

1 Metodologia

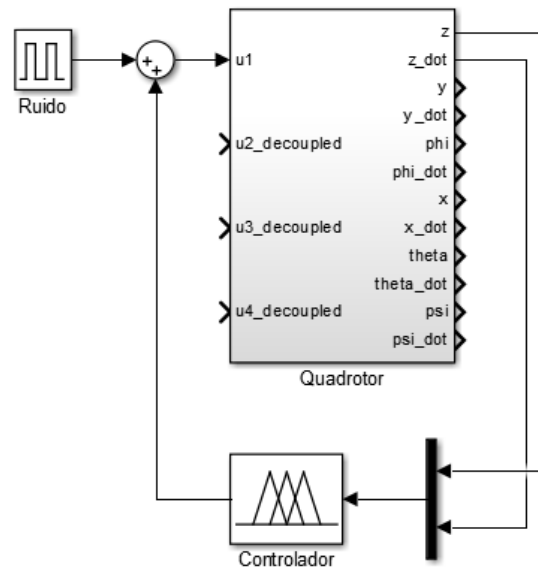
Em ambiente simulado, utilizando a modelagem computacional de um quadrotor com desacoplamento das entradas proposto por Balas (2007) e mostrado na seção ??, foram propostos, para estabilizar o sistema, controladores aplicando duas técnicas diferentes de IC: fuzzy e neuro-fuzzy. Todas as simulações e execuções se deram utilizando a versão R2015a do MATLAB.

1.1 Controladores Fuzzy

O projeto dos controlador fuzzy foi focado na estabilização de atitude e altitude de um drone sujeito a parâmetros específicos¹, sendo eles: a gravidade $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, a massa do quadrotor $m = 2,3 \text{ kg}$ e o comprimento de cada haste do drone $l = 0,5 \text{ m}$. Um dos controladores projetado tem, como objetivo, controlar a altitude do drone, ao passo que um segundo visa a estabilização de sua atitude.

O controlador de altitude possui duas entradas e uma saída. As entradas são referentes à posição vertical do quadrotor (z) e sua respectiva velocidade (\dot{z}), ao passo que a saída diz respeito ao sinal de controle a ser aplicado sobre o sistema para estabilizar sua altitude (u_1). Sua aplicação no sistema é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Diagrama do sistema de controle de altitude utilizando controlador fuzzy



Utilizando o *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB, cada variável linguística do controlador fuzzy foi dividida em três conjuntos: N (negativo), Z (zero) e P (positivo), baseado

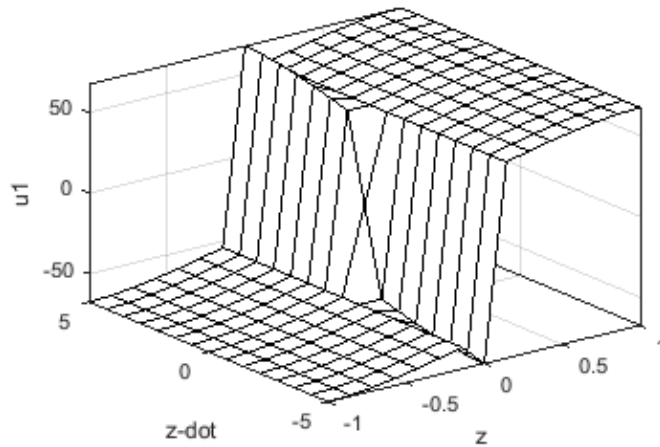
¹ Estes valores foram também utilizados por Balas (2007) para definir uma especificação do sistema

nos trabalhos de [Maj e Butkiewicz \(2013\)](#) e [Gao et al. \(2014\)](#). As regras fuzzy definidas para este controlador são mostradas no Quadro 1, e a Figura 2 exibe seu equivalente em superfície.

Quadro 1 – Regras fuzzy para modelagem do controle de altitude

| z | \dot{z} | u_1 |
|-----|-----------|-------|
| N | - | N |
| P | - | P |
| Z | N | N |
| Z | Z | Z |
| Z | P | P |

Figura 2 – Superfície das regras do sistema de controle fuzzy para a altitude do quadrotor



O controlador de atitude projetado também possui duas entradas e uma saída. Desta vez, entretanto, as entradas são referentes ao ângulo em relação ao eixo horizontal (ϕ ou θ) e sua respectiva variação ($\dot{\phi}$ ou $\dot{\theta}$). Mais uma vez, cada variável linguística foi dividida em três conjuntos: N, Z e P.

As regras que regem o controlador de atitude são sintetizadas no Quadro 2 e podem ser vistas na superfície de regras mostradas na Figura 3.

Já as Figuras 4 e 5 exibem os diagramas do sistema controlado, com atuação sobre os ângulos ϕ e θ , respectivamente.

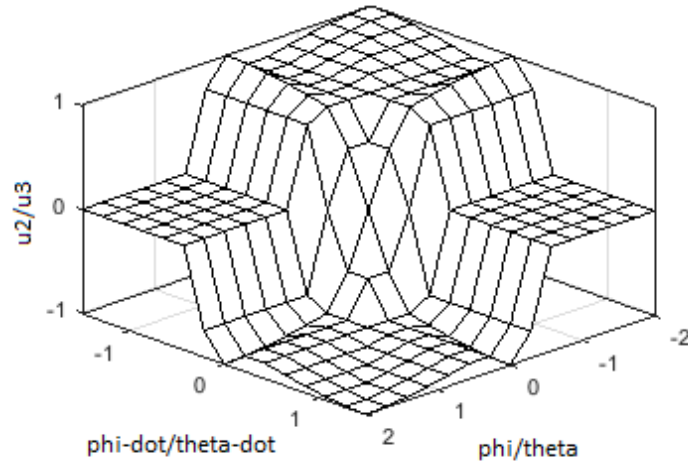
1.2 Controladores Neuro-Fuzzy

A partir dos controladores de atitude e altitude fuzzy projetados, foram propostos dois controladores do tipo neuro-fuzzy: um para cada dos casos.

Quadro 2 – Regras fuzzy para modelagem do controle de atitude

| ϕ/θ | $\dot{\phi}/\dot{\theta}$ | u_2/u_3 |
|---------------|---------------------------|-----------|
| P | P | N |
| P | Z | N |
| P | N | Z |
| N | N | P |
| N | Z | P |
| N | P | Z |
| Z | Z | Z |
| Z | N | P |
| Z | P | N |

Figura 3 – Superfície das regras do sistema de controle fuzzy para a atitude do quadrotor



Para tanto, foram utilizados os códigos mostrados nos Apêndices A e B. No processo de criação do controlador de altitude neuro-fuzzy, foram gerados trezentos² pares de entradas e cada um deles foi submetido ao processo de inferência fuzzy utilizando o controlador previamente modelado. Dois terços desses dados foram utilizados para gerar o conjunto de treinamento, representado pela variável `train` e o um terço restante foi armazenado na variável `test` e utilizado para validação do treinamento. Então, utilizando o comando `mam2sug` do MATLAB, foi gerado um modelo fuzzy Sugeno a partir do Mamdani que havia sido modelado e este novo arquivo foi salvo sob o nome `fis_altitude_neuro.fis`.

Feito isto, utilizou-se o comando `anfisedit` para abrir o *Neuro-Fuzzy Designer* do MATLAB, cuja interface é mostrada na Figura 6. No campo marcado pelo número 2 na imagem (*Generate FIS*), clicou-se no botão *Load* e se selecionou o arquivo `fis_altitude_neuro.fis` que fora gerado pelo código executado. Após isto, no campo marcado pelo número 1 (*Load Data*), marcou-se *Training* e *worksp* para utilizar

² Este valor foi arbitrado por corresponder a uma quantidade razoável para treinar a RNA sem que se alcance o sobreajuste, conhecido como *overfitting*

Figura 4 – Diagrama do sistema de controle de atitude utilizando controlador fuzzy sobre o ângulo ϕ

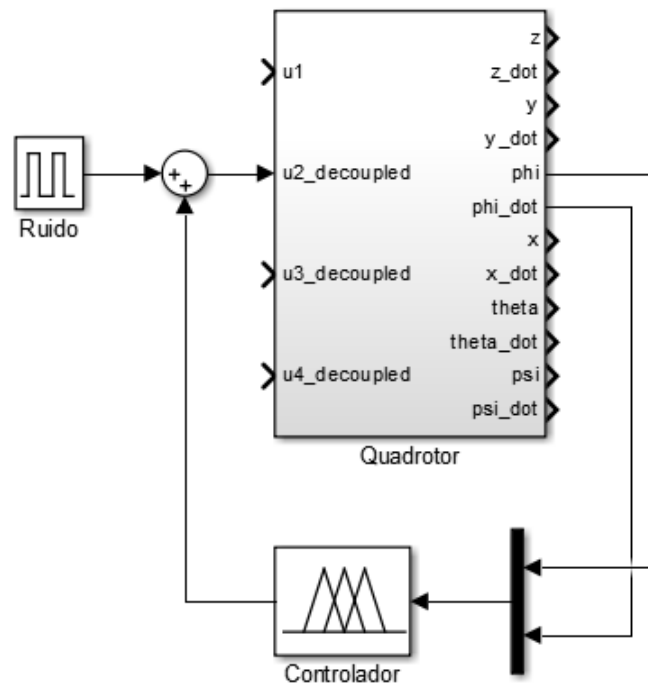
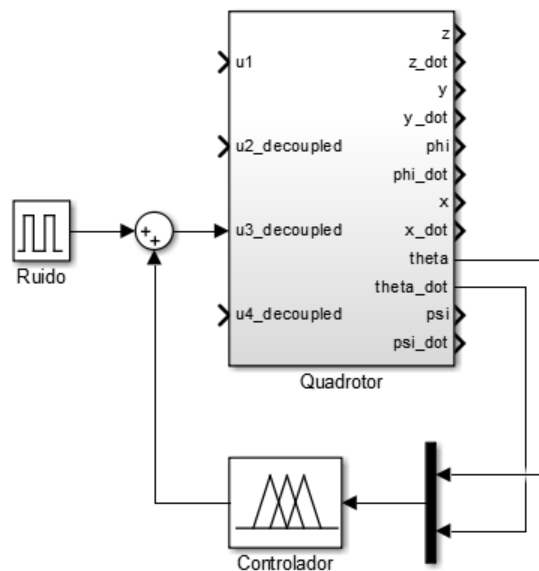


Figura 5 – Diagrama do sistema de controle de atitude utilizando controlador fuzzy sobre o ângulo θ



uma variável da área de trabalho do MATLAB para treinar a rede. Após clicar em *Load Data*, digitou-se `train`, nome da variável definida no código. Então, no campo marcado pelo número 3, marcou-se *Training Data* e se clicou no botão *Test Now* para executar o treinamento da rede. Após estes passos, a rede neuro-fuzzy foi devidamente treinada e sua estrutura, mostrada na Figura 7, pode ser obtida clicando no botão *Structure* logo

acima do campo 3. Esta estrutura relaciona as variáveis de entrada e suas funções de pertinência, através das regras fuzzy, à saída do sistema e às suas funções de pertinência, em que cada componente representa um neurônio da RNA obtida.

Figura 6 – Interface gráfica da ferramenta *Neuro-Fuzzy Designer* com destaque aos três campos necessários para treinamento e teste da rede neuro-fuzzy

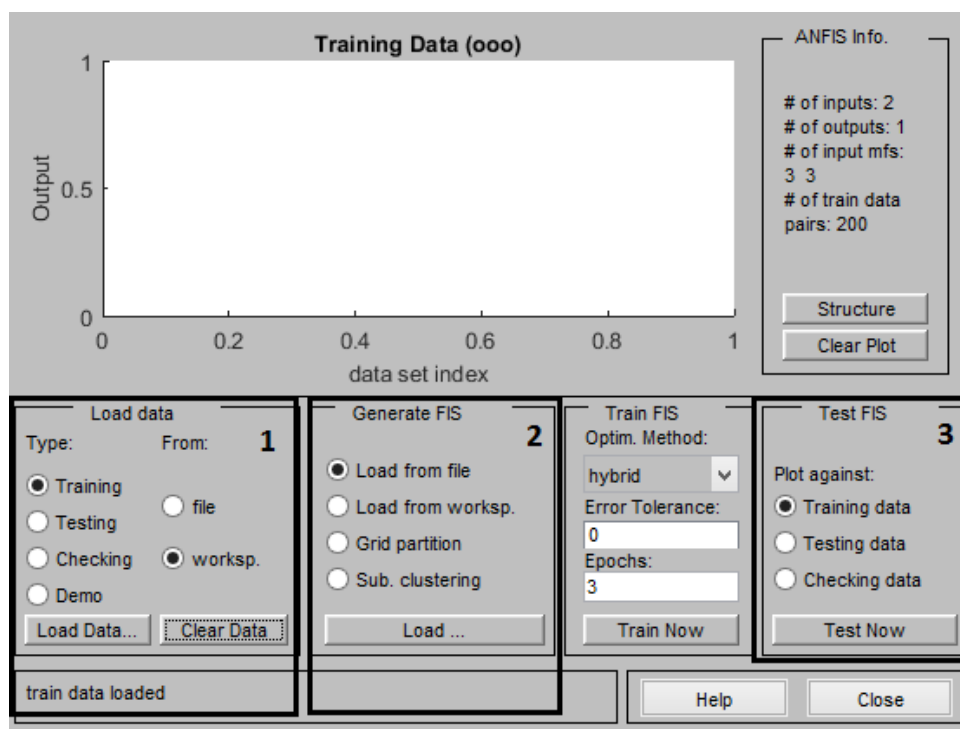
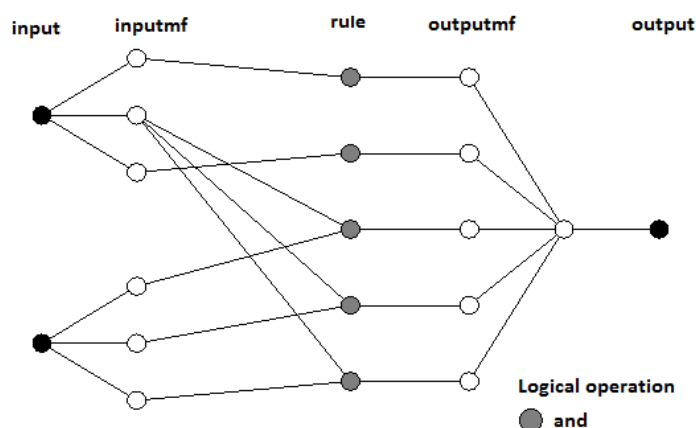


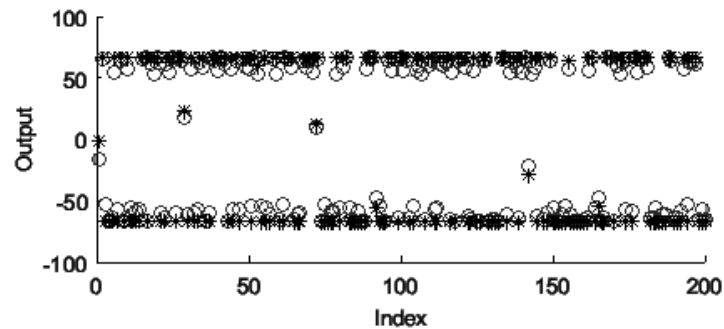
Figura 7 – Diagrama da RNA referente ao controlador neuro-fuzzy para altitude



Após o término do treinamento, deve-se submeter a rede ao processo de treinamento. Para tanto, basta selecionar *Testing* no campo marcado pelo número 1, deixar marcada a opção *worksp*, clicar no botão *Load Data* e escolher a variável *test*, que também foi definida no código executado.

A Figura 8 mostra o gráfico obtido na ferramenta após o processo de treinamento, em que os círculos brancos mostram os dados utilizados no treinamento e os asteriscos pretos indicam o valor referentes a eles obtidos pela rede treinada.

Figura 8 – Resultado obtido pelo treinamento da RNA para controle de altitude



Um processo similar foi aplicado para modelar o controlador de atitude neuro-fuzzy, como mostra o Apêndice B. As Figuras 9 e 10 mostram o diagrama da RNA referente ao controlador neuro-fuzzy para atitude e o resultado obtido pelo seu treinamento respectivamente.

Figura 9 – Diagrama da RNA referente ao controlador neuro-fuzzy para atitude

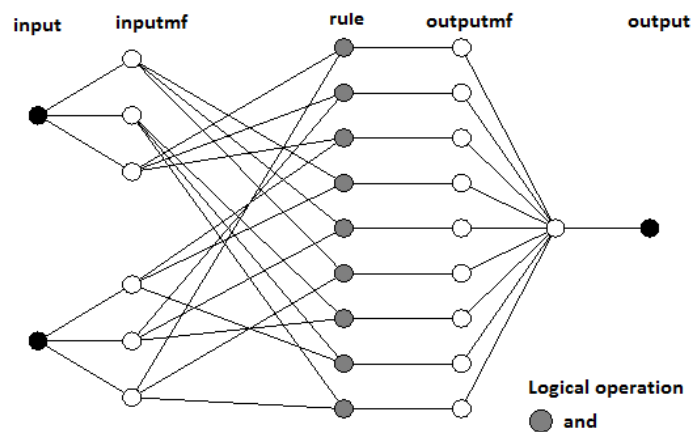
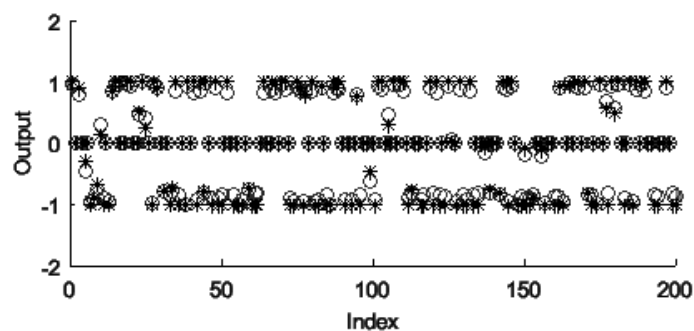


Figura 10 – Resultado obtido pelo treinamento da RNA para controle de atitude



O processo de treinamento determina o comportamento dos controladores neuro-fuzzy projetados, cujas superfícies de regras são exibidas nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 – Superfície das regras do sistema de controle neuro-fuzzy para a altitude do quadrotor

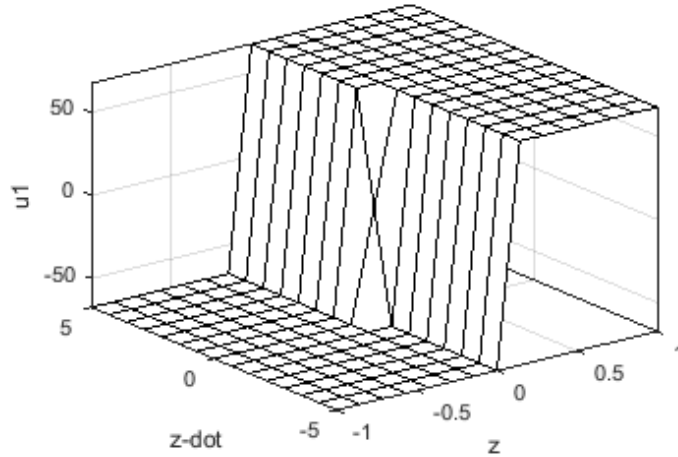
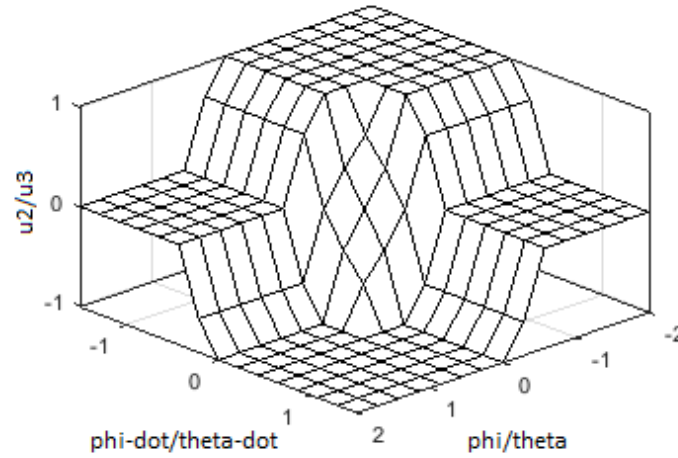


Figura 12 – Superfície das regras do sistema de controle fuzzy para a atitude do quadrotor



1.3 Experimentos Realizados

O primeiro experimento feito foi para mostrar a instabilidade do sistema, mostrando a resposta das variáveis relacionadas à atitude (ângulos ϕ e θ) e altitude (z) quando o sistema é submetido a um breve impulso em suas entradas, simulando qualquer força que possa atuar brevemente sobre o quadrotor, como um golpe sofrido por qualquer objeto que colida com ele. Após contextualizada a necessidade de controladores, passou-se à sua implementação e uso.

Uma vez projetados os controladores fuzzy e neuro-fuzzy, o sistema foi submetido a distúrbios em atitude e altitude para verificar o funcionamento deles sob condições

similares às mostradas quando nenhum controle agia sobre ele fazendo com que o sistema divergisse.. Primeiramente, o comportamento de ambos os controladores foi verificado quando atuando sobre o sistema para os quais eles foram projetados, com $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $m = 2,3 \text{ kg}$ e $l = 0,5 \text{ m}$.

Em seguida, para testar a robustez de cada controlador, foi feita uma simulação em que eles atuam sobre um sistema cuja massa do quadrotor é $m = 5 \text{ kg}$, valor este que foi escolhido por variar o parâmetro massa em mais de 100 %.

Os resultados obtidos são mostrados no capítulo seguinte.

Referências

BALAS, C. **Modeling and Linear Control of a Quadrotor**. Dissertação (Mestrado) — Cranfield University, Reino Unido, 2007. Citado na página [1](#).

GAO, Q.; YUE, F.; HU, D. Research of stability augmentation hybrid controller for quadrotor uav. In: **Control and Decision Conference (2014 CCDC), The 26th Chinese**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 5224–5229. Citado na página [2](#).

MAJ, W.; BUTKIEWICZ, B. Flying n-copter with fuzzy logic control. In: **Signal Processing Symposium (SPS), 2013**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. Citado na página [2](#).

Apêndices

APÊNDICE A – Código para Criação de Modelo Neuro-Fuzzy para Altitude e Definição de Dados para Treinamento

```

1      % le arquivo fis referente ao controle de altitude
2      fismat = readfis('fis_altitude.fis');
3
4      % define numero de casos a serem avaliados (treinamento + teste)
5      n = 300;
6      % define conjunto de n entradas aleatorias para o sistema fuzzy
7      % respeitando o range de cada entrada
8      input = zeros(n,2);
9      for i=1:n
10         z_value = rand * 2 - 1;
11         z_dot_value = rand * 10 - 5;
12         input(i,:) = [ z_value z_dot_value ];
13     end
14
15     % avalia resposta fuzzy para cada entrada
16     output= evalfis(input,fismat);
17
18     % define data como vetor relacionando cada conjunto de entradas ...
19     % a saida
20     % - obtida pelo sistema fuzzy
21     data = [];
22     for i=1:n
23         data(i,:) = [ input(i,:) output(i) ];
24     end
25
26     % define que 2/3 dos dados obtidos serao usados para treinamento
27     % e 1/3 sera usado para teste da rede
28     train = data(1:2*n/3,:);    % dados para treinamento
29     test = data(2*n/3+1:n,:);  % dados para validacao do sistema ...
30     treinado
31
32     % gera modelo fuzzy Sugeno a partir do Mamdani modelado
33     sugFIS = mam2sug(fismat);
34     % salva modelo Sugeno em disco com o nome fis_altitude_neuro.fis
35     writefis(sugFIS, 'fis_altitude_neuro.fis');

```

APÊNDICE B – Código para Criação de Modelo Neuro-Fuzzy para Atitude e Definição de Dados para Treinamento

```

1      % le arquivo fis referente ao controle de atitude
2      fismat = readfis('fis_atitude.fis');
3
4      % define numero de casos a serem avaliados (treinamento + teste)
5      n = 300;
6      % define conjunto de n entradas aleatorias para o sistema fuzzy
7      % respeitando o range de cada entrada
8      input = zeros(n,2);
9      for i=1:n
10         phi_value = rand * 4 - 2;
11         phi_dot_value = rand * 3 - 1.5;
12         input(i,:) = [ phi_value phi_dot_value ];
13     end
14
15     % avalia resposta fuzzy para cada entrada
16     output= evalfis(input,fismat);
17
18     % define data como vetor relacionando cada conjunto de entradas ...
19     % a saída
20     % obtida pelo sistema fuzzy
21     data = [];
22     for i=1:n
23         data(i,:) = [ input(i,:) output(i) ];
24     end
25
26     % define que 2/3 dos dados obtidos serao usados para treinamento
27     % e 1/3 sera usado para teste da rede
28     train = data(1:2*n/3,:);    % dados para treinamento
29     test = data(2*n/3+1:n,:);  % dados para validação do sistema ...
30     % treinado
31
32     % gera modelo fuzzy Sugeno a partir do Mamdani modelado
33     sugFIS = mam2sug(fismat);
34     % salva modelo Sugeno em disco com o nome fis_atitude_neuro.fis
35     writefis(sugFIS, 'fis_atitude_neuro.fis');

```