1 Metodologia

Todo o trabalho foi desenvolvido em ambiente simulado, utilizando o software Matlab®. Primeiramente, foram representados no Simulink® dois sistemas de quadricóptero seguindo a modelagem proposta por Balas (2007): ambos submetidos a uma gravidade $g=9.8~{\rm m/s^2}$ e com comprimento de cada haste $l=0.5~{\rm m}$. Os dois sistemas diferem entretanto na massa do quadricóptero modelado em cada caso: $m=2.3~{\rm kg}$ e $m=5~{\rm kg}$.

O sistema com massa m=2,3 kg foi então utilizado para mostrar o desacoplamento das entradas e a instabilidade do sistema. Para tanto, o modelo foi submetido sinais em pulso em cada uma de suas entradas.

Então, a partir da resposta do sistema ao pulso em cada uma de suas entradas, foram modelados dois controladores *fuzzy* para estabilizar a atitude e altitude do quadricóptero. Para tanto, foi utilizada a ferramenta *Fuzzy Logic Toolbox* do Matlab[®].

A partir dos controladores *fuzzy* desenvolvidos e utilizando a ferramenta *Neuro-Fuzzy Designer* também do Matlab[®] foram modelados dois controladores neuro-*fuzzy* para controlar a atitude e altitude do *drone*.

Os controladores fuzzy e neuro-fuzzy foram então comparados tanto para o sistema com massa de m=2,3 kg quanto para o de m=5 kg. Os aspectos levados em conta para a comparação dos controladores foram:

- Variação apresentada;
- Tempo necessário para a estabilização;
- Oscilação;
- Sobrelevação apresentada;
- Gasto enérgico apresentado pelos controladores.

Por fim, o sistema com massa m=2,3 kg, para o qual os controladores foram desenvolvidos, foi submetido a um cenário que envolve ruídos de medição para verificar se o controle implementado se mostra robusto.

2 Desenvolvimento do Trabalho

Este capítulo trata da forma como o trabalho foi desenvolvido de forma a aplicar a metodologia proposta, descrevendo os processos utilizados para a verificação do desacoplamento e instabilidade do sistema (Seção 2.1); a modelagem dos controladores *fuzzy* (Seção 2.2) e neuro-*fuzzy* (Seção 2.3); e a descrição detalhada dos experimentos realizados (Seção 2.4).

2.1 Verificação do Desacoplamento das Entradas

2.2 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 $g=9.81 \, \mathrm{m/s^2}$, a massa do quadricóptero $m=2.3 \, \mathrm{kg}$ e o comprimento de cada haste do $drone \ l=0.5 \, \mathrm{m}$. Um dos controladores projetado tem, como objetivo, controlar a altitude do quadricóptero, ao passo que um segundo visa a sua estabilização de sua atitude.

O controlador de altitude possui duas entradas e uma saída. As entradas são referentes à posição vertical do quadricóptero (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.

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

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

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

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

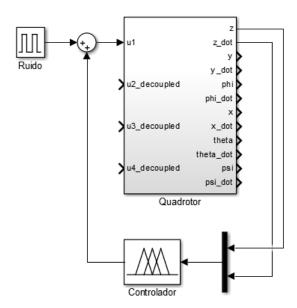
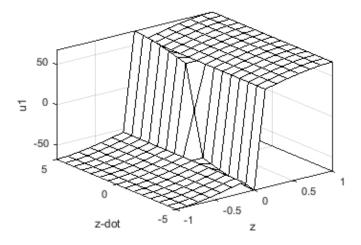


Figura 2 – Superfície das regras do sistema de controle fuzzy para a altitude do quadrotor



 $(\phi$ ou $\theta)$ e sua respectiva variação $(\dot{\phi}$ ou $\dot{\theta})$. Mais uma vez, cada variável linguística foi dividida em três conjuntos: N, Z e P.

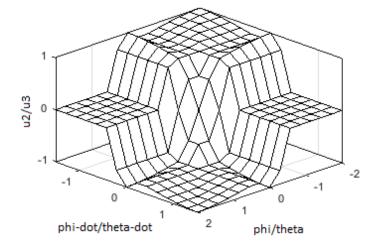
As regras que regem o controlador de atitude são sintetizadas no Quadro 2 e podem ser vistas na superfície de regras mostradas na Figura 3.

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

ϕ/θ	$\dot{\phi}/\dot{ heta}$	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

Quadro 2 – Regras fuzzy para modelagem do controle de atitude

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



2.3 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.

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 comando anfisedit para abrir o Neuro-Fuzzy

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

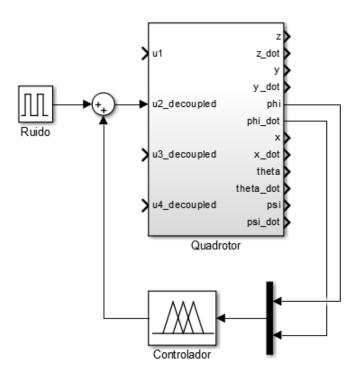
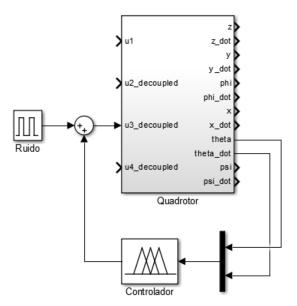


Figura 5 – Diagrama do sistema de controle de atitude utilizando controlador fuzzy sobre o ângulo θ



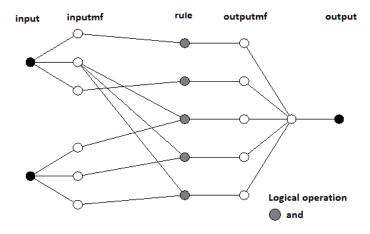
Designer do MATLAB, cuja interface é mostrada na Figura 6. No campo marcado pelo número 2 na imagem (*Generate FIS*), clicou-se no botão *Load* e se selecionou o arquivo fis_altitude_neuro.fis que fora gerado pelo código executado. Após isto, no campo marcado pelo número 1 (*Load Data*), marcou-se *Training*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

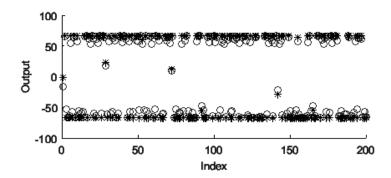


Após o término do treinamento, deve-se submeter a rede ao processo de treinamento. Para tanto, basta selecionar *Testing* no campo marcado pelo número 1, deixar

marcada a opção *worksp*, clicar no botão *Load Data* e escolher a variável test, que também foi definida no código executado.

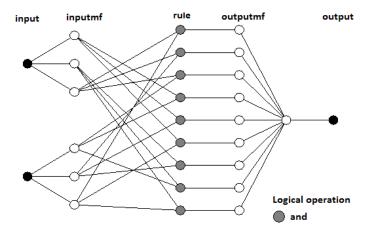
A Figura 8 mostra o gráfico obtido na ferramenta após o processo de treinamento, em que os círculos brancos mostram os dados utilizados no treinamento e os asteriscos pretos indicam o valor referentes a eles obtidos pela rede treinada.

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



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

2.4 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)

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

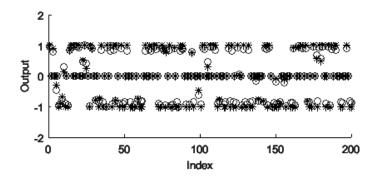


Figura 11 – Superfície das regras do sistema de controle neuro-fuzzy para a altitude do quadrotor

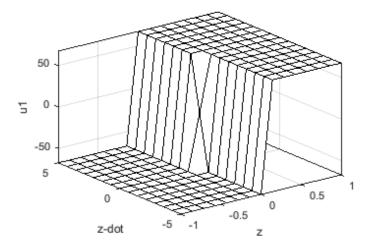
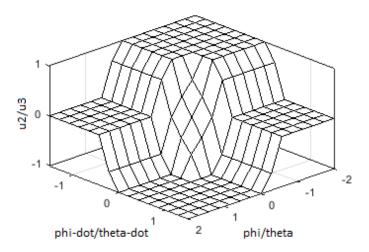


Figura 12 – Superfície das regras do sistema de controle fuzzy para a atitude do quadrotor



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 sujeitado 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 $g = 9.81 \ m/s^2$, $m = 2.3 \ kg$ e $l = 0.5 \ m$.

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 $m=5\ kg$, 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 2 vezes nas páginas 1 e 2.

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.



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
       fismat = readfis('fis_altitude.fis');
2
       % define numero de casos a serem avaliados (treinamento + teste)
       n = 300;
5
       % define conjunto de n entradas aleatorias para o sistema fuzzy
       % respeitando o range de cada entrada
       input = zeros(n, 2);
8
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
15
       % avalia resposta fuzzy para cada entrada
       output= evalfis(input, fismat);
16
17
       % define data como vetor relacionando cada conjunto de entradas ...
          a saida
       % - obtida pelo sistema fuzzy
19
       data = [];
20
       for i=1:n
21
22
          data(i,:) = [input(i,:) output(i)];
23
       end
24
       % define que 2/3 dos dados obtidos serao usasdos para treinamento
25
       % e 1/3 sera usado para teste da rede
26
       train = data(1:2*n/3,:);
                                  % dados para treinamento
28
       test = data(2*n/3+1:n,:);
                                  % dados para validacao do sistema ...
          treinado
29
30
       % gera modelo fuzzy Sugeno a partir do Mamdani modelado
31
       sugFIS = mam2sug(fismat);
       % salva modelo Sugeno em disco com o nome fis_altitude_neuro.fis
32
33
       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
       fismat = readfis('fis_atitude.fis');
2
       % define numero de casos a serem avaliados (treinamento + teste)
       n = 300;
5
       % define conjunto de n entradas aleatorias para o sistema fuzzy
       % respeitando o range de cada entrada
       input = zeros(n, 2);
8
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
15
       % avalia resposta fuzzy para cada entrada
       output= evalfis(input, fismat);
16
17
       % define data como vetor relacionando cada conjunto de entradas ...
          a saÃda
       % obtida pelo sistema fuzzy
19
       data = [];
20
       for i=1:n
21
22
          data(i,:) = [input(i,:) output(i)];
23
       end
24
       % define que 2/3 dos dados obtidos serao usasdos para treinamento
25
       % e 1/3 sera usado para teste da rede
26
       train = data(1:2*n/3,:);
                                  % dados para treinamento
28
       test = data(2*n/3+1:n,:);
                                  % dados para validação do sistema ...
          treinado
29
30
       % gera modelo fuzzy Sugeno a partir do Mamdani modelado
31
       sugFIS = mam2sug(fismat);
       % salva modelo Sugeno em disco com o nome fis_atitude_neuro.fis
32
33
       writefis(sugFIS, 'fis_atitude_neuro.fis');
```