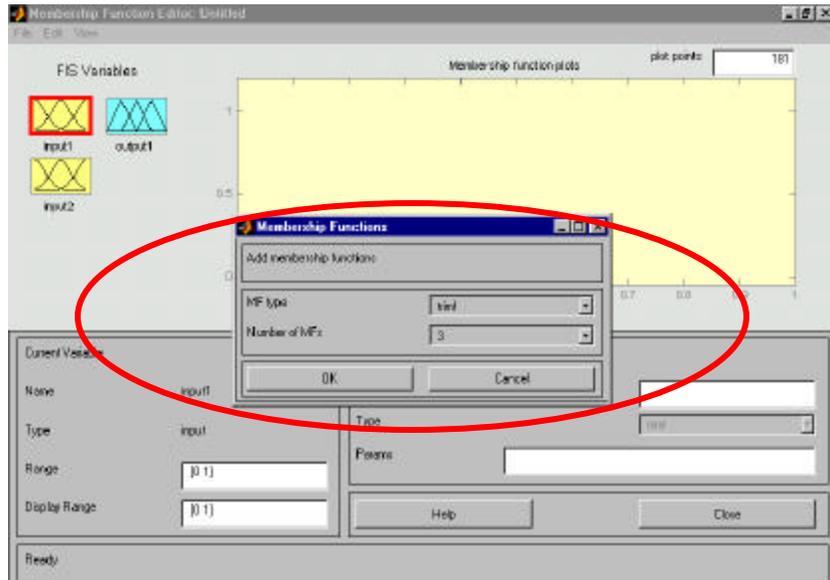


Figura 7a: Escolha do número e da forma das funções de pertinência para variáveis de entrada

De acordo com as Figuras 7b e 7c, que exibem uma ampliação da região destacada na Figura 7a, deve-se escolher a quantidade e o tipo das funções de pertinência.

Escolhidos o número e o formato das funções de pertinência deve-se pressionar em “OK”. Tal procedimento deve ser repetido para todas as variáveis de entrada.

Para se alterar o número e o formato das funções de pertinência das **variáveis de saída** deve-se seguir os mesmos procedimentos já descritos para as variáveis de entrada, porém a partir do que está ilustrado na Figura 6b.

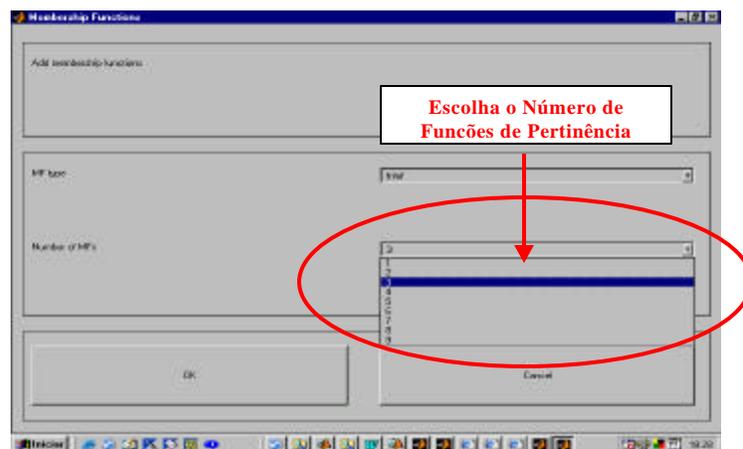


Figura 7b: Escolha do número de funções de pertinência para variáveis de entrada.

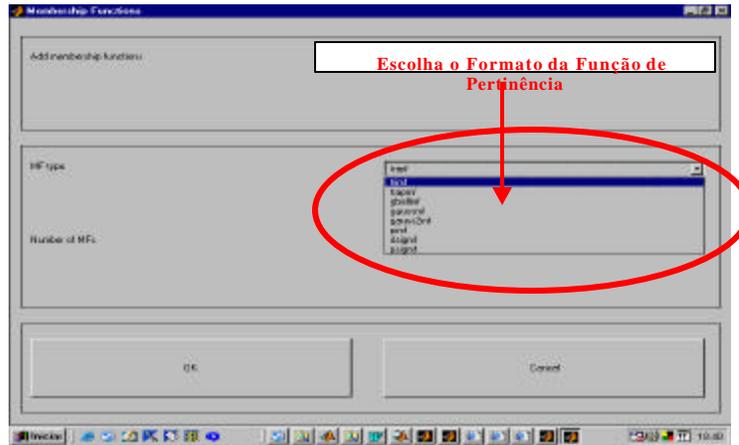


Figura 7c: Escolha do formato das funções de pertinência para variáveis de entrada.

3.2.7.2 Como alterar o domínio e o nome das funções de pertinência

Uma vez seleccionados o número e formato, deve-se determinar, para cada uma das funções de pertinência, os valores associados à máxima pertinência, onde a função de pertinência é igual a um, e os valores associados à mínima pertinência, onde o valor da função de pertinência é igual a zero. Tal procedimento é diferente para os distintos formatos de funções de pertinência disponíveis no *Fuzzy Logical Toolbox*. Os formatos mais comumente utilizados para funções de pertinência são os triangulares (*trimf*), os trapezoidais (*trapezmf*) e os gaussianos (*gaussmf*). Por esta razão, neste manual, apenas para estes formatos serão indicados quais procedimentos devem ser seguidos.

3.2.7.2.1 Funções de pertinência triangulares (*trimf*)

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma terna (a , b , c), onde a e c determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e b é o ponto onde a função de pertinência é máxima. A Figura 8 exhibe uma função de pertinência triangular onde são destacados a , b e c . 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.

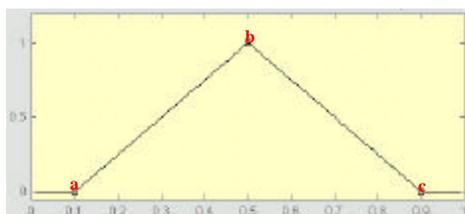


Figura 8: Função de pertinência triangular

O que de fato o *toolbox* aciona é a função:

$$\mathbf{m}_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases}$$

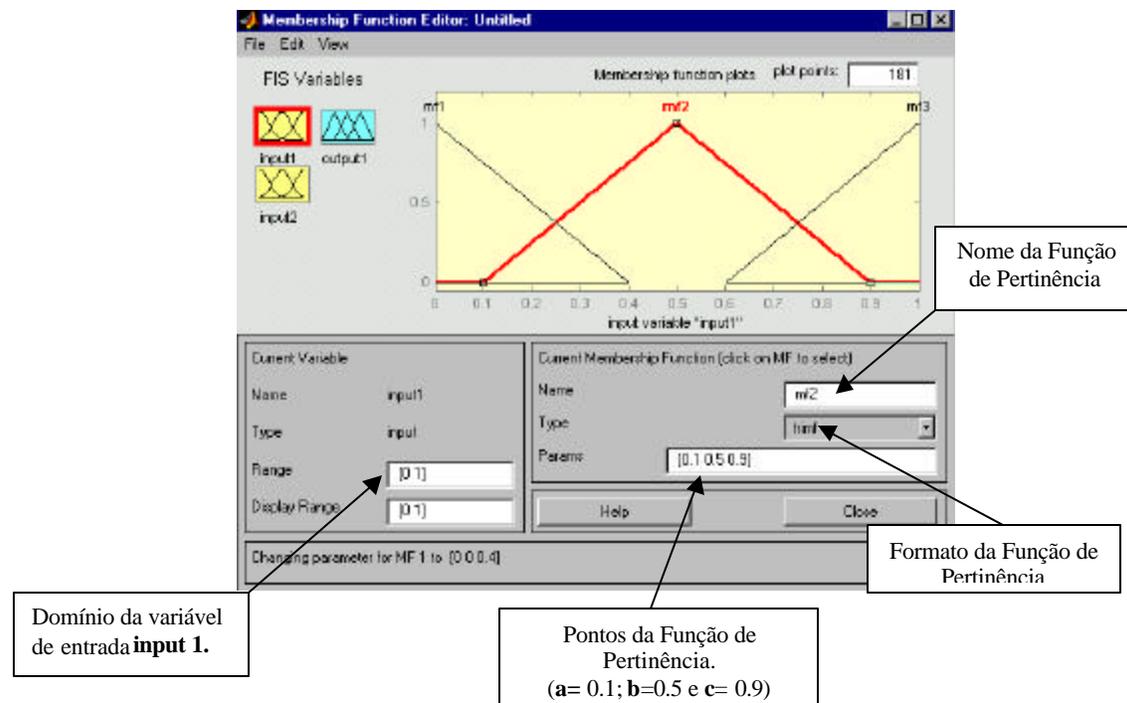


Figura 9: Funções de pertinência triangular da variável de entrada **Input1**

Para se determinar os valores de **a**, **b** e **c** deve-se, na Figura 7c, escolher a opção *trimf*. Como exemplo, como mostrado na Figura 9, escolheu-se, para a variável de entrada *input1*, três funções de pertinência com formato triangular: **mf1**, **mf2** e **mf3**, sendo $a=0,1; b=0,5$ e $c=0,9$ para **mf2**. Os outros valores de **a**, **b** e **c** devem ser definidos para cada uma das funções de pertinência.

Pressionando-se o botão esquerdo do mouse 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 Figura 9. Nos locais indicados nesta mesma Figura, deve-se selecionar um nome apropriado para cada função de pertinência, e digitar entre os colchetes, separados por um espaço, os valores de **a**, **b**, **c** e pressionar a tecla *Enter*.

Caso haja interesse pode-se utilizar em uma mesma variável de entrada e/ou saída, funções de pertinência com formatos distintos. Para tanto basta escolher outro formato no local indicado na Figura 9.

3.2.7.2.2 Funções de pertinência Gaussianas (`gaussmf`)

As funções de pertinência Gaussianas são caracterizadas pela sua média (\mathbf{m}) e seu desvio padrão (\mathbf{s}). Este tipo de função de pertinência tem um decaimento suave e tem valores diferentes de zero para todo domínio da variável estudada. A Figura 10 exhibe uma função de pertinência Gaussianiana. 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.

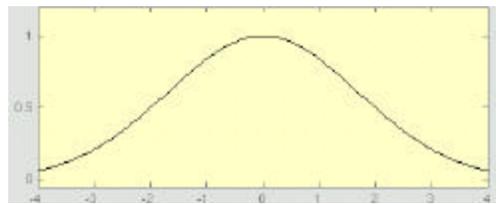


Figura 10: Função de pertinência gaussiana.

Neste caso, a função que o *toolbox* aciona é:

$$\mathbf{m}_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ está fora do domínio} \\ \exp(-(x-\mathbf{n})^2)/2\mathbf{s}^2) & \end{cases}$$

Para se escolher o formato Gaussiano para as funções de pertinência de uma variável de entrada e/ou saída, deve-se escolher a opção **`gaussmf`** (ver Figura 7c). Como exemplo, observa-se na Figura 11 que se escolheu, para a variável de entrada **`input1`**, três funções de pertinência com formato Gaussiano.

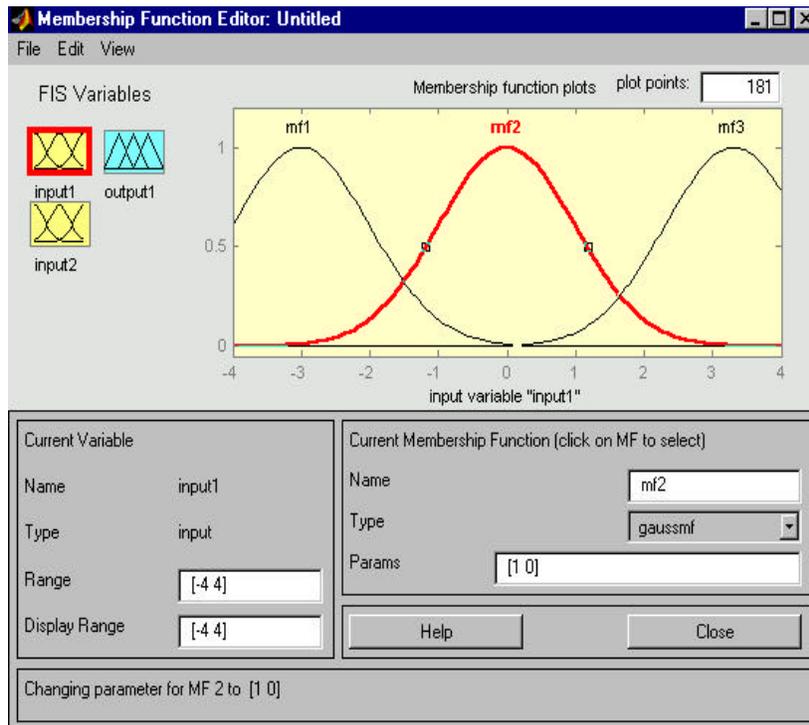


Figura 11: Funções de pertinência gaussiana da variável de entrada **Input1**

A média (**m**) e o desvio padrão (**s**) devem ser definidos para cada uma das funções de pertinência. Clicando-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 Figura 11. Nos locais indicados nesta mesma Figura, deve-se selecionar um nome apropriado para cada função de pertinência, e digitar entre colchetes, separados por um espaço, os parâmetros **m**, **s** e pressionar a tecla *Enter*.

3.2.7.2.3 Funções de pertinência trapezoidal (trapmf)

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 12 exhibe uma função de pertinência trapezoidal onde podem ser 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.

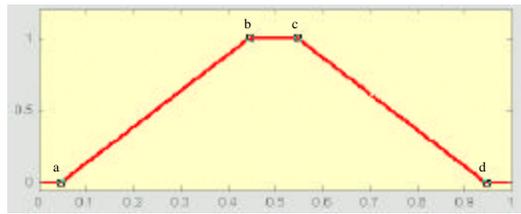


Figura 12: Função de pertinência trapezoidal

Neste caso, é acionada a função:

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

Para se determinar, dentro do *Fuzzy Logical Toolbox* os valores de **a**, **b**, **c** e **d**, deve-se escolher a opção *trapmf* (ver Figura 7c). Como exemplo, como se pode observar na Figura 13, 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 Figura 13. Nos locais indicados nesta mesma Figura, deve-se selecionar um nome apropriado para cada função de pertinência, e digitar entre os colchetes, separados por um espaço, os valores de **a**, **b**, **c**, **d** e pressionar a tecla *Enter*.

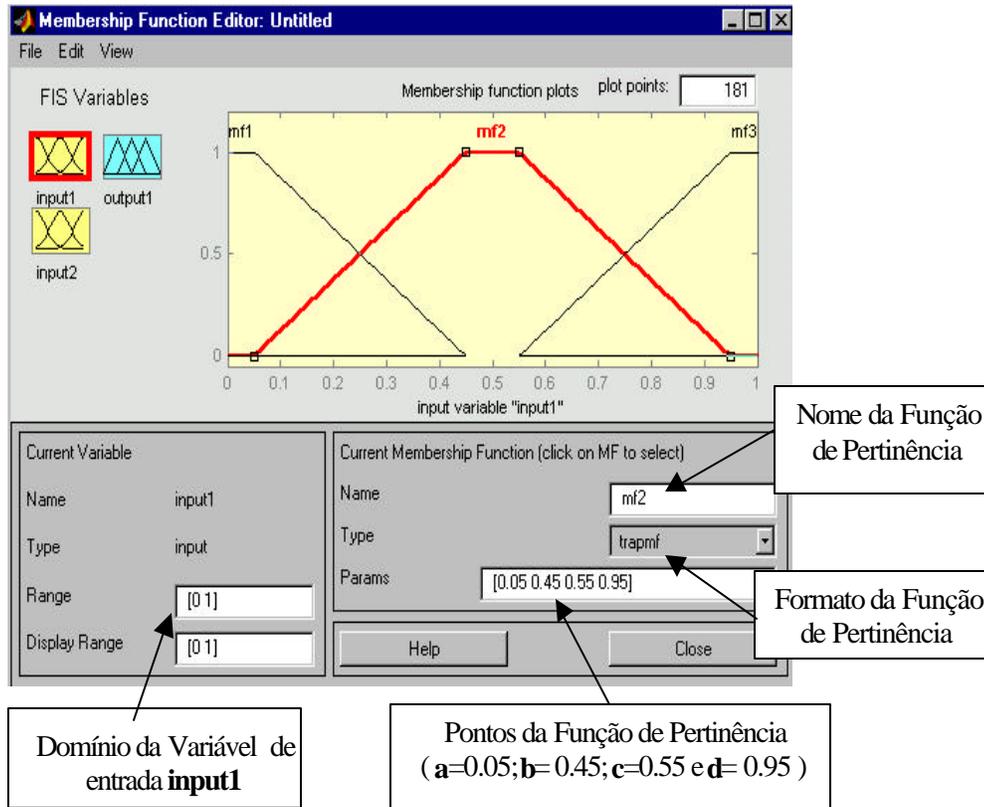


Figura 13: Funções de pertinência trapezoidal da variável de entrada **Input1**

Os valores de **a**, **b**, **c** e **d** devem ser definidos para cada uma das funções de pertinência.

3.3 Como criar a base de regras

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

Edit → **Rules**

que aparecerá na janela o que mostra a Figura 14.

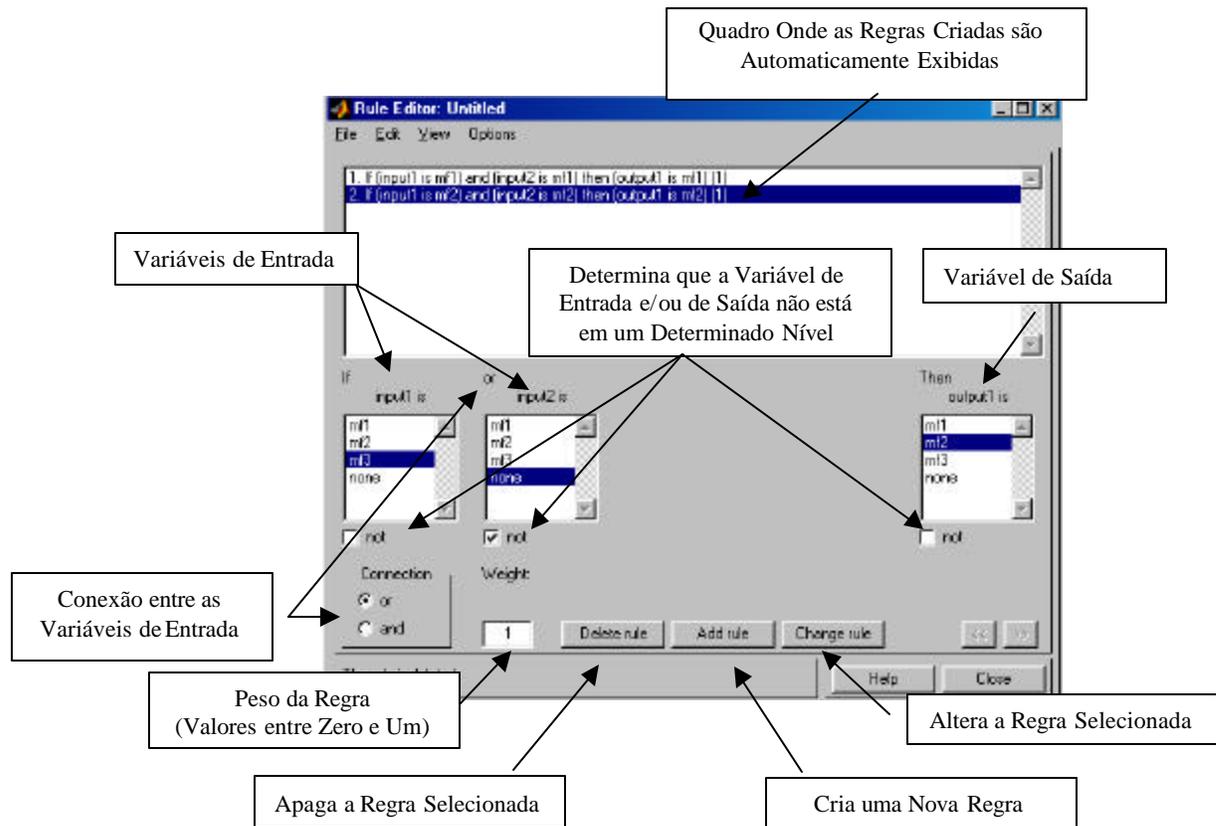


Figura 14: Base de regras.

A Figura 14 exhibe 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*.

3.4 Como utilizar o sistema de controle *fuzzy*

Construído o sistema de controle *fuzzy* pode-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

do que aparecerá o que mostra a Figura 15.

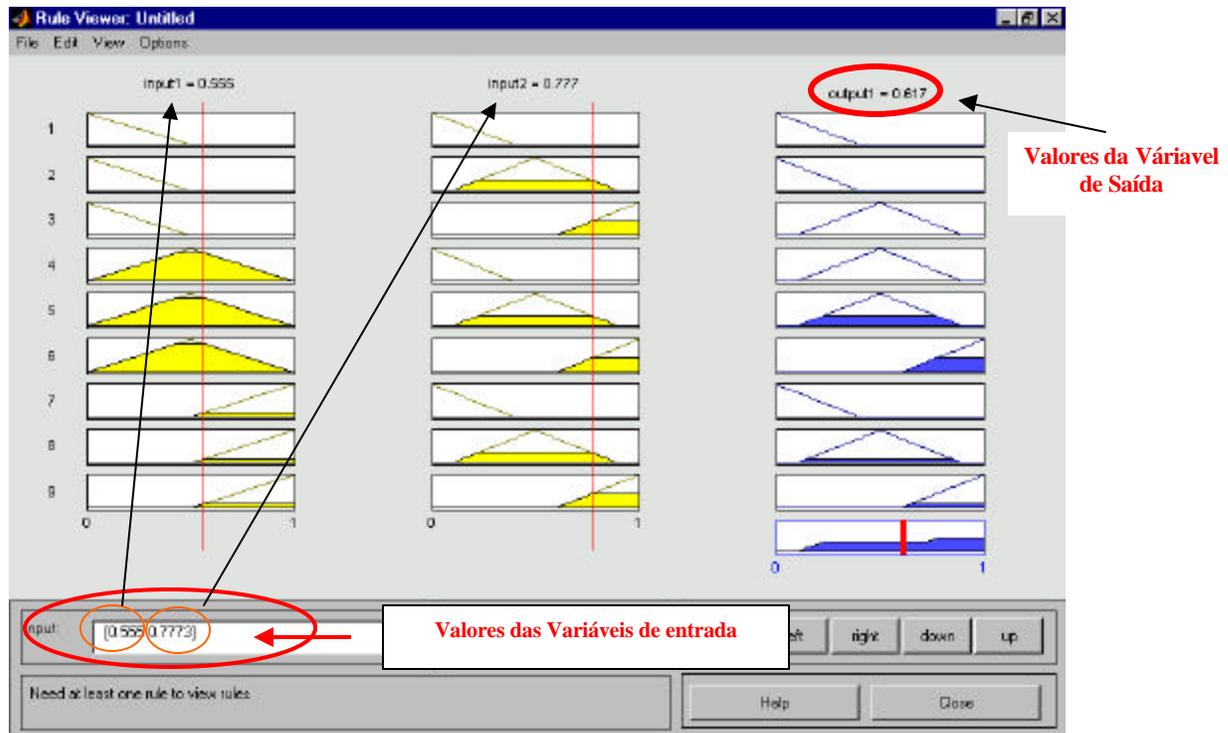


Figura 15: Um cenário resultante da seleção de valores das variáveis de entrada e os associados valores de saída.

Para o sistema ilustrado na Figura 15, atribuiu-se o valor 0,555 para a variável de entrada 1 e o valor 0,777 para a variável 2. Como saída, o sistema *fuzzy* gerou o valor 0,617, cuja interpretação é a que permite o suporte a decisão como será explicado posteriormente. Para se arbitrar diferentes valores para as variáveis de entrada pode-se proceder de duas formas a partir do que mostra a Figura 15:

- 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.

3.5 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

do que aparecerá o que está ilustrado na Figura 16.

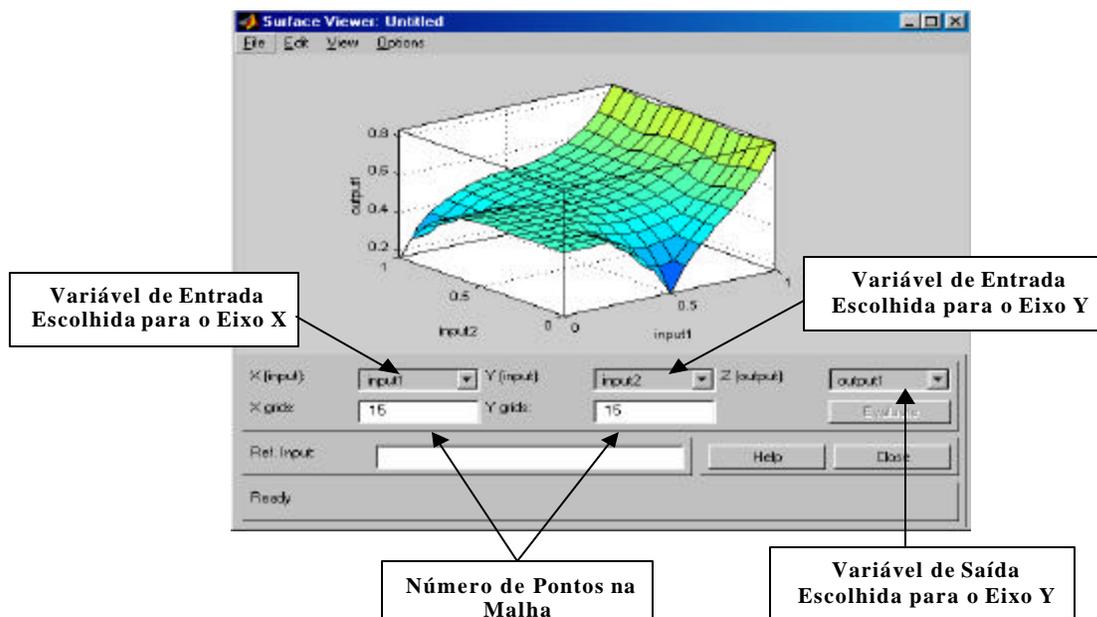


Figura 16: Superfície 3D gerada

A partir do que mostra a Figura 16, é possível se obter gráficos bidimensionais, de qualquer uma das variáveis de entrada em função da variável de saída. Para tanto, basta escolher a variável de entrada que deve permanecer e escolher a opção *none* no local destinado à outra.

3.6 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*. Para **salvar**, pressionar o botão esquerdo do mouse em:

File → **Save to Disk**

como aparece na Figura 17.

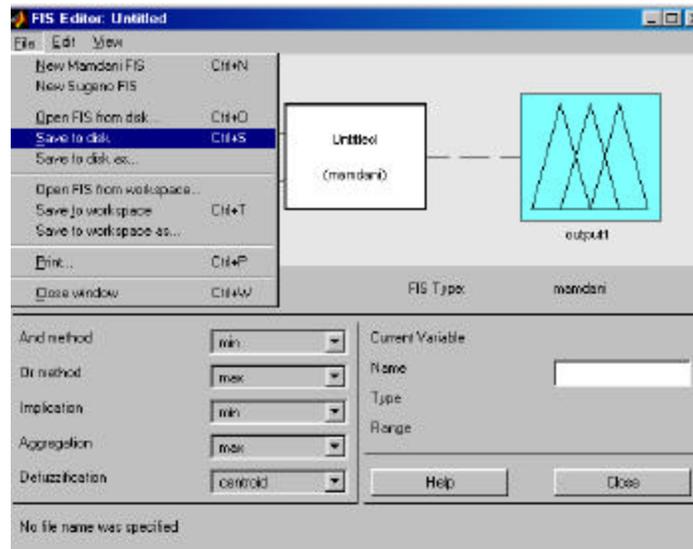


Figura 17: Gravação do sistema controle *fuzzy*.

daí aparecerá o que ilustra a Figura 18.

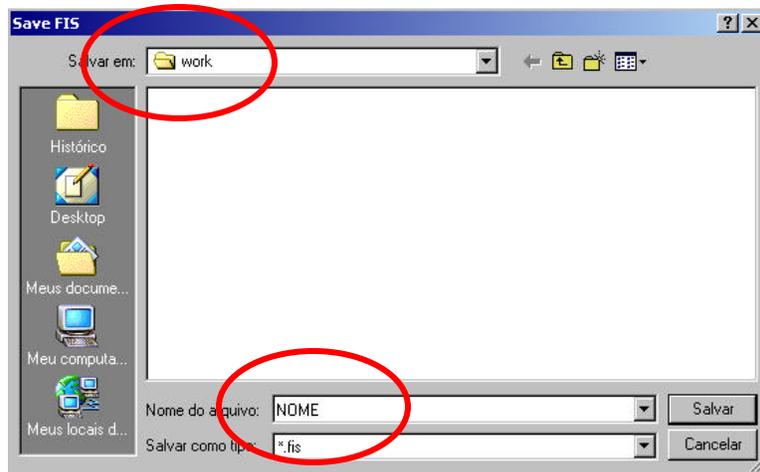


Figura 18: Escolha do local e do nome do arquivo a ser salvo

e onde se pode escolher a localização e o nome do arquivo nos locais destacados nos cantos superior e inferior esquerdo da Figura 18 respectivamente.

Por outro lado, para **carregar**, siga os procedimentos descritos nas Seções 3.1 e 3.2.1. Pressionar o mouse em **File; Import; From Disk**, como indicado na Figura 19.

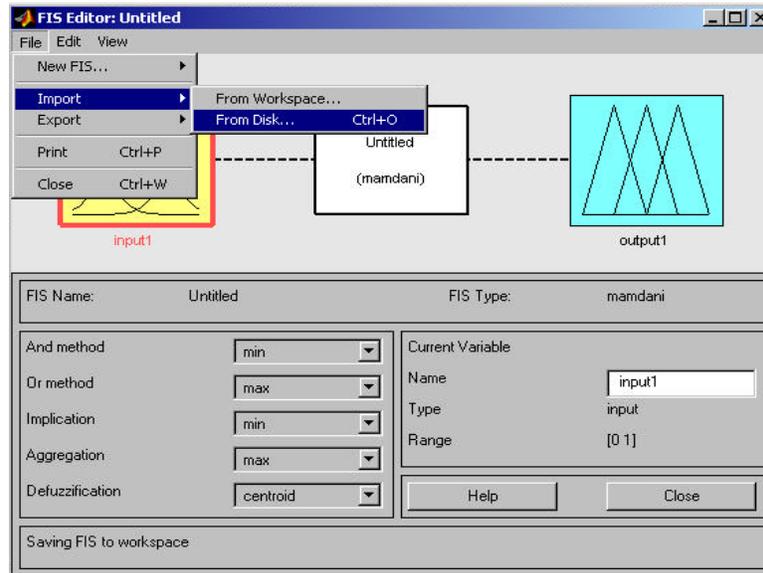


Figura 19: Conjunto de opções para carregar o sistema de controle *fuzzy*.

daí aparecerá o que mostra a Figura 20.

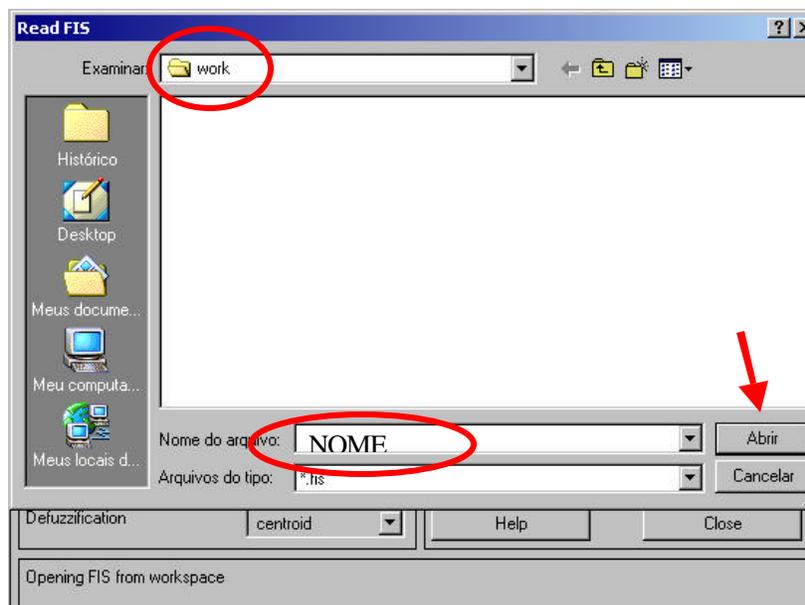


Figura 20: Escolha do local e do nome do sistema de controle *fuzzy*.

3.7 Casos especiais

3.7.1 Base de Regras Incompletas.

Na construção de um sistema de regras *fuzzy* deve-se sempre avaliar se a base de regras que está sendo utilizada é **COMPLETA**, isto é, deve-se fazer o seguinte questionamento: **Há regras suficientes para cobrir toda a extensão do problema estudado?**

Para responder esta questão, considera-se uma variável *fuzzy* V, como representada graficamente na Figura 21, onde se pode observar que há uma parte do domínio da variável V que não está representada ou coberta.

Entretanto, mesmo neste caso, o *Fuzzy Logical Toolbox*, do **MATLAB** fornece uma saída que corresponde ao ponto médio do domínio da variável Resposta, mas que por outro lado não é representativa do problema que está sendo utilizado.

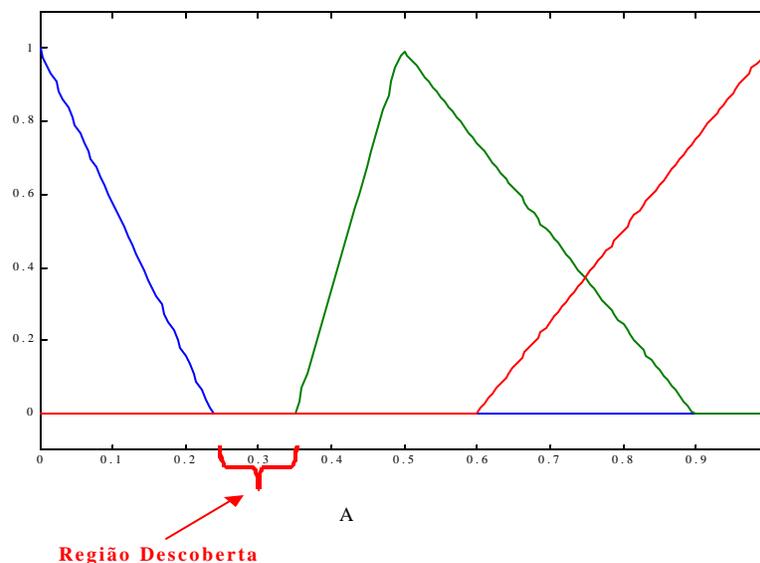


Figura 21: Base de regras incompleta

3.7.72 Base de Regras Redundantes.

Na construção de um sistema de regras *fuzzy* também se deve verificar se não há regras desnecessárias e que podem ser removidas do sistema. Para verificar esta situação, considere uma variável *fuzzy* V como representada graficamente na Figura 22, onde se pode observar que os conjuntos *fuzzy* azul e vermelho já representam ou cobrem todo o domínio da variável. Sendo assim, o conjunto *fuzzy* verde é redundante.

Entretanto, mesmo neste caso, o *Fuzzy Logical Toolbox*, do MATLAB fornece uma saída.

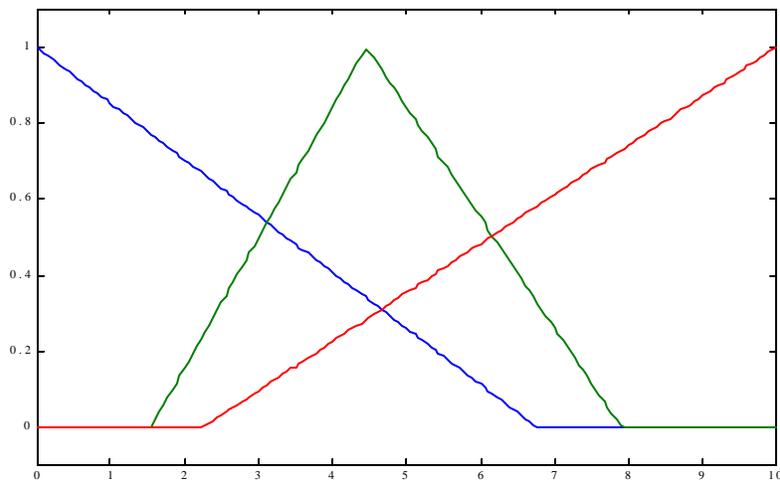


Figura 22: Base de regras redundantes .

Estes dois exemplos, experimentados até então só pelo segundo autor, ilustram o necessário conhecimento do modelo a ser analisado bem como dos procedimentos básicos do uso da teoria *fuzzy* no MATLAB.

3.8 Outros comandos úteis fora do *Fuzzy Logical Toolbox*

Os comandos que serão apresentados nesta seção devem ser digitados dentro da janela de comando como aparece na Figura 1.

Para definir uma variável de nome “nome” faça:

```
>>nome = readfis('nome do arquivo gerado na Seção 3.6.2 ')
```

3.8.1 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 23:

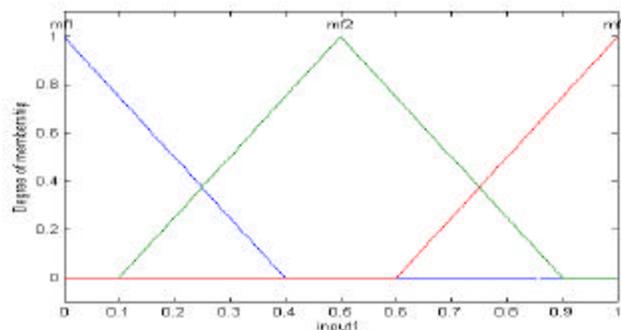


Figura 23: Função de pertinências associada à primeira variável de entrada (input1)

3.8.2 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 24:

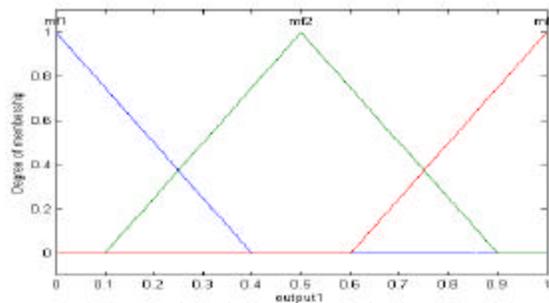


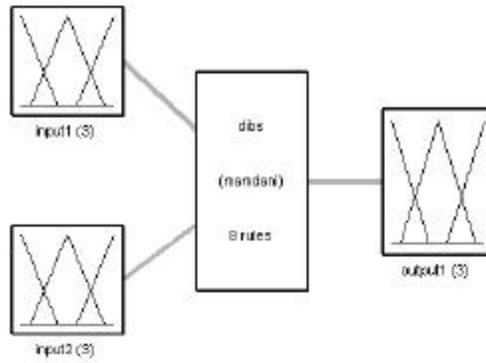
Figura 24: Função de pertinências associada a primeira variável de saída (output1).

3.8.3 Como obter o resumo do sistema de controle *fuzzy*

Para obter o resumo do sistema de controle faça:

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

Do que aparecerá o que mostra a Figura 25:



System dibs: 2 inputs, 1 outputs, 8 rules

Figura 25: Resumo do sistema de controle *fuzzy*.

3.8.4 Como gerar o gráfico da superfície 3D

Para gerar a superfície 3D faça:

`>>gensurf(nome)`

Do que aparecerá o que mostra a Figura 28:

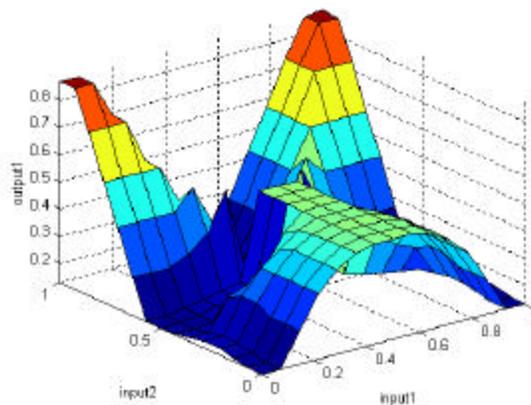


Figura 28: Gráfico da superfície 3D

3.9 Outras informações úteis aos usuários que querem copiar em seus arquivos o que o toolbox mostra em suas janelas.

1) Estando na janela da figura, selecionar a seqüência de opções/instruções:

edit =>copy options=>figure=> copy templates=> word => apply to figure =>ok
edit =>copy figure

2) Estando no texto do arquivo Word, selecionar a seqüência de opções/instruções:

paste => como figura

4. Agradecimentos

À Profa. Dra. Maria José Castanho, pela dedicação na apresentação de exemplos práticos.

À Profa. Dra. Irenilza de Alencar Nääs pela solicitação e subsequente uso intensivo deste manual no desenvolvimento de pesquisas.

Aos alunos Douglas D'Alessandro Salgado e Marcos Paulo G de Queiroz, alunos da pós graduação e graduação da FEAGRI respectivamente, pelos testes de compreensão realizados a partir da primeira versão deste manual; a orientada de IC Bianca M Watanabe e ao aluno do curso de doutorado Mario Mollo Neto, pelo uso e pela dedicação na disciplina de Estudo Dirigido em Construções Rurais e Ambiência - AP 182N/2004 respectivamente.

Ao querido Prof. Dr. Rodney C. Bassanezy, pela apresentação e discussão de conceitos teóricos necessários para o uso adequado desta teoria.

5. Referências

AMENDOLA, M. Ciclo de Palestras Realizadas na Faculdade de Engenharia Agrícola (FEAGRI-UNICAMP). 2002-2004 (www.agr.unicamp.br)

AMENDOLA, M.; CASTANHO, M.J.; NÄÄS, I.A.; SOUZA, A.L. Análise matemática de condições de conforto térmico para avicultura usando a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Biomatemática. IMECC-UNICAMP, Campinas, v.14, p.87 - 92, 2004.

AMENDOLA, M. & WATANABE, B. M. Análise das condições de conforto de frangos de corte utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. In: 4^o Congresso Temático de Dinâmica, Controle e Aplicações - DINCON – 2005. UNESP, Bauru - SP. 8p.

AMENDOLA, M., MOLLO, M. & CRUZ, V. F. Using fuzzy sets theory to improve the animal productivity. EFITA/WCCA - 2005. PORTUGAL. 8p.

BARROS, L.C. Sobre sistemas dinâmicos fuzzy: Teoria e Aplicações. Tese de doutorado IMECC-UNICAMP, Campinas. 1997. 103p.

BARROS, L. C. Teoria fuzzy x Biomatemática. Apostila de mini-curso. IMECC/UNICAMP. Campinas, SP. 2002. 52p.

BARROS, L.C., BASSANEZI, R. C., ZOTIN, OLIVEIRA, R. G. - Fuzzy Differential Inclusion: An Application to Epidemiology In: Soft Methodology and Random Information Systems ed. Warsaw: Springer, 2004, p. 631-637.

BARDOSSY, A.; DUCSTEIN, L. **Fuzzy Rule-Based Modeling with Applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems**. Flórida: CRC, 1995. 232p.

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.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB[®] 6: Curso completo**. São Paulo: Prentice Hall, 2003. 676p.

KLIR G.J., YUAN B. **Fuzzy Sets and Fuzzy Logic: Theory and Applications**. Prentice Hall, New Jersey.1995. 574p.

MAGNAGO, K.F., Abordagem Fuzzy em Modelos Populacionais Discretos: Metapopulação de Moscas Varejeiras. Tese de Doutorado. IMECC/UNICAMP, Campinas. 2005. 165p.

MAMDANI, E. H.; ASSILAN, S. A. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man - machine Studies*, 7. 1975. p1-13.

MOURA, D. J.; NAAS, I. A.; QUEIROZ, M. P. G. AMENDOLA, M. Estimating thermal comfort and solar orientation in broiler housing using fuzzy logic. In: VI CONGRESO LATINOAMERICANO Y DEL CARIBE DE INGENIERIA AGRÍCOLA, 2004, San José, Costa Rica. *Memoria...Asociación Costaricense de Ingenieros Agrícolas*, 2004, p. 1-7. CD

ORTEGA, N.R.S. Aplicação da Teoria da Lógica Fuzzy a Problemas de Biomedicina. Tese de doutorado IF-USP. São Paulo. 2001. 153p

PEDRYCZ, W. GOMIDE, F. **An introduction to fuzzy sets: analysis and design**. Bradford. Imprensa Cambridge, 1998. 465p.

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. 171p.

QUEIRÓZ, M.P.G; NÄÄS, I. A.; AMENDOLA, M.; SAMPAIO, C. A. P. Estimating tolerance limit to aggressive environment in swine production. In: CIGR INTERNATIONAL CONFERENCE. Beijing, China. Proceedings. CD. 2004, p.1-7.

RIBACIONKA, F. Sistemas Computacionais Baseados em Lógica Fuzzy. Tese de Mestrado. Universidade Mackenzie, São Paulo. 1999. 118p

ZADEH, L.A. Fuzzy Sets. **Information and control**. v.8. 1965. p. 338-353.

ANEXO 1

Para modelar matematicamente a base de regras, Mamdani e Assilian propuseram uma relação fuzzy binária M entre as entradas x e as saídas u , cuja função de pertinência está descrita como segue: em cada uma das regras da base de regras *fuzzy*, adota-se o operador matemático *mínimo* para o conectivo lógico “e” e o operador *máximo* para o conectivo lógico “ou”. As sentenças “se ...então ...” são modeladas pela aplicação *mínimo*, que erroneamente costuma ser denominada por implicação de Mamdani (o *mínimo* não é uma implicação *fuzzy*).

Formalmente, a relação *fuzzy* M é o subconjunto *fuzzy* $X \in U$ cuja função de pertinência é dada por

$$\mathbf{j}_M(x, u) = \text{máximo}_{1 \leq j \leq n} \{ \text{mínimo}[\mathbf{j}_{A_j}(x), \mathbf{j}_{B_j}(u)] \},$$

onde n é o número de regras que compõem a base de regras, e $\mathbf{j}_{A_j}(x)$ e $\mathbf{j}_{B_j}(u)$ são os graus com que x e u pertencem aos conjuntos *fuzzy* A_j e B_j , respectivamente.

Como o caso de interesse aqui é para entradas críps (números), vamos detalhar melhor a relação *fuzzy* M para o caso de duas entradas e uma saída. Sejam R_1 e R_2 duas regras:

R_1 : Se x_1 é A_1^1 e x_2 é A_2^1 então u é B_1

R_2 : Se x_1 é A_1^2 e x_2 é A_2^2 então u é B_2 .

Neste caso, para cada terna (x_1, x_2, u) tem-se

$$\mathbf{j}_M(x_1, x_2, u) = \text{máximo} \{ \text{mínimo}[\mathbf{j}_{A_1^1}(x_1), \mathbf{j}_{A_2^1}(x_2), \mathbf{j}_{B_1}(u)], \text{mínimo}[\mathbf{j}_{A_1^2}(x_1), \mathbf{j}_{A_2^2}(x_2), \mathbf{j}_{B_2}(u)] \},$$

representando a relação *fuzzy* obtida da base de regras pelo método de Mamdani.

Agora, para um par de entradas $x_1 = \bar{x}_1$ e $x_2 = \bar{x}_2$, o conjunto *fuzzy* de saída, representando o controle a ser adotado para esse par, é dado pela função de pertinência

$$\begin{aligned} \mathbf{j}_B(u) &= \text{máximo}_{(x_1, x_2)} \{ \text{mínimo} [\mathbf{j}_M(x_1, x_2, u), \mathbf{c}_{\{\bar{x}_1\}}(\bar{x}_1), \mathbf{c}_{\{\bar{x}_2\}}(\bar{x}_2)] \} \\ &= \text{máximo} \{ \text{mínimo} [\mathbf{j}_M(\bar{x}_1, \bar{x}_2, u), \mathbf{c}_{\{\bar{x}_1\}}(\bar{x}_1), \mathbf{c}_{\{\bar{x}_2\}}(\bar{x}_2)] \} \\ &= \mathbf{j}_M(\bar{x}_1, \bar{x}_2, u), \end{aligned}$$

$$\text{onde: } \mathbf{c}_{\{\bar{x}_1\}}(\bar{x}_1) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_1 = \bar{x}_1 \\ 0 & \text{se } x_1 \neq \bar{x}_1 \end{cases} \quad \text{e} \quad \mathbf{c}_{\{\bar{x}_2\}}(\bar{x}_2) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_2 = \bar{x}_2 \\ 0 & \text{se } x_2 \neq \bar{x}_2 \end{cases}$$

são as funções características de $\{\bar{x}_1\}$ e $\{\bar{x}_2\}$, respectivamente.

Para uma visualização da metodologia, o leitor pode acompanhar graficamente o método de Mamdani segundo o esquema das figuras 1 e 2 que seguem.

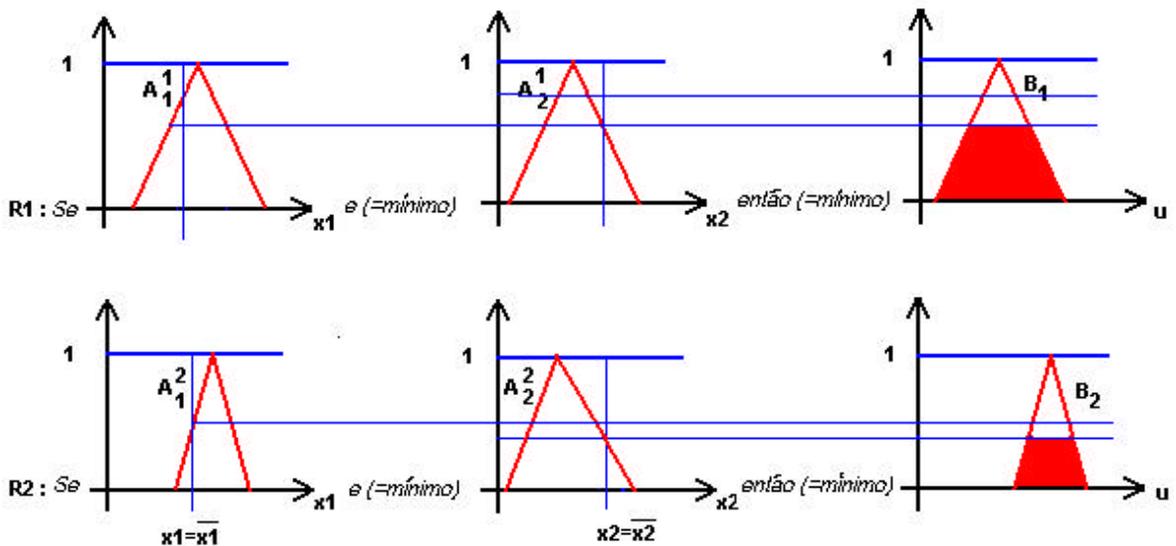


Figura 1 - Representação esquemática do método de Mamdani

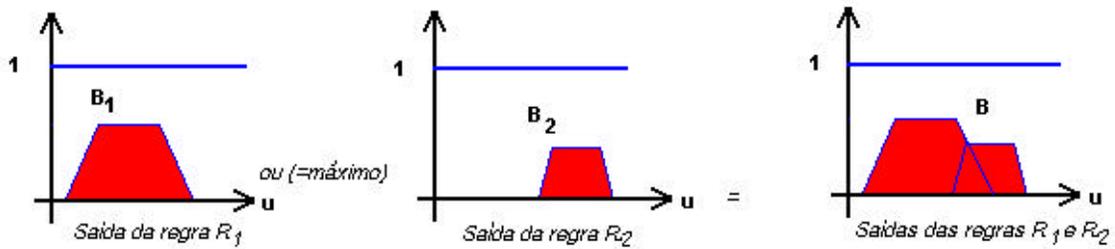


Figura 2 - Representação da saída final do método de Mamdani

Pode ser visto, através do exemplo acima, que a saída do controlador *fuzzy*, dada pelo método de inferência de Mamdani, é um conjunto *fuzzy* mesmo para o caso de uma entrada *crisp*. Este fato é que sugere a defuzzificação do conjunto *fuzzy* de saída para se obter um valor *crisp* que o represente.

São muitos os métodos de defuzzificação que podem ser adotados. A princípio, qualquer número real, que de alguma maneira possa representar “bem” o conjunto *fuzzy* *B* pode ser chamado de defuzzificador de *B*. Aqui será citado o mais comum que faz parte do método de Mamdani. Tal método (chamado de centro de gravidade) de defuzzificação é semelhante a média aritmética para uma distribuição de dados, com a diferença que os pesos aqui são valores $j_B(u_i)$ que indicam o grau de compatibilidade do valor u_i com o conceito modelado pelo conjunto *fuzzy* *B*.

A defuzzificação de *B*, para um domínio discreto, é

$$D(B) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i j_B(u_i)}{\sum_{i=0}^n j_B(u_i)}$$

e para um domínio contínuo

$$D(B) = \frac{\int_R u \mathbf{j}_B(u) du}{\int_R \mathbf{j}_B(u) du}$$

A defuzzificação pela média do máximo está representada pela figura 3 que segue, e é calculada tendo como base a saída *fuzzy* a partir da agregação dos resultados.

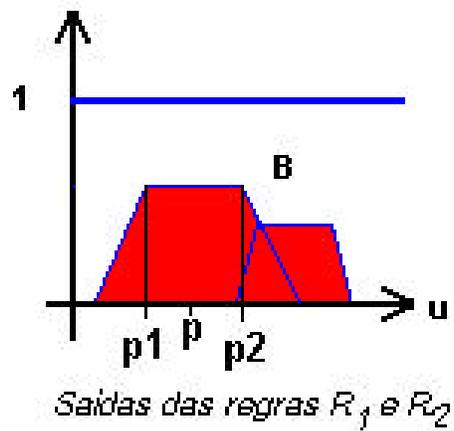


Figura 3 - Defuzzificação pela composição da média do Máximo.

Partindo da Figura 3, observam-se os pontos p_1 e p_2 que compõem o valor de p através da fórmula:

$$p = p_1 + (p_2 - p_1) / 2$$

onde p é o centro dos máximos, que encontra as duas regiões com maior grau de pertinência. O valor de p é calculado pela média entre os pontos p_1 e p_2 indicados na Figura 3.

ANEXO 2

ANÁLISE MATEMÁTICA DE CONDIÇÕES DE CONFORTO TÉRMICO PARA AVICULTURA USANDO A TEORIA DOS CONJUNTOS *FUZZY*

AMENDOLA, M.

CASTANHO M. J.

NAAS, I. A.

SOUZA, A.L.

Resumo: Este material foi elaborado para ser usado como exemplo a ser reproduzido na atividade “*oficina*”, dentro do Ciclo de Palestras III/2004 realizado na FEAGRI, que foi extraído de um resumo expandido de artigo publicado no COMBEA – 2004 e posteriormente publicado na revista *Biomatemática*, v.14, p.87 - 92, 2004, do IMECC/UNICAMP.

Palavras –chave: Análise *fuzzy*, suporte à decisão, conforto térmico, frangos de corte.

Introdução e Objetivos:

A partir das palestras de vários convidados que apresentarem tanto pesquisas já realizadas na área de saúde, como, por exemplo, da Msc. Rosana Jafelice (2002), quanto do MATLAB 6.5, como, por exemplo, a da MSc. Maria José Castanho (2003), foi possível o amadurecimento de nossos conhecimentos teóricos e práticos desta ferramenta. Neste sentido, este trabalho foi pioneiro ao divulgar esta ferramenta matemática como promissora na análise de sistemas e/ou processos das diversas áreas da Engenharia Agrícola, particularmente na área de Construções Rurais e especificamente para a área de Produção Animal, como descrito no que segue, para analisar como a composição das variáveis climáticas independentes, tais como a temperatura e umidade relativa do ar, influenciam a variável dependente denominada conforto térmico.

Para tanto é necessária a construção de regras segundo o conhecimento de especialistas, a partir das quais é possível simular cenários distintos para o suporte à decisão de construção do galpão para a criação de animais.

Para o estudo de caso de galpões para a criação de frango de corte, seguem as especificações do material, método, resultados e discussões relativas ao modelo formulado como exercício aos participantes da oficina.

Material, Métodos, Resultados e Discussões:

O material a ser usado consta das informações extraídas de PEREIRA (2002), baseado nos trabalhos de TINÔCO (2001) e COSTA (1994), do que se tem o que consta na Tabela 1.

UR(%)	Temperatura (°C)				
	<12	12-21	21-24	24-29	>29
<70	Ruim	médio	bom	bom	ruim
70-80	Ruim	bom	bom	médio	ruim
>80	Ruim	médio	bom	ruim	ruim

Tabela 1: Classificações em termos lingüísticos do estado de conforto térmico como função de faixas de Temperatura T (°C) e de Umidade Relativa UR (%) do ar.

Para a variável lingüística *umidade relativa*, foi considerado o **domínio no intervalo [50, 100]**, representando as faixas < 70, 70-80 e > 80 pelos termos lingüísticos: *baixa, média e alta* respectivamente.

Para a variável lingüística *temperatura*, foi considerado o **domínio no intervalo [5, 35]**, representado as faixas < 12, 12-21, 21-24, 24-29 e > 29 pelos termos: *muito baixa, baixa, média, alta e muito alta*.

Tomando por base as questões incertas, com relação aos limites do conforto ambiental para matrizes de frango de corte, que atualmente aparecem na literatura, foi criado um **cenário** para a variável de *sensação de conforto térmico* com os termos: *ruim, médio e bom*, num **domínio [0, 1]** de forma que o valor próximo do zero indica a pior sensação e perto do 1, a melhor.

As funções de pertinência selecionadas em ambas variáveis foram as trapezoidais, mas podem ser alteradas após consulta ao especialista.

O **método de inferência** utilizado foi o **Método de Mamdani** que combina os **graus de pertinência** referentes a cada um dos valores de entrada, através do **operador mínimo** e agrega as regras através do **operador máximo**.

À medida que foram procedidas as análises para o **cenário** simulado, os valores da Tabela 1 foram alterados, em função das regras sugeridas **por especialista**.

A base de regras composta por uma coleção de proposições *fuzzy*, apresentadas na forma *se-então*, foi construída a partir da informação da Tabela 1 e com auxílio do especialista, do que se obtém o que mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Composição da Base de Regras utilizando as variáveis de entrada (Umidade Relativa- UR e Temperatura- T) e de saída (Conforto Térmico - CT).

-
1. Se (UR é Baixa) e (T é Muito-baixa) então (CT é Ruim) (1)
 2. Se (UR é Baixa) e (T é Baixa) então (CT é Médio) (1)
 3. Se (UR é Baixa) e (T é Média) então (CT é Bom) (1)
 4. Se (UR é Baixa) e (T é Alta) então (CT é Bom) (1)
 5. Se (UR é Baixa) e (T é Muito-Alta) então (CT é Ruim) (1)
 6. Se (UR é Média) e (T é Muito-baixa) então (CT é Ruim) (1)
 7. Se (UR é Média) e (T é Baixa) então (CT é Bom) (1)
 8. Se (UR é Média) e (T é Média) então (CT é Bom) (1)
 9. Se (UR é Média) e (T é Alta) então (CT é Médio) (1)
 10. Se (UR é Média) e (T é Muito-Alta) então (CT é Ruim) (1)
 11. Se (UR é Alta) e (T é Muito-baixa) então (CT é Ruim) (1)
 12. Se (UR é Alta) e (T é Baixa) então (CT é Médio) (1)
 13. Se (UR é Alta) e (T é Média) então (CT é Bom) (1)
 14. Se (UR é Alta) e (T é Alta) então (CT é Ruim) (1)
 15. Se (UR é Alta) e (T é Muito-Alta) então (CT é Ruim) (1)
-

Nesta Tabela 2, os valores entre parênteses indicam o peso da informação, que pode estar em [0,1], dependendo da indicação pelo especialista.

A Figura 1 mostra a **superfície 3D** da variação não-linear da *sensação* de conforto térmico, como função da *Umidade Relativa* e *Temperatura* do ar e foi gerada a partir da Base de Regras estabelecidas na Tabela 2. Isto posto, e dados valores de temperatura e umidade relativa do ar, tem-se como resultado a **inferência** de um valor ***a***, no intervalo [0,1] que representa a *sensação* de conforto térmico das matrizes. Neste sentido, é possível obter uma saída do sistema de inferência para, por exemplo, uma temperatura de 26 °C e umidade relativa de 75%, e, após a *defuzzificação* encontra-se o valor ***a*** de 0,54, orientando que estas temperatura e umidade relativa dos ar geram condições de um ambiente de *sensação* de conforto térmico médio. Esta é a interpretação que permite o suporte a decisão.

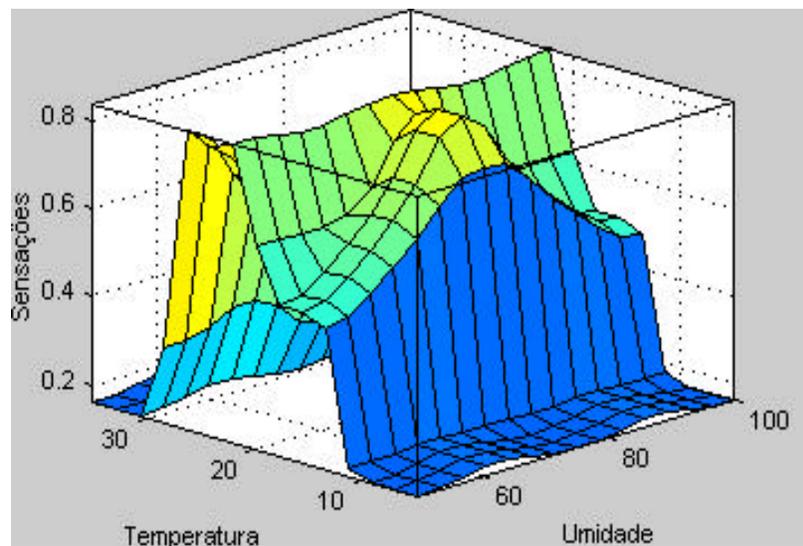


Figura 1: Superfície 3D-Sensação térmica como função da temperatura e umidade relativa do ar.

Este resultado auxilia no suporte a decisão do controle da climatização do galpão, garantindo assim uma melhor produção. Isso em geral é realizado pela manutenção da variável temperatura, uma vez que o controle da umidade relativa mostra-se operacionalmente complexo.

Conclusões:

O uso da teoria dos Conjuntos *Fuzzy* é de interesse e utilidade para a continuidade de pesquisas desta natureza, pois permite a flutuação dos parâmetros com resultados que concordam com as regras estabelecidas por especialistas. Nesse sentido,

já vêm sendo criados cenários para suporte a decisão na determinação da zona de termoneutralidade de algumas espécies em produção industrial.

Ressalta-se que a observação e o armazenamento de informações e dados do modelo que se quer analisar desempenham um papel decisivo nos resultados desse tipo de análise.

O uso dessa técnica pode contribuir com o avanço significativa desta área de pesquisa, quando seus resultados forem associados aos dados de produção, o que já vem sendo estudado na Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP.

Referências citadas

AMENDOLA, M. Modelagem matemática e simulação numérica para suporte a decisão de sistemas agrícolas. Ciclo de Palestras. CPG/FEAGRI.(www.agr.unicamp.br).

COSTA, C. A – Pontos Críticos do manejo de matrizes, Manejo de Matrizes, Campinas: Fundação Apinco de Ciência e Tecnologia Avícolas, 1-10p., (1994)

JAFELICE, R., BARROS, L., BASSANEZI, R. e GOMIDE, F. – Modelos Epidemiológicos com Parâmetros Subjetivos – Relatório Técnico – FEEC-UNICAMP, (2001).

PEREIRA, D. F. - Avaliação do comportamento individual de matrizes pesadas (frango de corte) em função do ambiente e identificação da temperatura crítica máxima. Dissertação de Mestrado. FEAGRI-UNICAMP. Campinas SP (2002).

TINOCO, I.F.F. Ambiência e instalações na produção de matrizes avícolas, In. SILVA, I.J.O, Ambiência na produção de aves em clima tropical, vol.2, p 1-74, (2001).