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 a sinais em pulso em cada uma de suas entradas. Então, a partir da resposta do sistema a essas 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 $^{\otimes}$.

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.

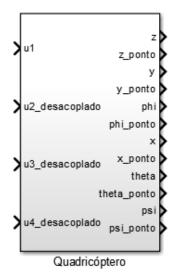
2 Desenvolvimento do Trabalho

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

A representação do quadricóptero criada no Simulink[®] seguindo a modelagem de Balas (2007) é mostrada na Figura 1.

Figura 1 – Representação do quadricóptero no Simulink



Como se pode ver, o sistema inclui os quatro sinais de entrada seguindo o desacoplamento desenvolvido (u1, u2_desacoplado, u3_desacoplado e u4_desacoplado) e com as doze saídas referentes às seis variáveis de configuração x, y, z, ϕ , θ , ψ indicadas por x, y, z, phi, theta e psi, respectivamente; e suas respectivas variações \dot{x} , \dot{y} , \dot{z} , $\dot{\phi}$, $\dot{\theta}$, $\dot{\psi}$ representadas por x_ponto, y_ponto, z_ponto, phi_ponto, theta_ponto e psi_ponto.

Para mostrar o desacoplamento das variáveis, alternadamente foi aplicado um sinal de degrau a cada uma das entradas. Em cada um dos casos, somente uma entrada era submetida ao degrau, ao passo que as demais eram aterradas. As respostas, a cada um dos experimentos, das variáveis de configuração relativas à altitude e atitude do quadricóptero são mostradas nas Figuras 2, 3, 4 e 5 tomando como estado inicial um quadricóptero estável ($\phi = \theta = \psi = 0$ rad) a trinta metros de altura (z = -30 m).

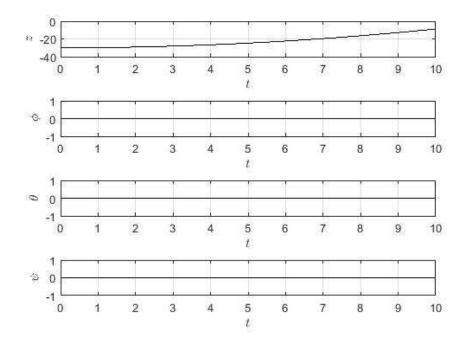
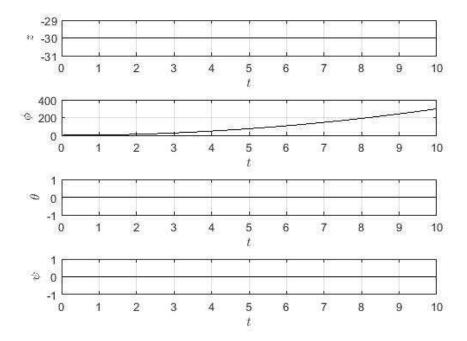


Figura 2 – Resposta das saídas z, ϕ , θ e ψ a um entrada em degrau em u1

Figura 3 – Resposta das saídas z
, ϕ , θ e ψ a um entrada em degrau em
 $u2_desacoplado$



Como se pode ver, cada entrada afeta uma única saída e cada saída é afetada apenas por uma entrada. Com isso, mostra-se o desacoplamento existente que faz com que a entrada u1 somente interfira na variável de configuração z; $u2_desacoplado$ em ϕ ; $u3_desacoplado$ em θ ; e $u4_desacoplado$ em ϕ .

Figura 4 – Resposta das saídas z
, ϕ , θ e ψ a um entrada em degrau em
 $u3_desacoplado$

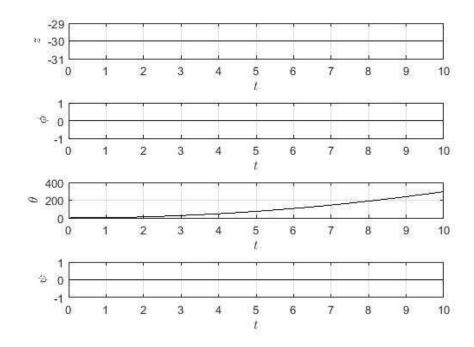
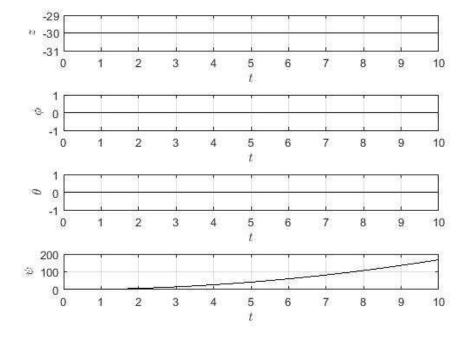


Figura 5 – Resposta das saídas z
, ϕ , θ e ψ a um entrada em degrau em
 $u4_desacoplado$



2.2 Controladores Fuzzy

O projeto dos controlador *fuzzy* foi focado na estabilização de atitude e altitude do *drone* modelado de forma a se inserirem no sistema como é mostrado na Figura 6.

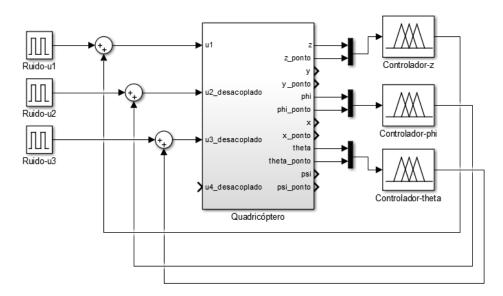


Figura 6 – Diagrama do sistema de controle de altitude utilizando controlador fuzzy

Como se pode ver, três controladores agem no sistema com o objetivo de tornálo imune a distúrbios representados pelas entradas de ruídos. O Controlador-z diz respeito a um controlador de altitude ao passo que os Controlador-phi e Controlador-theta dizem respeito a controladores de atitude que, pelo fato de o quadricóptero ser simétrico em relação aos eixos x e y, puderam ser representados por um único controlador.

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) .

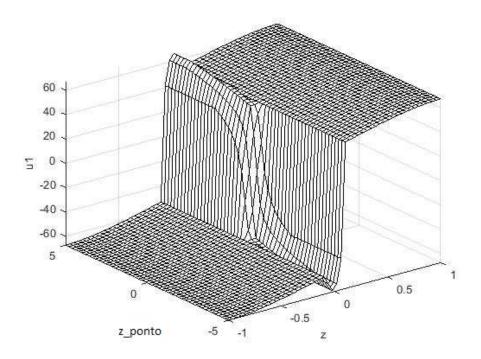
Utilizando o *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB, cada variável linguística do controlador *fuzzy* foi dividida em três conjuntos: N (negativo), Z (zero) e P (positivo), tomando como base os trabalhos de Maj e Butkiewicz (2013) e Gao et al. (2014). As regras *fuzzy* definidas para este controlador são mostradas no Quadro 1, e a Figura 7 exibe seu equivalente em superfície.

Quadro 1 – Regras fuzzy para modelagem do controle de altitude

z	\dot{z}	u_1
N	ı	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

Figura 7 – Superfície das regras do sistema de controle *fuzzy* para a altitude do quadricóptero



 $(\phi$ 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.

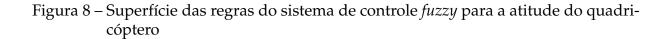
As regras que regem o controlador de atitude são sintetizadas no Quadro 2 e podem ser vistas na superfície de regras mostradas na Figura 8.

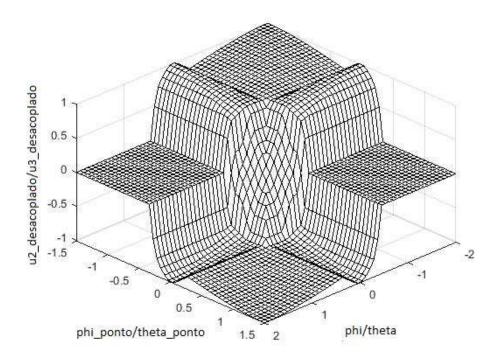
Quadro 2 – Regras fuzzy para modelagem do controle de atitude

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

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 trezentos¹ pares de entradas e cada um deles foi submetido ao processo de inferência fuzzy utilizando o controlador previamente modelado e descrito na Seção 2.2. 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 mam2 sug 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 Designer do MATLAB, cuja interface é mostrada na Figura 9. 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 10, pode ser obtida clicando no botão Structure logo

Este valor foi arbitrado por corresponder a uma quantidade razoável para treinar a RNA sem que se alcance o sobre-parametrização, conhecido como *overfitting*.

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

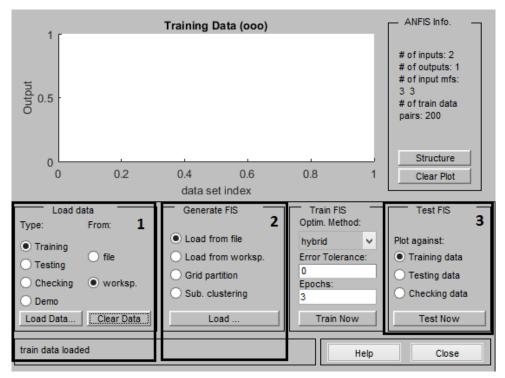
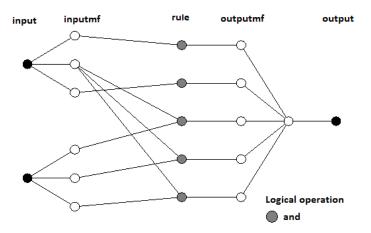


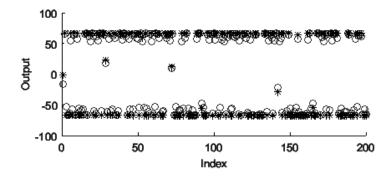
Figura 10 – Diagrama da RNA referente ao controlador neuro-fuzzy para altitude



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

A Figura 11 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 11 – 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 12 e 13 mostram o diagrama da RNA referente ao controlador neuro-fuzzy para atitude e o resultado obtido pelo seu treinamento respectivamente.

Figura 12 – Diagrama da RNA referente ao controlador neuro-fuzzy para atitude

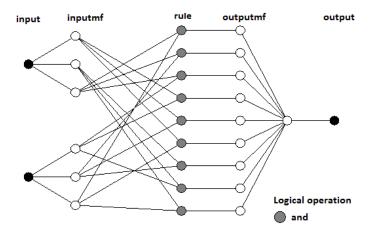


Figura 13 – Resultado obtido pelo treinamento da RNA para controle de atitude



O processo de treinamento determina o comportamento dos controladores neurofuzzy projetados, cujas superfícies de regras são exibidas nas Figuras 14 e 15.

Figura 14 – Superfície das regras do sistema de controle neuro-*fuzzy* para a altitude do quadricóptero

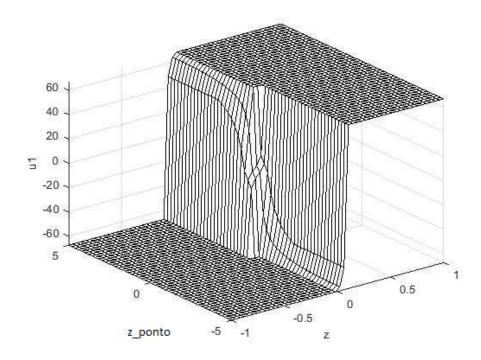
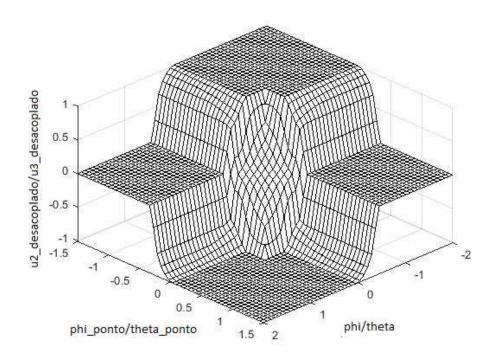


Figura 15 – Superfície das regras do sistema de controle neuro-*fuzzy* para a atitude do quadricóptero



2.4 Experimentos Realizados

Uma vez projetados os controladores fuzzy e neuro-fuzzy, o sistema foi sujeitado a distúrbios em pulso 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 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 quadricóptero é $m=5~{\rm kg}$, valor este que foi escolhido por variar o parâmetro massa em mais de 100 %.

Por fim, foi testado o funcionamento do sistema quando um ruído de medição passa a fazer parte dele. 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 5.

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 5.



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');
```