

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETRICA
PROGRAMA DE POS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DIEGO CÂMARA SALES

**CONTROLADOR NEBULOSO PARA ESTABILIDADE
DE QUADROTORES**

MANAUS

2014

DIEGO CÂMARA SALES

**CONTROLADOR NEBULOSO PARA ESTABILIDADE
DE QUADROTORES**

Trabalho submetido ao Mestrado em Engenharia Elétrica, Controle e Automação de Sistemas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas como requisito para obtenção do grau de Mestre.

MANAUS

2014

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

S163c Sales, Diego Camara
Controlador Nebuloso para estabilidade de quadrotores / Diego
Camara Sales. 2014
76 f.: il. color; 31 cm.

Orientador: João Edgar Chaves Filho
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade
Federal do Amazonas.

1. Controlador Fuzzy. 2. Controle. 3. Estabilidade. 4. Quadrotor. I.
Chaves Filho, João Edgar II. Universidade Federal do Amazonas III.
Título

DIEGO CÂMARA SALES

CONTROLADOR NEBULOSO PARA ESTABILIDADE DE
QUADROTORES

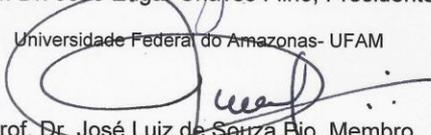
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Amazonas, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração Controle e Automação de Sistemas.

Aprovado em 26 de setembro de 2014.

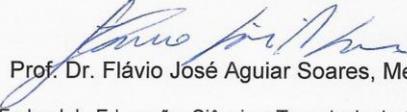
BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. João Edgar Chaves Filho, Presidente

Universidade Federal do Amazonas- UFAM


Prof. Dr. José Luiz de Souza Pijo, Membro

Universidade Federal do Amazonas- UFAM


Prof. Dr. Flávio José Aguiar Soares, Membro

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas- IFAM

RESUMO

Hoje em dia os helicópteros do tipo quadrotor estão se tornando populares no desenvolvimento de pesquisas em veículos aéreos não tripulados VANT, pela sua capacidade de pouso vertical e de planar em locais de difícil acesso. O controle da maioria destes veículos é baseado em modelos dinâmicos físicos ou experimentais, podendo apresentar um alto custo devido ao tempo de desenvolvimento do projeto. Neste trabalho é apresentado o controle de estabilidade de um quadrotor utilizando lógica *fuzzy*, que dispensa a necessidade de um modelo dinâmico para o projeto do controlador. Utilizando a menor quantidade de regras linguísticas com o intuito de viabilizar a implementação do controlador em sistemas embarcados de baixa capacidade computacional simplificando o desenvolvimento do controlador de estabilidade do sistema proposto.

Palavras Chaves: Quadrotor, estabilidade, regras linguísticas, controlador *fuzzy*, sistema embarcado.

ABSTRACTS

Nowadays kind quadrotor helicopters are becoming popular in developing research in unmanned aerial vehicles UAV, for its ability to planar and vertical landing in hard to reach places. The control of most of these vehicles is based on physical or experimental dynamic models, and may have a high cost due to the time of project development. In this work is presented the stability control using fuzzy logic, which eliminates the need for a dynamic model for the controller design. Using the least amount of linguistic rules in order to enable the implementation of the controller in embedded systems with low computational capacity.

Key Words: Quadrotor, fuzzy logic, stability, fuzzy control.

AGRADECIMENTOS

- Primeiramente a Deus pela oportunidade que Ele me concedeu ao ingressar, cursar e concluir o curso de Engenharia Elétrica nessa universidade;

- À minha família, minha mãe (Sr.^a. Maria da Glória Câmara Sales), meu pai (Sr. José Maria Sales Pinheiro), minha esposa (Aracelli Monteiro de Pontes e Sousa) que de alguma forma contribuíram para minha formação profissional e pessoal durante todos esses anos;

- Ao meu orientador, Professor Doutor João Edgar Chaves Filho, pela orientação na elaboração deste trabalho, e aos demais professores dos cursos de Engenharia Elétrica e Engenharia da Computação;

-A todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

"Tão próximas as leis da matemática estejam da realidade, menos próximas da certeza elas estarão. E tão próximas elas estejam da certeza, menos elas se referirão à realidade"

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

Capitulo 1	14
INTRODUÇÃO	14
1.1 Estrutura da Dissertação.....	16
1.2 Quadrotor	16
1.3 Dinâmica do quadrotor.....	19
1.4 Motivações	23
1.5 Objetivo.....	23
1.5.1 Objetivos Específicos.....	24
1.6 Revisão da Literatura.....	24
Capitulo 2	27
FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY.....	27
2.1 Conjuntos Fuzzy	28
2.2 Função de Pertinência	28
2.3 Operações e propriedades dos conjuntos fuzzy	32
2.4 Regras <i>Fuzzy</i>	32
2.5 Inferência fuzzy	33
2.5.1 Inferência Mandami	33
2.6 Fuzzyficação	34
2.7 Avaliação das regras fuzzy	34
2.8 Defuzzyficação	35
2.9 Controlador Lógico <i>Fuzzy</i>	36
capitulo 3	38
ARQUITETURA DO SISTEMA	38
3.1 Estrutura mecânica.....	39
3.2 Controle eletrônico de velocidade	39
3.3 Motores e Hélices.....	40
3.4 Unidades de Controle e Processamento (<i>UCP</i>).....	42
3.5 Unidade de comunicação sem fios	43
3.6 Fontes de energia.....	44
3.7 Unidade Móvel Inercial.....	44
3.8 Estação Base	46

3.9	Sistema desenvolvido e plataforma de testes	46
3.10	Controlador Fuzzy Proposto.....	48
3.10.1	Definição das Regras do Controlador Fuzzy	50
3.10.2	Funções de Pertinência	51
3.11	Implementação do Controle em Simulador Computacional	53
3.12	Implementação do Controle em Sistema Embarcado.....	58
CAPITULO 4	60
	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	60
4.1	Comparativo entre as Hélices APC, GWS e Fibra de Carbono.....	60
4.2	Controle do ângulo roll com 45% de potência e 8bits de resolução.	61
4.3	Controle do ângulo roll com 8 e 12 bits de resolução do PWM.	63
4.4	Controle do ângulo roll com perturbação	64
4.5	Sintonia da Função de Pertinência Zero.....	65
4.6	Sintonia da Função de Pertinência de Entrada Negativo e Positivo.....	66
4.7	Sintonia da Função de Pertinência de Saída.....	67
CAPITULO 5	69
	CONCLUSÃO	69
BIBLIOGRAFIA	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- VANT de Asas Fixas	15
Figura 2- VANT de Asa Rotativa	15
Figura 3- quadrotor e seus sistemas	17
Figura 4- Estação de Controle do VANT Hermes da Força Aérea Brasileira. Fonte: Agencia Força Aérea	18
Figura 5- VANT Asa Rotativa pairando no ar. Fonte: http://avairfilms.com.br	18
Figura 6 - Conceito do diagrama do quadrotor.....	19
Figura 7- Sentido de rotação dos motores: (a) Altitude, (b) roll, (c) pitch, (d) yaw.....	21
Figura 8 - Função Triangular.....	29
Figura 9 - Função Trapezoidal.....	29
Figura 10 - Função Gaussiana.....	30
Figura 11 - Função Sino Generalizada.....	30
Figura 12 - Função de Pertinência.....	31
Figura 13 - Módulos do Sistema de Controle fuzzy	33
Figura 14 - Resultado da fuzzyficação	34
Figura 15 - Exemplo fuzzy Gorjeta do Garçom	35
Figura 16 - Defuzificação do tipo Centroide.....	36
Figura 17- Estrutura Física do quadrotor	39
Figura 18- Controlador de velocidade	40
Figura 19- A2212 1100KV, 12 polos e 20 Amperes.....	41
Figura 20- Tipos de hélices utilizadas: (a) APC, (b) 8040	42
Figura 21- Arduino Due.....	43
Figura 22- Módulo Xbee pro	43
Figura 23- Bateria de Polímero de Lítio 3Ah, 11.1V.....	44
Figura 24 - IMU de baixo custo.....	45
Figura 25- Arquitetura do Veículo desenvolvido	46
Figura 26 - Plataforma de testes.....	47
Figura 27 - Sistema de Controle do quadrotor.....	48
Figura 28 - Proposta do Controlador Lógico Fuzzy de Estabilidade.....	49
Figura 29- Funções de Pertinência do ângulo de entrada Roll	52
Figura 30- Funções de Pertinência do Giroscópio X.....	52
Figura 31- Funções de Pertinência do Ângulo de Entrada Roll e Giroscópio X.....	53

Figura 32 - Configuração do controlador <i>fuzzy</i> no Matlab.	53
Figura 33 - Configuração do Toolbox <i>fuzzy</i>	54
Figura 34 - Configuração das funções de pertinência no Toolbox <i>fuzzy</i>	54
Figura 35 - Configuração das Regras utilizando Toolbox <i>fuzzy</i>	55
Figura 36 - Simulação do comportamento do Sistema <i>fuzzy</i> proposto.	55
Figura 37 - Controlador roll simulado no software MATLAB	56
Figura 38 - Sistema de Controle Simulado	56
Figura 39 - Modelo Cinemático e Dinâmico do Quadrotor	57
Figura 40 - Resposta ao Degrau do Controlador Fuzzy Proposto x PD aplicado ao ângulo Roll.....	57
Figura 41 - Plataforma de Desenvolvimento Arduino Due	59
Figura 42 - Dados da Serial: ypr e PWM.....	59
Figura 43 - Comparativo entre as hélices APC e GWS.....	61
Figura 44 - Controle do Giroscópio X.	62
Figura 45 - Controle do Ângulo roll	62
Figura 46 - Sinal de controle PWM do motor 2	63
Figura 47 - Sinal de controle PWM do motor 4	63
Figura 48 - Comparativo do ângulo roll com resolução do PWM de 8 e 12 bits.	64
Figura 49 - Controle do Angulo de atitude roll e giroscópio do eixo X , 8 bits.	65
Figura 50 - Sintonia da Função de Pertinência Zero.	65
Figura 51 - Comparativo da Sintonia da função de pertinência Zero.....	66
Figura 52 - Sintonia da Função de Pertinência Negativo e Positivo.	67
Figura 53 - Comparativo da função de pertinência da saída.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Símbolos e suas definições.....	19
Tabela 2 - Tabela verdade dos movimentos do quadrotor.....	50
Tabela 3 - Regras do acionamento dos motores do quadrotor.	51
Tabela 4 - Comparativo das Hélices APC e GWS.	61
Tabela 5 - Comparativo entre 8 e 12 bits de resolução do PWM.....	64

ABREVIATURAS E SIMBOLOS

VANT	<i>Veículo Aéreo Não Tripulado</i>
BLDC	<i>brushless direct current</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
VTOL	Vertical Off and Landing
PID	Proporcional Integral Derivativo
PD	Proporcional Derivativo
PI	Proporcional Integral
DMP	Digital Motion Processor
IMU	Inertial Measurement Unit

Lista de símbolos

ω	Frequência angular
α	Ângulo
ϕ	Ângulo roll
θ	Ângulo pitch
ψ	Ângulo yaw
u	Sinal de Controle
Ω	Velocidade angular dos motores
b	variável de ajuste do motor.

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos têm havido uma utilização crescente dos Veículos Aéreos Não Tripulados doravante denominado, VANT, para missões de vários tipos como: reconhecimento e combate militar, investigação de fenômenos atmosféricos em grande altitude, investigação em zonas de difícil acesso, comunicações, operações de salvamento e vigilância de espaços.

Os VANT's têm propulsão própria utilizando forças aerodinâmicas que provocam a sua sustentação e não possuem cabine de pilotagem, pois podem ser controlados a distância ou podem possuir algoritmos sofisticados de voo que não requerem a intervenção humana (S. Costa,2008).

Os VANTs tornaram-se objeto de estudo e desenvolvimento depois de terem sido provadas as suas capacidades para enfrentarem situações em que por alguma razão o objetivo da missão não fosse a mais aconselhada para uma aeronave de pilotagem convencional, tendo atualmente variadas configurações e capacidades de acordo com as missões propostas. Entre essas missões, destacam-se situações de reconhecimento e vigilância, onde podem desempenhar um papel importante, na observação de fenômenos meteorológicos e geológicos onde não é possível a presença humana, campos e fazendas onde existe a necessidade de pulverização de produtos químicos em áreas precisas (R. Sugiura,2003), em laboratórios e universidades onde são usados para fins de investigação científica (Syed Ali Raza,2010).

Os desafios da investigação científica é em busca de soluções para os problemas de sensoriamento, controle, planejamento, localização e mapeamento de trajetórias tridimensionais tanto em ambientes internos, *indoor*, quanto em ambientes externos, *outdoor*. O desenvolvimento de veículos para aplicações específicas também demonstra ser um desafio em função das limitações de tamanho, peso, tempo de voo e carga útil que o VANT deve suportar.

Os VANTs podem ser classificados quanto ao tipo de sustentação podendo ser de asa fixa, asa rotativa, balão e dirigíveis, asa móvel. Os modelos de asa fixa utilizam-se de asas fixas em relação a estrutura da aeronave para que possa se manter em sustentação no ar como pode ser visto na Figura 1, em sua grande maioria necessitam de uma pista de pouso e decolagem ou um sistema de catapulta capaz de efetuar o lançamento ao ar.

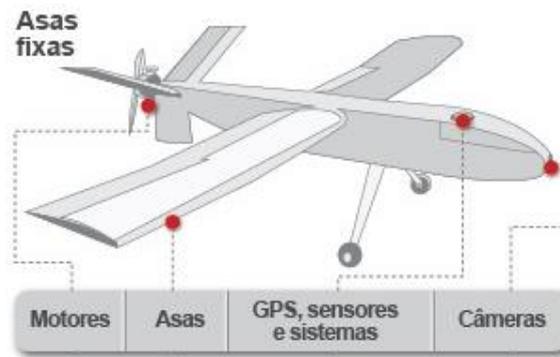


Figura 1- VANT de Asas Fixas e seus componentes. Fonte:g1.com.br

Os VANT's de Asa rotativa são superiores aos de asa fixa pois alcançam maior grau de liberdade em seus movimentos, possibilitando voos com baixa velocidade assim como decolagem e pouso de forma vertical. Podem ser utilizados em ambientes internos e externos, sendo classificado também de acordo com a quantidade de propulsores utilizados , a Figura 2 apresenta um VANT de asa rotativa.

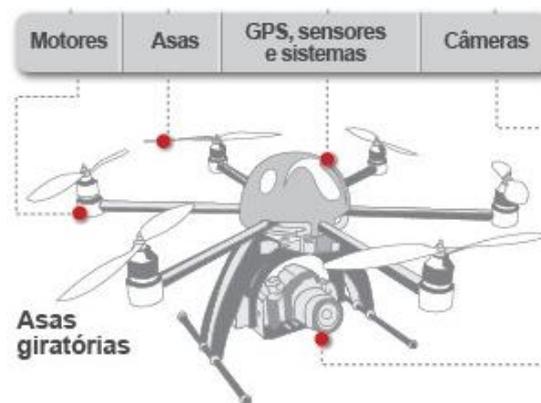


Figura 2- VANT de Asa Rotativa e seus componentes. Fonte: g1.com.br

Os VANT's do tipo balão e dirigíveis utilizam gases que devem ser mais leves que o ar fazendo com que o veículo flutue, são de grandes proporções e podem cobrir uma vasta área em baixa velocidade.

Os VANT's do tipo Asa móvel estão sendo utilizados para fins de pesquisa e são inspiradas em aves e insetos que efetuam o movimento de suas asas para efetuar o voo.

O VANT a ser pesquisado nesta dissertação é do tipo asa rotativa denominado quadrocoptor, sendo descrito o seu funcionamento com o intuito de demonstrar a fundamentação teórica necessária para o devido entendimento da proposta.

1.1 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é composta por cinco capítulos onde o Capítulo 1 faz uma introdução sobre os veículos aéreos não tripulados, sua classificação, assim como o princípio de funcionamento do quadrotor apresentando o modelo dinâmico e o funcionamento do quadrotor. Define também os objetivos e motivações que levaram ao desenvolvimento deste trabalho. É abordado uma revisão da literatura, pesquisando assim trabalhos e projetos que foram desenvolvidos utilizando técnicas de controle clássico e lógica *fuzzy* com o foco de simplificar a implementação do controle de estabilidade do quadrotor.

O Capítulo 2 apresenta a fundamentação teórica necessária para a compreensão da lógica *fuzzy*, controladores *fuzzy* e a metodologia de controle proposta nesta dissertação.

O Capítulo 3 é dedicado à arquitetura do sistema desenvolvido, os componentes necessários para a elaboração de protótipo a ser utilizado nos testes experimentais, especificando e executando os testes nos componentes do sistema. Neste capítulo é também abordado o controlador *fuzzy* proposto definindo o comportamento do controlador assim como as estratégias para definir a base de regras utilizadas.

O Capítulo 4 contém os resultados experimentais do protótipo desenvolvido apresentando o comportamento da estabilidade do sistema, testes com a sintonia do controlador sendo efetuado um comparativo dos resultados.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão do trabalho desenvolvido ao decorrer de todos os capítulos apresentados e sugerindo futuros trabalhos a serem desenvolvidos com base na plataforma desenvolvida. A parte final desta dissertação apresenta o anexo contendo o programa desenvolvido na plataforma Arduino.

1.2 Quadrotor

O quadrotor é um VANT de asa rotativa composto de quatro rotores localizados nas extremidades de uma estrutura cruzada. O voo do quadrotor pode ser controlado alterando a velocidade de cada rotor gerando a propulsão necessária para efetuar o controle de movimentação vertical e horizontal, podendo ser utilizado rotores a jato, turbinas movidas a combustão, motores de corrente contínua sem escova, em inglês *brushless direct current* (BLDC), dentre outros meios de propulsão.

Os protótipos de quadrotores movidos a eletricidade descritos na literatura utilizaram motores de corrente contínua sem escova em conjunto com o controlador de velocidade eletrônico que tem

por função variar a rotação do motor através do sinal de controle por largura de pulso, do inglês *Pulse With Modulation, PWM*. A alimentação do sistema provem do uso de baterias elétricas de lítio que proporciona alta capacidade de escoamento do fluxo de corrente elétrica fazendo com que o motor possa atingir a potência máxima nominal.

O centro da estrutura física contém os sistemas necessários para o seu funcionamento, o sistema de comunicação: utilizando radiotransmissores, redes de sensores sem fio capaz de receber e enviar dados para uma central de controle. Sistema de sensoriamento captando informações de localização através do posicionamento geostacionário do quadrotor utilizando um modulo GPS, câmeras para geração de fotos e filmes, unidade móvel inercial que informa os dados da posição e movimentação necessários para o controle de altitude e direção, a disposição dos sistemas é apresentado na Figura 3, dependendo da missão pode ser agregado sensores de temperatura, humidade, pressão dentre outros. Sistema de controle é capaz de processar os dados recebidos pelos sistemas controlando os atuadores e motores.



Figura 3- Hexacoptero e seus sistemas

O controle de vôo dos quadrotores pode ser feito de forma autônoma, sendo necessário que o operador indique as trajetórias e ações da aeronave através de uma estação de controle como apresentado na Figura 4 ou com o uso de algoritmos sofisticados que atuam no controle e missão do veículo. Semiautônoma permitindo que o operador com menos experiência controle a aeronave sendo supervisionado por um sistema em paralelo que assegure um voo estável. E por último o manuseio de forma totalmente manual, onde o piloto assegurar todas as manobras de controle da aeronave.



Figura 4- Estação de Controle do VANT Hermes da Força Aérea Brasileira. Fonte: Agência Força Aérea

As características que proporcionam uma clara vantagem do quadrotor sobre outros VANTs é a de conseguir pairar no ar conforme apresentado na Figura 5, denominado em inglês de Vertical Off and Landing - VTOL, bem como sua capacidade de fazer pequenos movimentos precisos. Há também vantagens ao se utilizar um sistema de propulsão de quatro rotores, como uma maior capacidade de carga útil, capacidade de manobra, em particular na travessia através de um ambiente com muitos obstáculos, ou pouso em pequenas áreas (Agostino S. et all, 1998).



Figura 5- VANT Asa Rotativa pairando no ar. Fonte: <http://avairfilms.com.br>

O sentido de rotação dos motores pode ser visualizado na Figura 6 onde o motor frontal (M_f) e o motor traseiro (M_b) rodam no sentido anti-horário e os motores da esquerda (M_l) e direita (M_r) rodam no sentido horário. O fato de existir um par de motores rodando num sentido e outro par rodando no outro sentido permite controlar os movimentos nos três eixos do quadrotor.

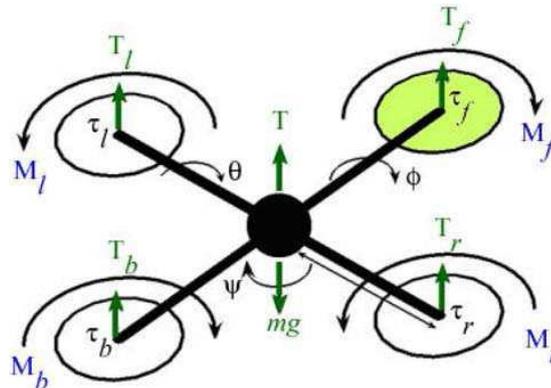


Figura 6 - Conceito do diagrama do quadrotor.

Desta maneira podemos afirmar que o controle da aeronave está diretamente ligado ao controle de velocidade de cada um dos motores, a combinação das forças geradas por cada motor proporcionam a altitude e a rotação nos eixos de rolagem através dos ângulos de Euler, roll (ϕ), pitch (θ), e yaw (ψ).

1.3 Dinâmica do quadrotor

O quadrotor pode ser descrito através de Equações matemáticas que descrevem o seu funcionamento em relação a sua movimentação e estabilidade, nesta seção e apresentada a modelagem matemática (S. Bouabdallah, 2007), com o objetivo de analisar o comportamento da planta a ser controlada.

As Equações 1 e 2 descrevem o comportamento dinâmico do quadrotor. Neste modelo é possível executar simulações computacionais e análises detalhadas propondo métodos de controle de suas variáveis, assim como analisar o comportamento da planta a ser controlada. O modelo inclui a resultante dos efeitos giroscópios da rotação do corpo rígido no espaço e a rotação dos quatro propulsores. Além disso, pode ressaltar que o modelo apresenta um comportamento não linear (S. Bouabdallah, 2007).

A tabela 1 apresenta os símbolos e suas definições para melhor compreensão do modelo dinâmico apresentado a seguir.

Tabela 1 - Símbolos e suas definições.

Símbolo	Definição	Símbolo	Definição
ϕ	Ângulo Roll	X	Posição X
q	Ângulo Pitch	Y	Posição Y
ψ	Ângulo Yaw	Z	Posição Z
I_x, I_y, I_z	Inercias do Corpo	d	Fator de Arrasto
J_r	Inercia Rotacional	m	Massa do Corpo

W_i	Velocidade do rotor	l	Comprimento
b	Fator de Rotação	u_1, u_2, u_3	Sinais de Controle

$$\left\{ \begin{array}{l} \ddot{\phi} = \dot{\theta} \cdot \dot{\psi} \frac{I_y - I_z}{I_x} - \frac{J_r}{I_x} \cdot \dot{\theta} \cdot \Omega + \frac{l}{I_x} \cdot u_2 \\ \ddot{\theta} = \dot{\phi} \cdot \dot{\psi} \frac{I_z - I_x}{I_y} + \frac{J_r}{I_y} \cdot \dot{\theta} \cdot \Omega + \frac{l}{I_y} \cdot u_3 \\ \ddot{\psi} = \dot{\phi} \cdot \dot{\theta} \frac{I_x - I_y}{I_z} + \frac{1}{I_z} \cdot u_4 \\ \ddot{x} = (\cos\phi \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi + \sin\phi \cdot \sin\psi) \cdot \frac{1}{m} \cdot u_1 \\ \ddot{y} = (\cos\phi \cdot \sin\theta \cdot \cos\psi - \sin\phi \cdot \cos\psi) \cdot \frac{1}{m} \cdot u_1 \\ \ddot{z} = -g + (\cos\phi \cdot \cos\theta) \frac{1}{m} \cdot u_1 \end{array} \right. \quad (1)$$

A entrada u representa o sinal de controle que deve ser aplicado ao sistema, conforme apresentado na Equação 2:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_1 = b \cdot (\Omega_f^2 + \Omega_b^2 + \Omega_l^2 + \Omega_r^2) \\ u_2 = b \cdot (\Omega_r^2 - \Omega_l^2) \\ u_3 = b \cdot (\Omega_f^2 - \Omega_b^2) \\ u_4 = b \cdot (\Omega_b^2 + \Omega_r^2 - \Omega_l^2 - \Omega_f^2) \\ \Omega_i = \Omega_f + \Omega_b - \Omega_l - \Omega_r \end{array} \right. \quad (2)$$

O sinal de controle u_1 é responsável pela decolagem e aterrissagem do quadrotor. Já o sinal de controle u_2 e u_3 são responsáveis pelo movimento de rolagem e arfagem, respectivamente. E o sinal de controle u_4 é responsável pelo movimento de guinada. Percebe-se que todos os sinais de controle dependem diretamente da velocidade dos motores, Ω_i . As variáveis b e d representam o fator de rotação dos motores e o fator de arrasto respectivamente, podem ser definidas através da análise do comportamento dos motores.

Os sinais de controle representam as forças de elevação aerodinâmica gerada por cada rotor, onde a força gravitacional age de forma contrária ao total de forças de elevação. A combinação das forças geradas por cada um dos motores geram faz com que o quadrotor efetue os movimentos de rolagem, arfagem e guinada sendo representado na Figura 8. A força de atuação dos motores é apresentada seguindo a seguinte formatação: T_l – tração do motor esquerdo, T_r - tração do motor direito, T_f - tração do motor frontal, T_b – tração do motor traseiro.

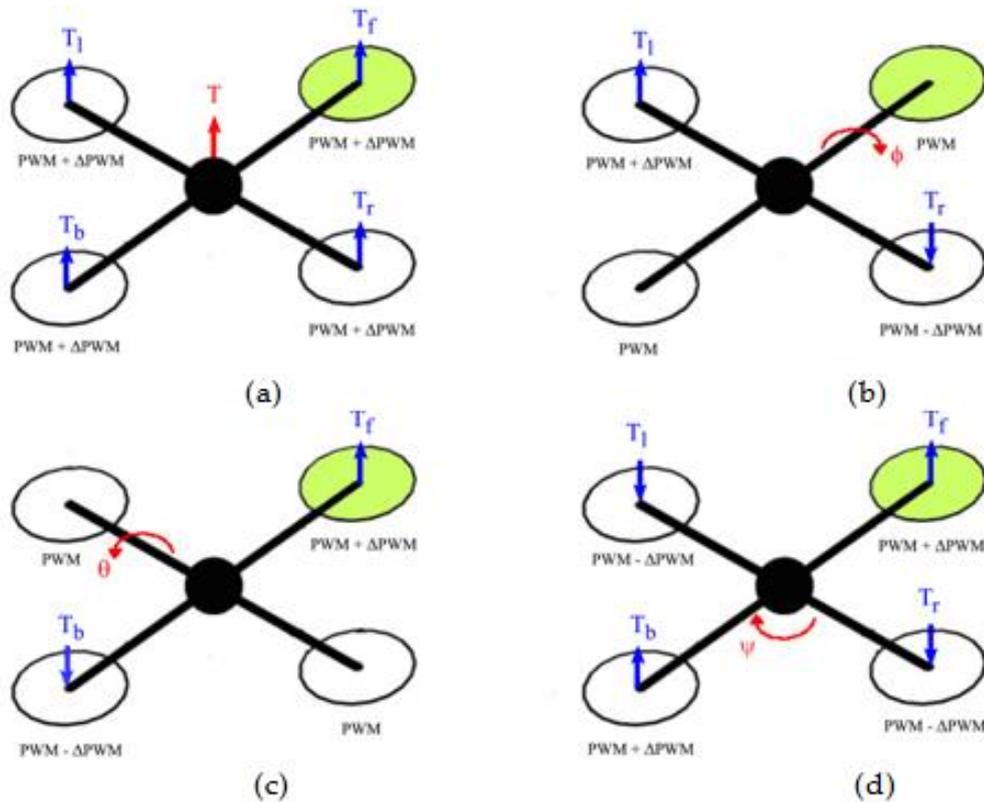


Figura 7- Controle vetorial de forças de deslocamento: (a) Altitude, (b) rolagem, (c) arfagem, (d) guinada.

O controle do sistema é feito baseado no modelo dinâmico apresentado na Equação 1, onde os ângulos rolagem, arfagem e guinada são responsáveis pela estabilidade do sistema e as posições X, Y e Z definem a sua posição.

Altitude (U_1 [N])

A Altitude é a manipulação intencional e controlada das forças exteriores utilizando os motores do veículo para estabelecer uma atitude desejada. Para garantir que o quadrotor tenha um movimento vertical ascendente em relação à superfície terrestre basta garantir que o somatório das forças produzidas pelos quatro propulsores seja superior ao peso P [N] da aeronave.

No caso do movimento vertical descendente basta garantir que o somatório das forças produzidas pelos quatro propulsores seja inferior ao peso da aeronave ocorrendo assim o controle da altitude do veículo conforme Figura 7.a . Portanto o controle deve seguir as seguintes condições:

$$u_1 = T_f + T_b + T_l + T_r \quad (3)$$

Condição para uma aceleração positiva (Subida): $P < U_1$

Condição para uma aceleração negativa (Descida): $P > U_1$

As forças exercidas pelos motores devem ser iguais para que o veículo possa efetuar a subida e descida de forma estável. A ação dos motores ocorre alterando a velocidade de subida ou descida da aeronave através de incrementos $\Delta\Omega$ [rad./s] com valores positivos ou negativos aplicados a velocidade dos quatro motores. O controle da velocidade dos motores é feito através de um sinal enviado ao controlador de velocidade eletrônico conhecido como modulação por largura de pulso Δ PWM. A movimentação do veículo para decolagem e aterrissagem deve ser feita através da adição de um valor de PWM, onde para testes em laboratório deve ser utilizado valores fixos de referência para análise de comportamento do controlador.

Ângulo de Rolagem (U2 [N m])

O ângulo de rolagem descreve a movimentação do veículo em relação ao eixo X, em inglês é denominado de ângulo roll, permitindo que o quadrotor rode em torno desse mesmo eixo. Os motores da esquerda e direita devem ser acionados para que ocorra esta movimentação, a Equação 4 representa as forças de atuação do sinal de controle u_2 .

$$u_2 = T_l - T_r \quad (4)$$

Ao aumentar a velocidade no motor da esquerda e diminuir no motor da direita cria-se um movimento positivo. Uma diminuição da velocidade no propulsor da esquerda e o respectivo aumento no propulsor da direita cria um movimento negativo conforme Figura 7.b.

Ângulo de Arfagem (U3 [N m])

O ângulo de arfagem descreve a movimentação do veículo em relação ao eixo Y, em inglês é denominado de ângulo pitch, permitindo que o quadrotor rode em torno desse mesmo eixo. Os motores frontal e traseiro devem ser acionados para que ocorra esta movimentação, a Equação 5 representa as forças de atuação do sinal de controle u_3 .

$$u_3 = T_f - T_b \quad (5)$$

Ao aumentar a velocidade no motor frontal e a diminuição no motor traseiro faz o quadrotor executar um movimento positivo. A diminuição da velocidade no motor frontal e o respectivo aumento no motor traseiro cria um movimento negativo conforme Figura 7.c.

A rotação em torno do eixo Y se dá pela alteração das ações nos motores frontal e traseiro e nenhuma alteração nos motores da esquerda e direita, conforme o sinal de controle u_3 apresentado no modelo dinâmico.

Ângulo de Guinada (U4 [N.m])

O ângulo de guinada descreve a rotação do veículo em torno do seu eixo onde os quatro motores devem ser acionados gerando uma combinação de forças que efetuam o movimento de

rotação e translação, em inglês é conhecido como ângulo yaw. Ao aumentar as velocidades dos motores frontal e traseiro e diminuindo a velocidade dos motores da esquerda e direita, conforme Figura 7.d, cria-se um movimento negativo ocorrendo uma movimentação no sentido horário.

A diminuição da velocidade nos motores frontal e traseiro e um respectivo aumento nos motores da esquerda e direita resulta na criação do movimento positivo no sentido anti-horário.

$$u_4 = -T_f + T_l - T_b + T_r \quad (6)$$

1.4 Motivações

O controle do quadrotor é um desafio, pois é necessário definir as características mecânicas e o modelo dinâmico, além do seu comportamento ser não linear, o controle do sistema ser multivariável.

Os controladores fuzzy podem apresentar um desempenho com melhor robustez em comparação aos controladores PID, pois devido à sua natureza não-linear tem a capacidade para incursões em faixas mais amplas que o PID, que apresenta desempenho satisfatório somente em torno da região de sintonia. Outro aspecto referenciado é o fato dos controladores nebulosos poderem ser mais facilmente personalizados, haja vista a maior facilidade no entendimento e modificação de suas regras, que não somente replicam as estratégias do operador humano, mas que, adicionalmente, são expressas em termos linguísticos utilizados na linguagem natural cotidiana (Daugherty e Rataarishnam, 1992).

No campo das tecnologias de sensoriamento, as indústrias atualmente podem fornecer uma nova geração de micro Unidade de Medição Inercial (UMI) ou do inglês Inertial Measurement Unit (IMU), integrado em um único chip, o uso de IMUs de baixo custo é sinônimo de processamento de dados menos eficiente, e portanto, uma previsão de dados de orientação de precisão razoável e baixa confiabilidade faz com que o sistema de controle seja uma meta desafiadora (Bouabdallah S., 2007).

1.5 Objetivo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um controlador fuzzy capaz de estabilizar o sistema do quadrotor dispensando a necessidade de ter um modelo dinâmico, utilizando a menor quantidade de regras com o intuito de viabilizar a implementação do controlador em sistemas embarcados de baixa capacidade computacional.

1.5.1 Objetivos Específicos

- Identificação de um modelo associado à dinâmica do sistema.
- Desenvolver a plataforma de testes utilizando componentes de baixo custo.
- Desenvolver de forma simulada a planta e o controlador fuzzy proposto.
- Desenvolver e Implementar a lógica *fuzzy* no sistema embarcado.
- Executar testes práticos ajustando as funções de pertinência do controlador.
- Executar testes práticos com o uso de hélices de duas e três pás.
- Executar testes práticos do comportamento do controlador com o uso de 8 e 12 bits de resolução do sinal de controle dos motores.
- Executar testes práticos na plataforma de testes identificando o comportamento do sistema controlado mediante ao acréscimo de perturbações.

1.6 Revisão da Literatura

O quadrotor é objeto de estudo nos centros de pesquisa, universidades e empresas que buscam desenvolver aplicações que possam trazer maior segurança e conforto nas ações onde haja perigo ao ser humano, o estudo de VANT's vem crescendo bastante em diversas áreas como no reconhecimento de imagens, estrutura mecânica, unidades de movimento inercial, motores de corrente contínua de alta velocidade, definição de trajetórias, controle. O controle deste veículo é bastante conhecido na academia, onde muitos trabalhos foram realizados de forma simulada e prática testando o comportamento do sistema mediante a influência de ruídos e perturbações. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um controlador do tipo fuzzy aplicado a quadrotores de forma prática com o uso de uma plataforma de testes, com isso foram feitos estudos na literatura de trabalhos de controladores clássicos e fuzzy aplicados a quadrotores implementados em plataforma de testes, dentre estes trabalhos estudados destacam-se:

O trabalho desenvolvido por (S. Costa, 2010), intitulado de Desenvolvimento de um Veículo aéreo de quatro rotores, descreve o desenvolvimento de um VANT do tipo quadrotor sendo elaborado o controle do sistema de duas diferentes formas: utilizando um controlador do tipo *fuzzy* Proporcional Derivativo denominado de *Fuzzy* PD e um controlador clássico do tipo Proporcional Integrador Derivativo (PID). O controlador Fuzzy PD não apresentou melhor performance em relação ao controlador PID em virtude de um erro estacionário gerado por ruídos e perturbações na leitura dos ângulos. Demonstrando também que o ângulo de atitude roll apresenta variações de aproximadamente 20 graus em toda a faixa de atuação apresentando instabilidade no sistema. A maior dificuldade encontrada na implementação do controlador Fuzzy PD foi na definição das funções de pertinência, neste trabalho foram utilizadas cinco funções de pertinência sendo

necessário um total de vinte e cinco regras de controle, a resolução do sinal de controle dos motores utilizado neste trabalho foi de 8 bits não sendo realizados testes com outras resoluções.

O artigo de (S. Zangenehpour et al., 2010) denominado Controle de um grau de liberdade utilizando controlador *fuzzy*, o autor desenvolveu o controle de um grau de liberdade aplicado ao braço de um quadrotor utilizando o sistema inteligente Fuzz tendo como entradas do sistema o ângulo medido pelo sensor e a velocidade angular do giroscópio, utilizando também cinco funções de pertinência e vinte e cinco regras. A saída do sistema é aplicado diretamente no motor BLDC, que responde através da largura de pulso do PWM, alterando assim a velocidade.

Os resultados apresentados neste artigo de (S. Zangenehpour et al., 2010) pelo sensor giroscópio demonstram uma limitação de precisão pois foi identificada a existência de acúmulo de erros na quantização de dados proposta, além da presença de ruído branco e outras interferências sendo necessário passar por uma fusão linear reduzindo assim efeitos indesejáveis e também por uma combinação de filtros do tipo média aritmética para que os dados pudessem ser lidos adequadamente. Os testes práticos foram executados com o software MATLAB e uma plataforma de testes com um único motor. Foi relatado a limitação física do sistema proposto pois, a resolução do sinal de controle dos motores é de 8 bits ficando assim como uma proposta para trabalhos futuros a implementação em uma estrutura física que suporte uma resolução maior.

Os resultados práticos demonstram que o tempo de estabilização é de aproximadamente 2,8 segundos para uma perturbação superior a 20 graus. O controlador apresentou uma lenta atuação a perturbações, apresentando também um erro de regime permanente de aproximadamente 5 graus, este erro é considerado satisfatório. Esta metodologia apresenta a possibilidade de implementar o controlador *fuzzy* sem o uso dos ganhos Proporcional e Derivativo.

O artigo de (M. Santos, 2010) denominado controle *fuzzy* inteligente de um quadrotor descreve o uso de quatro controladores que necessitaram passar por um bloco chamado de agregação onde efetuavam as compensações necessárias para o ajuste de potência aplicada em cada motor, utilizando a combinação dos graus de liberdade proveniente dos sensores.

Os resultados simulados do ângulo de atitude roll tendo como referência a estabilidade no ângulo 0 graus, indicam uma faixa de oscilação entre 0° e -28° graus com uma sobre elevação de -40° por um período de 0.8 segundos levando o tempo de acomodação de 2.3 segundos para a estabilização completa do sistema. Esta metodologia não foi implementada em uma plataforma de testes real e demonstra que o uso de funções de pertinência somente de formato trapezoidais podem não apresentar resultados satisfatórios na ocorrência de perturbações.

O trabalho de (Syed Ali Raza et al., 2010) publicado no livro Motion Control onde o capítulo 12, intitulado de Controle de voo inteligente de quadrotores autônomos, composto por vários artigos

da área apresenta o desenvolvimento do controle de estabilidade utilizando cinco controladores *fuzzy* com um bloco de pós-processamento, implementação de ganhos proporcionais para ajuste do sinal de controle dos motores.

Os sinais de controle dos motores é saturado para o maior valor de potência do motor. O controlador utiliza somente três funções de pertinência sendo necessário somente nove regras para efetuar o controle do sistema.

Os experimentos foram feitos em ambiente simulado e em uma estrutura de testes real apresentando resultados satisfatórios com um erro de regime permanente entre -6 e 12 graus para o angulo roll. O controlador demonstrou uma rápida atuação a perturbações mas com um tempo de estabilização após uma perturbação de aproximadamente 8 segundos. O erro de regime permanente é maior em comparação com o artigo de (S. Zangenehpour et al., 2008) demonstrando que existe uma grande influência das funções de pertinência no comportamento dos controladores do sistema. A estrutura de testes real não informa a resolução do sinal de controle dos motores, sendo que o controlador utilizado dispõe 8 bits de resolução nativa.

O trabalho feito por (Bouabdallah et al., 2007) em seu doutorado demonstra o uso de controladores do tipo PID, LQR otimizado e Backstepping demonstrando a eficácia destes métodos no controle do sistema, apresentando dificuldades na execução de testes práticos mediante ao uso de sensores de baixo custo e de baixa confiabilidade.

Os artigos apresentados utilizam o quadrotor com a abordagem de controle inteligente utilizando *fuzzy*, a grande maioria utiliza os simuladores computacionais para validar sua proposta de controle demonstrando dificuldades na implementação em plataforma de teste real, na definição das funções de pertinência e na quantidade que deve ser utilizada para obter um resultado satisfatório, demonstrando assim uma vasta possibilidade de pesquisas a serem realizadas no futuro.

Os ajustes e definições das características do controlador *fuzzy* foram feitos por (Weon e Kim,2001), (Bai e Chen, 2008b), (J. Netto,2005) em seu trabalhos descrevendo metodologias de ajustes das funções de pertinência, apresentando formas de definir os ajustes e a quantidade de regras necessárias que devem ser utilizadas no controlador *fuzzy* em busca de definir o método de ajuste do controlador *fuzzy*.

Esta dissertação apresenta uma metodologia de controle nebuloso aplicado a veículos aéreos não tripulados de quatro motores simplificando a quantidade de controladores utilizados para estabilizar o sistema com o uso da menor quantidade de regras de controle utilizando a definição e ajuste das funções de pertinência baseado em análise da função de transferência do quadrotor.

CAPITULO 2

FUNDAMENTOS DA LÓGICA FUZZY

A Lógica *fuzzy* foi primeiramente introduzida em 1930 pelo filósofo e lógico polonês Jan Lukasiewicz que estudou o conceito de ausência de certezas absolutas, quando utilizamos conceitos subjetivos para classificar ou considerar certas situações que remetem a respostas vagas como na frase a seguir: embora o transformador esteja um pouco carregado, pode-se utilizá-lo por um tempo. Nesta frase existem dois termos que expressam ausência de certezas, *um pouco* e *um tempo*, que são termos bastante subjetivos e difíceis de quantificar, mas para uma conversa entre especialistas o entendimento desta frase seria considerado normal sabendo que estes compreendem bem funcionamento do sistema. Dessa forma, uma maneira de tentar solucionar o processo de representação de conhecimento impreciso com o uso da lógica *fuzzy*. (Marro et al.,2010)

Através do estudo de termos linguísticos do tipo alto, baixo, velho e novo Jan Lukasiewicz propôs a utilização de um intervalo de valores entre 0 e 1 indicando o grau de possibilidade que uma declaração seja verdadeira ou falsa. Em 1937, o filósofo Max Black propôs a ideia classificação em graus, a teoria de conjuntos fuzzy e suas operações básicas. Em 1965, Lofti Zadeh publicou o artigo Fuzzy Sets, que ficou conhecido como a origem da lógica *fuzzy* apresentando a ideia de fuzzificação. Zadeh ficou e ainda é conhecido como o “mestre” da lógica *fuzzy*.

O conceito Lógica *fuzzy* pode ser entendido como uma situação onde não podemos responder as proposições únicas "Verdadeiro" ou "Falso" que descrevem a lógica binária. As proposições podem ter valores intermediários entre "Verdadeiro" e "Falso" podendo assumir qualquer valor entre 0 (absolutamente falso) e 1(absolutamente verdadeiro) onde as sentenças passam a ter um grau de pertinência entre 0 e 1. A possibilidade de se fazer afirmações como meio cheio e meio vazio buscam quantificar valores aproximados de forma linguística o que originou a criação das chamadas *variáveis linguísticas* que diferem da lógica tradicional, para a lógica *fuzzy* são de extrema relevância pois possibilitam captar o grau de incerteza presente nessas variáveis e traduzir para um modelamento matemático. Por exemplo:

Pedro é alto.

A variável Pedro está recebendo o valor alto, que é um dos conjuntos *fuzzy* definidos para esta variável. O uso de advérbios como muito, pouco, extremamente, quase, mais ou menos, entre outros podem ser utilizados nas variáveis linguísticas tendo por função alterar a intensidade dos valores *fuzzy* modificando a forma dos conjuntos e possibilitando aumentar a quantidade de conjuntos em um definido universo de discurso.

2.1 Conjuntos Fuzzy

Na teoria clássica, os conjuntos são denominados *crisp* e podem ter relação entre conjuntos *crisp* apresentando presença ou ausência de associação, interação ou interconexão entre os elementos de dois ou mais conjuntos. Este conceito pode ser generalizado para permitir vários graus ou valores de relação entre os elementos dos conjuntos. Na teoria dos conjuntos *fuzzy* existe um grau de pertinência para cada elemento de um determinado conjunto. Por exemplo considere os conjuntos abaixo:

- Conjunto das pessoas pertencentes a classe média.
- Conjunto das pessoas com emprego.

Podemos verificar que não existe uma fronteira bem definida para decidirmos quando um elemento pertence ou não ao respectivo conjunto nos exemplos apresentados acima. Com os conjuntos *fuzzy* podemos definir critérios e graus de pertinência para tais situações. Tal função que descreve o comportamento do elemento de um *crisp* é chamada de *função de pertinência*.

2.2 Função de Pertinência

A *função de pertinência* consegue quantificar valores numéricos utilizando o conceito de mapeamento matemático, fazendo com que as incertezas sejam consideradas ao efetuar aproximações e cálculos que levem a uma conclusão válida. O tipo de função depende exclusivamente do problema a ser modelado e também da capacidade computacional do sistema pois quanto maior a quantidade de funções mais poder computacional deve ser utilizado. Um exemplo para definição de massa é apresentado a seguir:

Graus de Pertinência	pesado			médio			leve		
	x=100	x=150	x=200	x=120	x=80	x=60	x=60	x=50	x=40
u(x)	0	0.5	1	0	1	0	0	0.5	1

O grau de pertinência de cada conjunto é analisado em relação a massa em quilo, onde uma pessoa com a massa menor que 60 e maior que 40 pode ser considerada leve, assim como uma pessoa acima de 100 quilos participa do conjunto pesado.

As funções de pertinência podem ter várias formas diferentes, os tipos mais comuns utilizados são:

Função Triangular

A Equação 7 descreve a função triangular onde o ajuste desta função é feito através das variáveis x, a, b, c e sua função utilizada na ferramenta fuzzy do software MATLAB. A Figura 8 apresenta um exemplo da função indicando a sua faixa de atuação em relação ao grau de pertinência. Utilizando a expressão \min e \max temos uma alternativa de apresentar a expressão.

$$\text{trimf}(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}, 0\right)\right) \quad (7)$$

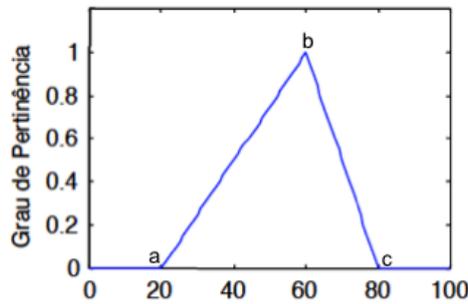


Figura 8 - Função de pertinência do tipo triangular.

Os parâmetros $\{a,b,c\}$ (com $a < b < c$) determinam as coordenadas dos três cantos da função triangular, onde a indica o canto esquerdo, b indica o centro, c indica o canto direito do triangulo.

Função Trapezoidal

A Equação 8 descreve a função triangular onde o ajuste desta função é feito através das variáveis x,a,b,c e sua função utilizada na ferramenta fuzzy do software MATLAB. A Figura 9 apresenta um exemplo da função indicando a sua faixa de atuação em relação ao grau de pertinência.

$$\text{trapez}(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}, 0\right)\right) \quad (8)$$

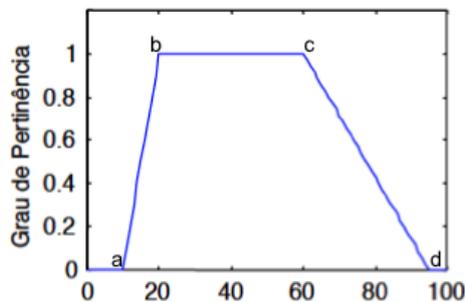


Figura 9 - Função Trapezoidal.

Os parâmetros $\{a,b,c,d\}$ (com $a < b < c < d$) determina as coordenadas dos cantos de um trapézio.

Função Gaussiana

A Equação 9 descreve a função triangular onde o ajuste desta função é feito através das variáveis x,a,b,c e sua função utilizada na ferramenta fuzzy do software MATLAB. A Figura 10 apresenta um exemplo da função indicando a sua faixa de atuação em relação ao grau de pertinência.

$$gaussmf(x; c) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (9)$$

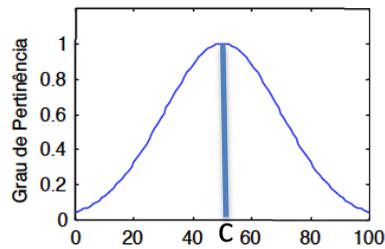


Figura 10 - Função Gaussiana.

A função gaussiana pode ser determinada completamente pela variável c e σ , onde c representa o centro da função e σ determina a largura.

Função Sino Generalizada

A Equação 10 descreve a função triangular onde o ajuste desta função é feito através das variáveis x, a, b, c e sua função utilizada na ferramenta fuzzy do software MATLAB. A Figura 11 apresenta um exemplo da função indicando a sua faixa de atuação em relação ao grau de pertinência.

$$ggbellmf(x; b, c) = \frac{1}{1 + \left|\frac{x-c}{b}\right|^{2b}} \quad (10)$$

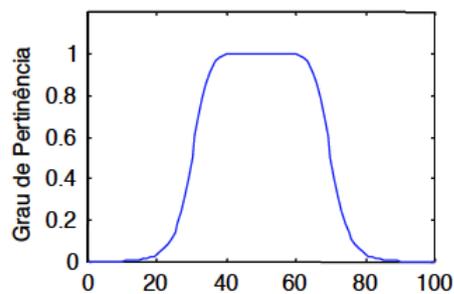


Figura 11 - Função Sino Generalizada.

A função é generalizada por ter uma distribuição maior dos seus valores sendo baseada na teoria da probabilidade. A função sino Generalizada tem mais parâmetros de ajustes do que a função gaussiana possibilitando maior grau de liberdade para definir o formato desta função.

A forma de representar os graus de participação de cada afirmação é conhecido como função de pertinência, onde pode ser observado na Figura 12 os conjuntos *Negativo*, *Zero* e *Positivo* com o formato de uma função do tipo triangular e trapezoidal. Como exemplo, a Figura 12 apresenta três afirmações *Negativo*, *Zero* e *Positivo* que representam os valores numéricos de um

determinado ângulo e indicando o grau de pertinência através de um intervalo que varia entre 0 e 1. A afirmação Zero com um grau de pertinência em 1 indica que o ângulo está no valor numérico 0 e que as afirmações Negativo e Positivo recebem o grau de pertinência 0, desta forma podemos afirmar que o ângulo pertence a afirmação Zero e não pertence as afirmações Negativo e Positivo descrevendo assim o conjunto *fuzzy*.

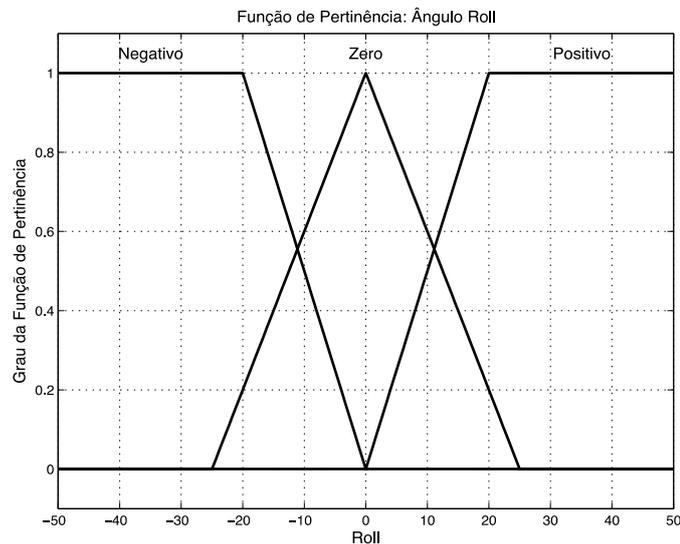


Figura 12 - Função de Pertinência.

A lógica *fuzzy* pode representar uma faixa de valores numéricos utilizando os graus de pertinência. Para melhor esclarecimento suponhamos um valor de $x=0$ graus aplicado na função de pertinência da Figura 12, pode ser observado que a faixa de valores para função de pertinência Zero é entre -25 e 25 graus sendo o conjunto em que se encontra o valor de x . O grau de pertinência para o valor de $x=0$ tem participação direta no conjunto Zero apresentando o grau de pertinência 1, os outros conjuntos apresentam grau de pertinência 0. Considerando um conjunto Zero e um elemento x com relação a esse conjunto, nós temos:

$$f(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in \text{Zero} \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin \text{Zero} \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & \text{se, e somente se, } x \in \text{Zero} \\ 0 & \text{se, e somente se, } x \notin \text{Zero} \\ 0 \leq \mu(x) \leq 1 & \text{se } x \text{ pertence parcialmente a Zero} \end{cases} \quad (12)$$

Dessa forma, a lógica *fuzzy* pode ser considerada como um conjunto de princípios matemáticos para a representação do conhecimento baseado no grau de pertinência dos termos, considerado graus de verdade. Como pode ser observado nas expressões 11 e 12, o intervalo de pertinência é $[0,1]$, onde 0 significa que um elemento não pertence a um determinado conjunto, 1 significa completa pertinência ao conjunto, e valores entre 0 e 1 representam graus parciais de pertinências. Assim, na Lógica *Fuzzy*, um elemento pertence a um conjunto com um certo grau de pertinência, fazendo com que uma determinada

sentença possa ser *parcialmente verdadeira* e *parcialmente falsa*. Além do mais, um mesmo elemento pode ter graus de pertinências diferentes de 0 para mais de um conjunto *fuzzy*.

2.3 Operações e propriedades dos conjuntos fuzzy

Os conjuntos *fuzzy* obedecem a certas propriedades e operações baseadas na teoria clássica efetuando cálculos com operadores lógicos do tipo AND, OR e NOT através de testes identificando se o elemento pertence ou não a um conjunto. As operações básicas dos conjuntos *fuzzy*, definidas por Zadeh em um dado universo $U[x]$.

Dados os seguintes conjuntos *fuzzy*:

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

$$B = \{(x, \mu_B(x))/x \in U\}, \mu_B(x) \in [0,1]$$

Temos as seguintes operações básicas:

Igualdade: $A = B \leftrightarrow (\mu_A(x) = \mu_B(x)), \forall x \in U$

Inclusão: $A \subseteq B \leftrightarrow (\mu_A(x) \leq \mu_B(x)), \forall x \in U$

União: $A \text{ OR } B = A \cup B \leftrightarrow \{(x, \max(\mu_A(x); \mu_B(x)))/x \in U\}$

Interseção: $A \text{ AND } B = A \cap B \leftrightarrow \{(x, \min(\mu_A(x); \mu_B(x)))/x \in U\}$

Complemento: $\text{NOT } A = \sim A = \{(x, \mu_{\sim A}(x))/x \in U \text{ e } \mu_{\sim A}(x) = 1 - \mu_A(x)\}$

2.4 Regras Fuzzy

As regras são usadas para as expressões condicionais que englobam a lógica fuzzy, formadas por duas partes: antecedente e consequente.

Se x é igual a A , então y é B .

(antecedente) (consequente)

Exemplos de regras fuzzy utilizando expressões linguísticas *se* e *então* são utilizadas no nosso dia a dia, algumas delas são:

Se a pressão é alta, então o volume é baixo.

Se a velocidade é alta, então a ação do freio é pequena.

O Antecedente representa uma interpretação que retorna um número entre 0 e 1 da variável de entrada. O consequente é a designação de todo um conjunto *fuzzy* B para a variável de saída y. Para casos em que existem vários antecedentes, é preciso encontrar um grau de pertinência resultante de todos os dos antecedentes utilizando métodos de combinação do tipo máximo e mínimo das pertinências.

O número de regras que requer um controlador *fuzzy* é definido através da multiplicação dos números de conjuntos defunções de pertinência das variáveis de entrada. Deste modo, as regras conseguem cobrir todas as possíveis combinações das entradas. Por exemplo, para um sistema com duas variáveis de entrada, cada uma com 3 conjuntos *fuzzy*, existem 3x3 combinações possíveis de entrada por tanto 9 regras de controle.

2.5 Inferência fuzzy

A inferência fuzzy é um processo de raciocínio para estimar a saída em função da avaliação das entradas do sistema, através das regras previamente definidas e das entradas, utilizando a teoria de conjuntos fuzzy. Esse processo pode ser feito através de diferentes abordagens para o mecanismo de inferência, cuja escolha deve levar em consideração o tipo de problema a ser resolvido, buscando a melhor resposta do sistema. A figura 13 representa um sistema de inferência básico com saídas fuzzy e um bloco de defuzzificação que tem como proposito transformar a saída fuzzy em um valor numérico relacionando.

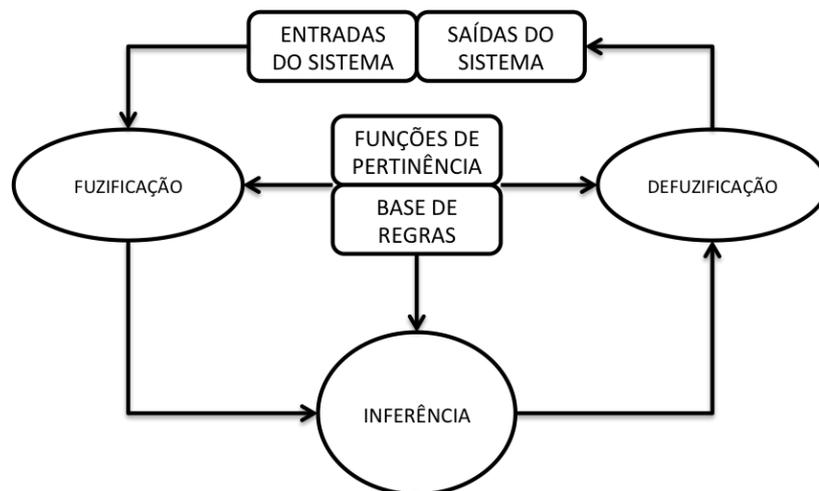


Figura 13 - Módulos do Sistema de Controle fuzzy

Existem vários métodos de inferência, neste trabalho é utilizado o método Mamdani por ser mais simples e eficaz na implementação do controlador *fuzzy*.

2.5.1 Inferência Mandami

O método de inferência Mandami foi criado pelo professor Ebrahim Mamdani da Universidade de Londres no Reino Unido em 1975 no contexto do desenvolvimento de sistemas fuzzy baseando-se em regras de conjuntos fuzzy no intuito de representar experiências da vida real. A construção deste método é feita em três partes: fuzzyficação, avaliação das regras fuzzy e defuzzyficação sendo apresentado em sequência.

2.6 Fuzzyficação

A fuzzyficação é a etapa responsável por obter o grau de pertinência de cada entrada, pertence a cada conjunto *fuzzy*. A entrada é um valor numérico limitado pela faixa de atuação do controlador e a saída é um número entre 0 e 1. A figura 14 o grau de pertinência da entrada ângulo roll. O valor do ângulo $x=5.0$ graus apresenta o grau de pertinência no conjunto Zero com $\mu_A(x) = 0.8$ e $\mu_A(x) = 0.25$ no conjunto Positivo.

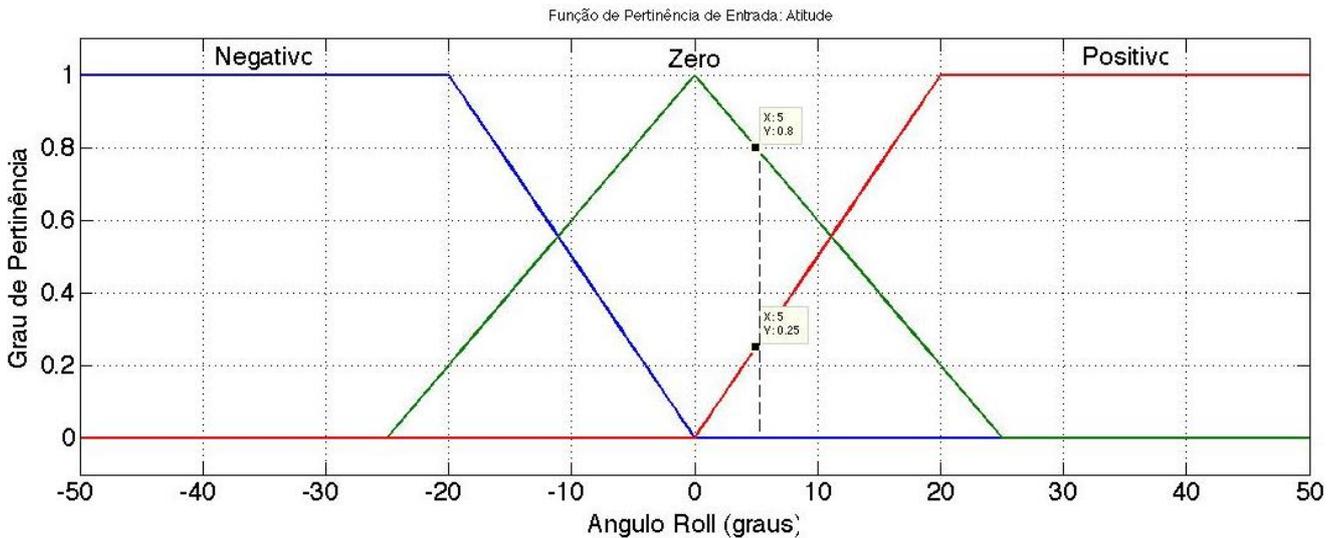


Figura 14 - Resultado da fuzzyficação

2.7 Avaliação das regras fuzzy

Os valores das entradas passaram pelo processo de fuzzificação classificando assim os antecedentes do sistema, sendo necessário criar uma base de regras para definir o consequente de cada antecessor.

Depois de obter as entradas fuzzyficadas é só aplicá-las nos antecedentes obtendo assim o valor do consequente para cada regra. O sistema fuzzy pode conter mais de uma entrada, sendo necessário a utilização dos operadores fuzzy para determinar um número que represente o resultado antecedente composto. Os operadores AND e OR são utilizados para obter um único resultado. O operador AND utiliza a operação de interseção sendo representado matematicamente pela função $min()$ ou $prod()$, e no caso do operador OR é utilizado a operação de união representado matematicamente pelas funções $max()$ ou $probor()$. Depois de obter um único valor para o antecedente é necessário obter o valor do consequente através de um método de correlação dos mesmos.

As regras podem ser criadas correlacionando as variáveis linguísticas com o grau de pertinência das entradas e definindo a saída. O exemplo a seguir utiliza as entradas como a

qualidade do serviço e comida de um restaurante, tendo como nota mínima 0 e máxima 10 e relacionando as duas variáveis com o valor da gorjeta na saída em reais ,com valor mínimo de 0 a 30 a ser dado ao garçom.

SE (serviço é ruim ou comida é péssima) *então* (gorjeta é baixa).

SE (serviço é bom) *então* (gorjeta é média).

SE (serviço é excelente ou comida é deliciosa) *então* (gorjeta é generosa).

Neste exemplo é apresentado 3 regras com duas entradas e uma saída, dado como exemplo que o serviço é 6 e a comida é 8 obtendo uma saída para cada combinação de entradas. Após a definição das regras é necessário efetuar a agregação de todas as saídas onde a combinação das saídas fuzzy são representadas por um único conjunto fuzzy onde pode ser utilizado os seguintes métodos $max()$, OR probabilístico ou Soma, a Figura 15 descreve o resultado da soma das saídas descritas no exemplo apresentado.

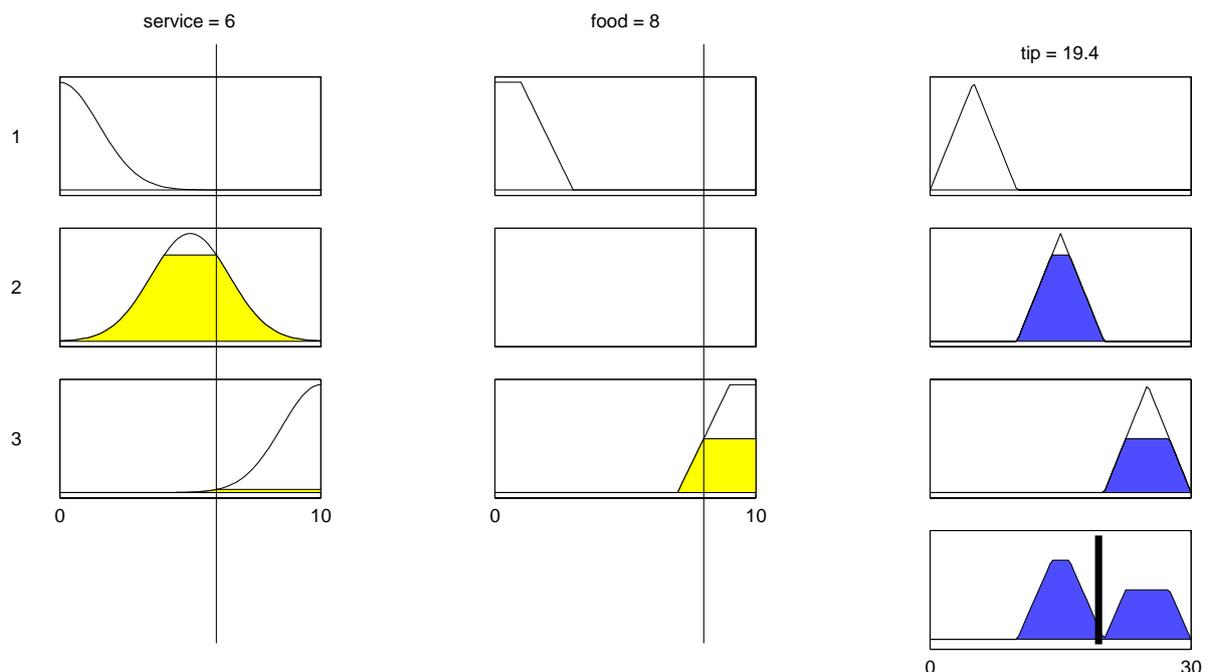


Figura 15 - Exemplo fuzzy Gorjeta do Garçom

2.8 Defuzzyficação

Para se obter uma saída numérica é necessário defuzzyficar a saída obtida na etapa anterior. O método de defuzzyficação mais comum é a técnica do centroide, que obtém o ponto onde uma linha vertical divide ao meio um conjunto agregado. A fórmula matemática que obtém esse ponto é

expressa na Equação 13. A precisão do método depende do intervalo escolhido, quanto maior mais impreciso, porém mais rápido de calcular.

$$\text{COG} = \frac{\int_a^b m(x) \times x}{\int_a^b m(x)} \quad (13)$$

Utilizando o exemplo anterior com o método centroide temos o valor da gorjeta em 19.4 reais, sendo representado o conjunto fuzzy na Figura 16.

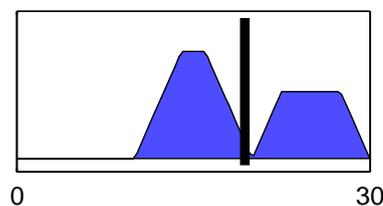


Figura 16 - Defuzzificação do tipo Centroide.

2.9 Controlador Lógico Fuzzy

O controle de equipamentos e processos industriais tornam-se cada vez mais complexos, não-lineares e com múltiplas variáveis a serem controladas, dificultando a identificação do modelo a ser controlado. Para resolver o problema da modelagem e identificação destes sistemas podem ser utilizados diversos tipos de métodos como, método dos mínimos quadrados, método de Levy, realocação de polos dentre outros. Pesquisas se direcionaram ao campo da inteligência computacional, procurando por métodos que permitissem implementar modelos alternativos aos métodos matemáticos convencionais e resolver algumas das dificuldades existentes, como a representação do conhecimento intuitivo e subjetivo para solucionar problemas complexos.

A lógica Fuzzy é uma destas técnicas classificadas como inteligentes que utiliza um método de modelagem que se baseiam no conhecimento do especialista que tem o raciocínio aproximado de como funciona o sistema. A construção do controlador lógico fuzzy é composta por quatro elementos, conforme apresentado em sequência. [M. Amendola et al.,2005]

Módulo de fuzzificação: Modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos *fuzzy* conhecidos como Funções de Pertinência. Nesta primeira etapa do sistema lógico *fuzzy*, o problema é analisado e os dados de entrada são transformados em variáveis linguísticas.

Módulo da base de regras: Constitui as regras utilizadas para definir a performance e comportamento do sistema, informando as variáveis de entrada e saída assim como as suas classificações linguísticas.

Módulo de inferência: Define quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação *fuzzy* que modela a base de regras utilizada. Os conectivos lógicos tem por função indicar a relação entre as variáveis com o objetivo de formar as regras da base de regras, por exemplo: O projeto A é *Muito Longo*, o risco do projeto é *Alto*. Projeto possui duas variáveis linguísticas com valores *Muito Longo* e *Alto* e pode-se inferir que se projeto é *Muito Longo* então o risco do projeto é *Alto*.

Módulo de defuzzificação: Converte a conclusão do modulo de inferência das variáveis de saída *fuzzy* para um valor numérico. Existem algumas diferentes técnicas de defuzzificação presentes nas literaturas, alguns dos métodos mais citados são:

Centroide: É o método onde a saída precisa a ser considerada, é o centro de gravidade do conjunto *fuzzy*.

Peso Máximo: É o método onde a saída precisa ser obtido tomando a média entre os dois elementos extremos no universo de discurso que correspondem aos maiores valores da função de pertinência do conjunto *fuzzy* de saída.

A implementação do controle utilizado nesta dissertação segue as seguintes características:

Módulo de inferência do tipo Mandami, três ou mais funções de Pertinência do tipo Triangulares e Trapezoidais. Regras Fuzzy seguindo a forma se (erro ângulo) e (erro giroscópio) então(PWMmotor_x) recebe defuzzificação. Método de defuzzificação do tipo Centro de Gravidade(Centroid) e Operadores e(AND) como mínimo.

CAPITULO 3

ARQUITETURA DO SISTEMA

O protótipo do VANT desenvolvido neste trabalho utiliza componentes de baixo custo e precisão assim como de baixa capacidade computacional fazendo com que seja necessário efetuar medições e levantamento das características físicas e elétricas que compõem a estrutura do quadrotor para que possa definir o comportamento real do sistema com o intuito de validar o controle de estabilidade a ser implementado.

A arquitetura da Aeronave é composta por diversos componentes que são capazes de efetuar interações entre si, sendo necessário a definição das tecnologias a serem utilizadas que permitam uma melhor eficiência e autonomia de voo do quadrotor assim como efetuar alterações de funcionalidade de forma flexível buscando executar testes do comportamento do controlador de estabilidade.

Um dos requisitos deste veículo é o peso devendo ter limite máximo *1Kg*. O peso do veículo deverá ser inferior à força máxima produzida pelo conjunto dos motores e propulsores, logo a escolha dos mesmos deverá satisfazer esta condição.

O tempo de vôo é outro requisito a ser considerado no desenvolvimento do veículo, para isso deve ser feito a escolha dos motores e bateria que apresentem uma eficiência elevada garantindo também energia suficiente para voos de até 8 minutos.

As partes que constituem o veículo utilizado nesta dissertação são:

- Estrutura mecânica.
- Controladores de velocidade.
- Motores e Hélices.
- Unidades de Processamento e Controle (*UPC*).
- Unidades de Comunicação.
- Unidade Móvel Inercial.
- Fonte de Energia.

Estas partes serão abordadas neste capítulo com o intuito de definir as características físicas e eletrônicas do quadrotor.

3.1 Estrutura mecânica

A estrutura mecânica é um subsistema importante, pois suporta todos os outros subsistemas desempenhando uma função importante na estabilidade do quadrotor. O quadrotor possui uma estrutura mecânica de simples construção em comparação com outras aeronaves, pois baseia-se numa estrutura cruzada onde no centro estão situados os equipamentos de medição, processamento e controle, comunicação, energia e nas extremidades situam-se os motores com suas respectivas hélices.

A estrutura mecânica deve ser rígida e simétrica, assim como ter o centro de massa localizado no centro da estrutura cruzada onde os materiais e subsistemas que compõem o quadrotor devem estar dispostos de forma a manter a sua estabilidade.

O modelo de estrutura mecânica utilizada no protótipo é X525 V3 que é produzido em alumínio anodizado e fibra de vidro com o diâmetro de 640 milímetros e peso aproximado de 450 gramas sendo composta por três componentes:

Base central: Centro da estrutura mecânica onde é acoplado os quatro braços do quarto e seus subsistemas.

Braço: Compõe as extremidades da estrutura onde são dispostos os motores.

Base do motor: Local de fixação dos motores garantindo a robustez do sistema e também o trem de pouso.

A estrutura física utiliza materiais extremamente leves buscando diminuir o peso total do veículo e conseqüentemente aumentando a autonomia da bateria e o tempo de voo, a Figura 17 mostra a estrutura física do protótipo em alumínio vazado.



Figura 17- Estrutura Física do quadrotor

3.2 Controle eletrônico de velocidade

O controle eletrônico de velocidade também conhecido como “ESC” que significa em inglês “Electronic Speed Control” é um componente que controla a velocidade de um motor eletrônico por

meio da modulação PWM, que tem por função controlar a disponibilidade de alimentação entregue a carga determinando assim a quantidade de energia que deve chegar ao motor.

O Controlador Eletrônico de velocidade, ESC, recebe os dados de PWM e controlar a atuação dos motores alimentando os polos na sequência correta para o seu devido funcionamento, o modelo escolhido para o protótipo é apresentado na Figura 18 onde este trabalha com uma frequência de 50Hz fazendo com que o sistema de controle deva ser executado em um período máximo de 20ms. Esta frequência de atualização dos motores é uma limitação física que pode prejudicar o comportamento do controle do sistema mediante a perturbações rápidas e bruscas fazendo com que os motores atuem no período determinado.



Figura 18- Controlador de velocidade

3.3 Motores e Hélices

A estrutura física do protótipo do quadrotor apresenta espaço reduzido necessitando de motores pequenos capazes de gerar o empuxo suficiente para a sua decolagem. Os motores do tipo corrente contínua sem escova também conhecidos como “BLDC” que significa em inglês Brushless Direct Current apresentam uma melhor resposta de velocidade por empuxo, menor ruído em funcionamento e maiores escalas de velocidade sem a necessidade de utilizar caixa de redução. Estes motores proporcionam uma baixa necessidade de manutenção em comparação com os convencionais motores DC.

Os motores do quadrotor são responsáveis pela movimentação do quadrotor, o motor utilizado foi de corrente contínua do tipo sem escova A2212/13T de 1100KV como pode ser visto na Figura 19, aplicado em aeromodelismo capaz de desenvolver o empuxo necessário para atuar no controle e estabilização. A velocidade alcançada por cada motor é proporcional a relação de 1100 rotações por minuto do motor com quantidade de tensão, Volt, disponível no motor.



Figura 19- A2212 1100KV, 12 polos e 20 Amperes.

Os motores trabalham com velocidade angular w_i geradas através de um sinal de controle por largura de pulso, PWM, onde podem produzir uma força vertical F_i de acordo com a Equação 7. A escolha dos motores utilizados na estrutura demonstram ter respostas de atuação diferentes sendo necessário executar experimentos com o intuito de validar a faixa de funcionamento dos motores. O método utilizado para efetuar a validação dos motores foi elaborado no trabalho elaborado por (S. Bouabdallah, 2007) onde foi desenvolvido a relação entre o Empuxo e o PWM utilizando o princípio da regressão linear.

$$F_i = k_F w_i^2 \quad (7)$$

Onde: F é a Força exercida por cada motor.

K_F é a constante de empuxo do motor.

W_i é a velocidade angular do motor.

A faixa de valores em segundos, que demonstram um comportamento linear a ser utilizado é entre $1000\mu s$ e $1680\mu s$, fazendo com que os atuadores sejam confiáveis nesta faixa de operação.

Os motores utilizados são idênticos mas possuem características mecânicas e elétricas sutilmente diferentes, sendo necessário fazer compensações através da leitura da rotação, em rotações por minuto – RPM, ajustando assim o offset de cada motor gerando a sincronização entre os motores.

A escolha das hélices é de fundamental importância para o melhor desempenho do motor pois a combinação motor e hélice gera o impulso necessário para a movimentação do quadrotor. O aumento do diâmetro da hélice proporciona uma força de impulso maior em baixas rotações mas como consequência vem a ocorrer um aumento do consumo de energia. A escolha do material da hélice também influencia no empuxo gerado além de apresentar possíveis ruídos de vibração, com isso a escolha da hélice deve ser feita em conjunto com as características do motor para evitar alterações de comportamento do sistema.

Nesta dissertação realizaram-se testes com dois tipos de materiais diferentes de hélice assim como a quantidade de pás utilizadas, os tipos utilizados são: material de APC com o tamanho de 10X4.5 milímetros e três pás, material APC com o tamanho 80x40 milímetros e duas pás apresentadas na Figura 20. Os testes buscam efetuar a análise de comportamento do controlador fuzzy ao ser utilizado estes dois tipos de hélices.

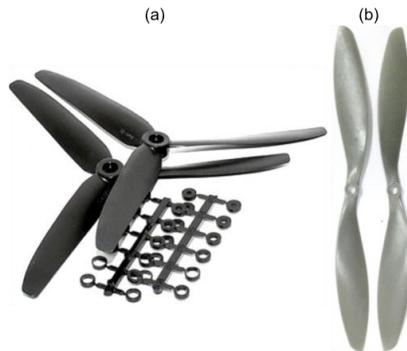


Figura 20- Tipos de hélices utilizadas: (a) APC, (b) 8040

3.4 Unidades de Controle e Processamento (UCP)

A unidade de controle e processamento, UCP, é responsável pela aquisição e processamento dos sinais provenientes dos sensores onde é processado um algoritmo de controle do sistema capaz de executar as ações previamente definidas. A escolha da UCP é feita baseada em sua capacidade de processamento para efetuar um ciclo de controle, onde o controlador de velocidade executa uma nova atualização nos atuadores a cada 20ms, sendo necessário que o ciclo de aquisição e processamento para o controle do sistema ocorra em um tempo inferior.

A plataforma utilizada é baseada no microcontrolador ARM Cortex M3 AT91SAM3X8E de 32 bits. Possui 54 pinos digitais podendo 12 serem saídas PWM, 12 entradas analógicas, 2 conversores Digital para Analógico, 4 interfaces serial, interface SPI, interface I2C e uma frequência de processamento de 84MHz.

Este microcontrolador possui 512KBytes de memória *Flash* e uma memória *RAM* de 96KBytes (sendo dois bancos: 64KB e 32KB). Possui uma interface de programação *USB* e linguagem de programação baseada em C da plataforma Arduino a Figura 21 apresenta a placa arduino Due utilizada no projeto.

O núcleo de processamento de 32 bits executa 4 bytes de operações com um único clock da unidade de processamento central, CPU, além de possui um controlador DMA que pode aliviar a CPU de tarefas intensas de memória. As saídas do sinal PWM podem ser configuráveis para trabalharem com uma resolução de 8 a 12 bits possibilitando a execução

de experimentos buscando definir a resolução que demonstra ter o melhor comportamento do controle do sistema.

A plataforma de 32 bits do microcontrolador habilita o uso da biblioteca eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library) que é uma biblioteca de logica fuzzy aplicada a sistemas embarcados possibilitando assim a implementação do controlador *fuzzy* proposto.

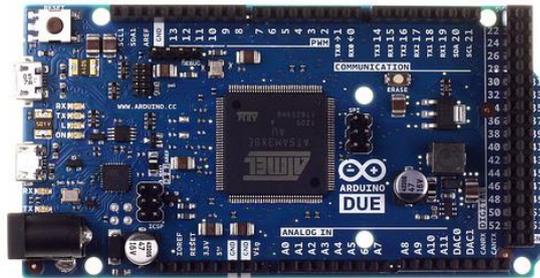


Figura 21- Arduino Due

3.5 Unidade de comunicação sem fios

A comunicação entre o veículo e a estação base fixada no solo é realizada através de uma comunicação sem fios entre dois módulos *Xbee Pro*. Estes módulos utilizam o protocolo de comunicação específico *ZigBee* para efetuar a comunicação entre si.

Estes módulos são compactos e são bastante utilizados em aplicações de baixo consumo e onde não requer alta taxa de transferência apresentando alta confiabilidade na transmissão dos dados e facilidade na integração com sistemas embarcados. A transmissão de dados entre o microcontrolador e estes módulos é realizada através de uma comunicação serial podendo a velocidade de transmissão variar entre 9.6Kbps e 115.2Kbps alcançando distancias de até 1.6Km em ambientes abertos e 100m em ambientes internos, a figura 13 apresenta o módulo Xbee pro s1 utilizado no protótipo.



Figura 22- Módulo Xbee pro s1

O ZigBee pro utiliza um conjunto de protocolos de comunicação digital otimizado para o baixo consumo com um padrão de rádio na frequência IEEE 802.15.4 operando em bandas de frequência de 2.4 a 2.484GHz, 902 a 928MHz e 868 a 868.6MHz dependendo do tipo de ZigBee escolhido. A configuração dos módulos pode ser feita através do software X-CTU onde é possível

definir a frequência de operação, taxa de transferência, nome do módulo para definição dos nós de uma rede.

A comunicação utilizada é do tipo ponto a ponto onde existem apenas dois módulos que estão configurados para enviar e receber informações entre a estação base e o veículo. A comunicação serial utiliza dois pinos Tx (pino de transmissão) e Rx (pino de recepção).

3.6 Fontes de energia

A seleção da fonte de energia que alimenta todo o sistema deve proporcionar uma elevada capacidade energética com o intuito de obter maior autonomia em voo e fornecer corrente suficiente para responder às acelerações dos motores, tamanho físico reduzido e podendo suportar regimes dinâmicos agressivos. A tecnologia existente que melhor satisfaz os requisitos é a tecnologia de Polímero de Lítio (LiPo).

A bateria escolhida apresentada na Figura 14 é constituída por três células ligadas em série, possuindo uma tensão nominal de 3.7V e uma capacidade de 3Ah por célula permitindo à bateria uma tensão nominal combinada de 11.1V e uma capacidade nominal de 3Ah, proporcionando uma capacidade normal de descarga de 20 vezes a sua capacidade nominal, ou seja, esta bateria fornece até 60A.

Os motores utilizados consomem o valor máximo de 12A, logo a combinação dos quatro motores resulta num valor máximo de corrente de 48A. Desta forma a bateria utilizada consegue fornecer a corrente necessária para o funcionamento dos motores em regime normal com uma autonomia de até 8 minutos com uma carga total de 1Kg. As dimensões da bateria são 145x49x26 milímetros possuindo uma massa total de 412gramas.



Figura 23- Bateria de Polímero de Lítio 3Ah, 11.1V.

3.7 Unidade Móvel Inercial

A unidade de medida inercial, ou IMU (Inertial Measurement Unit), é um componente eletrônico que combina internamente giroscópios em cada um dos três eixos e acelerômetros em cada um dos três eixos que executam a medida de velocidade angular e orientação de um objeto, o que permite o controle de atitude (posição angular) de veículos aéreos. O controle do quadrotor é

realizado a partir de medidas de uma IMU. Portanto sua confiabilidade e precisão são características desejáveis para o sistema.

As IMUs de baixo custo fazem com que seja um desafio desenvolver algoritmos de pós processamento capazes de suprimir ruídos mecânicos ocasionados por vibrações geradas pela atuação dos motores fixos na carenagem do quadrotor, sendo necessária a implementação de filtros digitais, o que acarreta em um aumento de processamento computacional.

A MPU6050, Figura 24, é um sensor capaz de estimar os ângulos de atitude (roll, pitch e yaw) e medir a velocidade angular através de giroscópios. Além disso, possui um filtro digital passa baixa configurável que disponibiliza a leitura dos ângulos de atitude com baixa interferência a ruídos, fazendo com que o sistema de controle não necessite efetuar o tratamento dos dados diminuindo assim o processamento dos dados do microcontrolador.

O processador de movimento Digital, do inglês Digital Motion Processor (DMP), executa algoritmos de processamento complexos de fusão dos seis eixos internamente ao componente possibilitando a implementação de filtros digitais configuráveis sendo necessário a configuração dos registradores, disponibilizando assim uma leitura dos ângulos com baixa interferência a ruídos.



Figura 24 - IMU de baixo custo

A sequência de configuração da DPM é apresentada a seguir:

- Habilitar o Filtro Passa Baixa de 10Hz (FPB).
- Definir o valor de offset dos eixos X, Y e Z do giroscópio.
- Definir a escala do giroscópio em +/-1000 graus por segundo.
- Definir a taxa de atualização da leitura do sensor em 50 Hz
- Receber os dados dos ângulos de rotação e posição.

A utilização do filtro digital da DMP apresenta um atraso na leitura dos ângulos de atitude de 13ms, desta forma foi definido a taxa de atualização da leitura do sensor a cada 50Hz. A configuração do filtro digital deve ser feita sincronizando a taxa de atualização de uma nova leitura e o tempo que a DMP leva para processar a filtragem, fazendo com que a atuação do controle não seja prejudicada.

Os ângulos de atitude estimados provenientes da MPU devem ser estabilizados após um período de tempo de leitura, encontrando assim os valores de referência atual que devem ser utilizados para definir a posição Zero do sistema. O desenvolvimento de uma estrutura de testes é

necessário para proporcionar ao sistema os ângulos de referência de forma confiável, o método utilizado para definir a referência dos eixos foi através da elaboração de um programa capaz de efetuar leituras dos dados da MPU até ocorrer a estabilidade da referência atual e definir a nova posição de referência inicial do sistema em zero.

A comunicação utilizada para efetuar a conexão com o sistema de processamento e o sensor MPU 6050 é feita através do barramento I2C, que permite a interligação de vários dispositivos através de apenas duas linhas tendo os dispositivos a mesma referência GND. Uma linha possui o sinal que define a frequência de transmissão/recepção dos dados (SCL) sincronizando os dispositivos e na outra linha flui os dados entre dispositivos (SDA).

3.8 Estação Base

A Estação Base tem como objetivo apresentar os valores obtidos pela unidade móvel inercial assim como proporcionar a sintonia dos valores de offset de cada um dos motores, a referência de altura desejada, resolução do PWM aplicado aos motores e alteração da configuração dos controladores *fuzzy*.

Desta forma podem ser transmitidos os dados contendo as informações de sintonia do sistema e receber os dados de comportamento do sistema através da porta de comunicação serial do computador viabilizando a análise dos dados, interpretação e diagnósticos.

3.9 Sistema desenvolvido e plataforma de testes

A combinação de todos os componentes apresentados nas seções anteriores formam a estrutura do protótipo de um quadrotor é apresentada na Figura 25. O hardware utilizado para implementação do sistema de controle de estabilidade é baseado em componentes de baixo custo utilizados em aerodelismo.

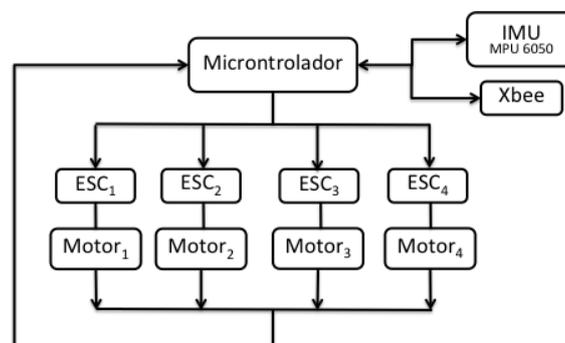


Figura 25- Arquitetura do Veículo desenvolvido

A comunicação entre o VANT e o computador foi feita com a utilização de duas placas Xbee S1 onde uma envia os dados do sistema e a outra recebe os dados no computador, podendo ser

visualizado através da comunicação serial. A figura 26 apresenta a plataforma de testes utilizada em laboratório para desenvolvimento da pesquisa no sistema embarcado escolhido.



Figura 26 - Plataforma de testes.

A forma escolhida para executar os testes de estabilidade do sistema deve deixar a estrutura física livre possibilitando efetuar movimentos em torno do seu eixo sem que ocorra interferências provenientes da estrutura adotada. O método mais barato e com baixa interferência é com a utilização de barbantes presos em todos os braços da estrutura do quadrotor. A altura é definida através da fixação de uma roldana no teto do laboratório e um conjunto de barbantes presos a estrutura central assim como um peso no chão para evitar alturas excessivas.

3.10 Controlador Fuzzy Proposto

O controle de estabilidade com lógica fuzzy utiliza como entradas os sinais de atitude roll, pitch e yaw que são ângulos responsáveis pela estabilidade do sistema. Os trabalhos até aqui estudados na literatura do controle de estabilidade do quadrotor demonstram o uso de no mínimo seis controladores para efetuar o controle de estabilidade do sistema onde é feito o controle de cada posição X,Y, Z e posteriormente os ângulos roll, pitch, yaw. Alguns trabalhos correlatos utilizaram a lógica *fuzzy* em conjunto com um controlador do tipo proporcional e derivativo (S. Costa, 2008),(M. Santos et al., 2010),(Syed Ali et al., 2010) e em (S. Zangenehpour et al, 2010) foi desenvolvido experimentos de controle de um único grau de liberdade de um braço utilizando logica fuzzy sem a ação do controlador Proporcional e Derivativo demonstrando que é possível a implementação de um controlador fuzzy em quadrotores de forma simplificada.

A estrutura básica de controle é apresentada na figura 27 onde pode ser observado as entradas do controlador de estabilidade provenientes da Unidade Móvel Inercial com o uso de um filtro passa baixa de 10 hertz, indicado no bloco Sensor MPU 6050 com as iniciais em inglês Low Pass Filter (LPF), os ângulos já filtrados são utilizados como entrada do controlador *fuzzy* e as saídas do controlador é utilizado o sinal PWM, que efetua o controle de velocidade dos motores. Os ajustes de potência em cada um dos motores é feito através de uma variável de acréscimo do valor de PWM, caso o sistema tenha a tendência de ir para uma determinada direção a variável PWM_{offset} pode ser ajustada para compensar o movimento.

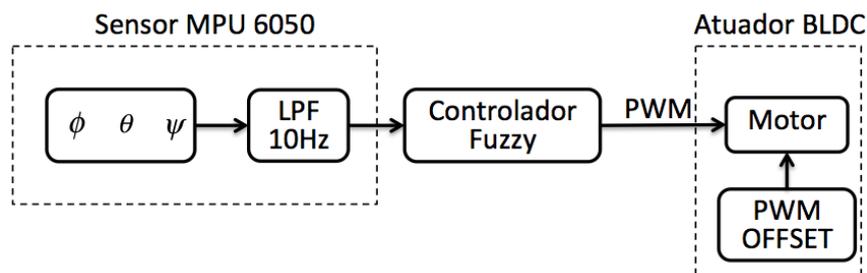


Figura 27 - Sistema de Controle do quadrotor

O controlador proposto, apresentando na Figura 28, apresenta o método de controle de estabilidade do quadrotor com a implementação de três controladores fuzzy, com a menor quantidade de funções de pertinência possíveis para estabilizar o sistema, onde suas entradas são o erro do ângulo e a leitura da aceleração do giroscópio de cada eixo para garantir a rápida atuação do sistema mediante a movimentações em um curto período de tempo.

A altura é controlada através de um sensor sonar disposto em baixo do quadrotor que envia a informação de altitude em relação ao solo, buscando executar o controle dos ângulos roll, pitch,

yaw foi utilizado um valor de referência de altura através do uso da variável PWM_{offset} . A saída do controlador é utilizado o sinal de controle do tipo PWM aplicado diretamente aos controladores de velocidade que acionam os motores.

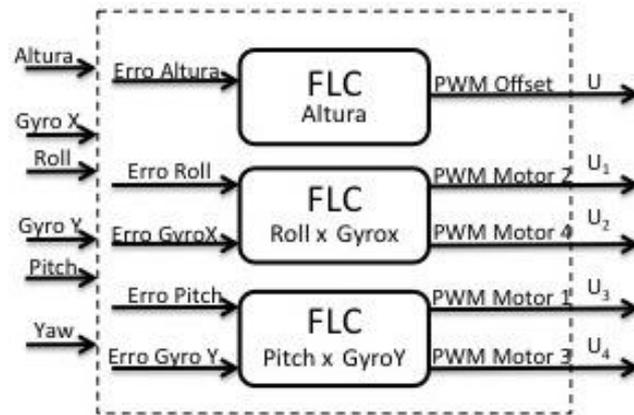


Figura 28 - Proposta do Controlador Lógico Fuzzy de Estabilidade

Os controladores fuzzy desenvolvidos foram simulados no software Matlab utilizando a ferramenta Toolbox Fuzzy Logic seguindo as características comuns que possibilitam as ações condizentes com a intuição humana sendo implementado em sequência na plataforma embarcada do protótipo com o objetivo de validar o controle proposto. As características do controlador foram:

- Modulo de inferência Mandami
- Funções de Pertinência Triangulares e Trapezoidais.
- Regras Fuzzy seguindo a forma:
se(erro angulo) e (erro yaw) então(PWM_{motorx}).
- Método de defuzzificação: Centro de Gravidade(Centroid).
- Operadores e(AND) como mínimo.

As entradas do sistema alimentam diretamente os três controladores, um controlador tem por função definir a altura que o quadrotor deve ser mantido através da análise do erro da altura proveniente do sensor sonar, gerando como resultado um valor fixo a ser agregado ao acionamento dos quatro motores. O segundo controlador é responsável pela estabilidade do eixo x tendo como entrada o ângulo roll e o giroscópio do eixo x em conjunto com o ângulo yaw. O terceiro controlador é responsável pela estabilidade do eixo y, tendo como entrada o ângulo pitch e o giroscópio do eixo y em conjunto com o ângulo yaw. O angulo yaw tem influência na potência aplicada em cada um dos motores sendo necessário criar um bloco de agregação dos sinais de controle na saída do sistema, de acordo com a fórmula 14 verifica-se a participação do ângulo yaw em todos os motores sendo utilizado em conjunto com os controladores dos ângulos roll e pitch.

3.10.1 Definição das Regras do Controlador Fuzzy

A definição das regras do controlador fuzzy foi baseada a partir da análise do funcionamento do sistema, relacionando o movimento nos eixos com o acionamento dos motores. A Tabela 2 descrita abaixo apresenta todas as possíveis combinações dos movimentos do quadrotor com o acionamento dos motores e sua variação de velocidade com o uso da variável Δv .

Tabela 2 - Tabela verdade dos movimentos do quadrotor.

Movimento	Motor 1	Motor 2	Motor 3	Motor 4
para cima (<i>throttle+</i>)	$v_1 + \Delta v$	$v_2 + \Delta v$	$v_3 + \Delta v$	$v_4 + \Delta v$
para baixo (<i>throttle-</i>)	$v_1 - \Delta v$	$v_2 - \Delta v$	$v_3 - \Delta v$	$v_4 - \Delta v$
para frente (<i>pitch+</i>)	$v_1 - \Delta v$	$v_2 + \Delta v$	v_3	v_4
para trás (<i>pitch-</i>)	$v_1 + \Delta v$	$v_2 - \Delta v$	v_3	v_4
para direita (<i>roll+</i>)	v_1	v_2	$v_3 + \Delta v$	$v_4 - \Delta v$
para esquerda (<i>roll-</i>)	v_1	v_2	$v_3 - \Delta v$	$v_4 + \Delta v$
horário (<i>yaw+</i>)	$v_1 + \Delta v$	$v_2 + \Delta v$	$v_3 - \Delta v$	$v_4 - \Delta v$
anti-horário (<i>yaw-</i>)	$v_1 - \Delta v$	$v_2 - \Delta v$	$v_3 + \Delta v$	$v_4 + \Delta v$

O acionamento dos motores deve seguir as seguintes relações matemáticas proveniente das leituras dos sensores, conforme a Equação 14, para a altura foi definido uma variável para os quatro sinais de controle chamada de PWM_{offset} . A movimentação do quadrotor para a esquerda e direita deve ser controlada pelo sinal PWM_{roll} assim como para a frente e para trás pelo sinal PWM_{pitch} e a movimentação no sentido horário e anti-horário pelo sinal PWM_{yaw} , seguindo assim as regras definidas pela tabela 2.

$$\begin{aligned}
 PWM_{motor1} &= PWM_{offset} + PWM_{roll} - PWM_{yaw} \\
 PWM_{motor2} &= PWM_{offset} + PWM_{pitch} + PWM_{yaw} \\
 PWM_{motor3} &= PWM_{offset} - PWM_{roll} - PWM_{yaw} \\
 PWM_{motor4} &= PWM_{offset} - PWM_{pitch} + PWM_{yaw}
 \end{aligned} \tag{14}$$

As regras linguísticas do controlador fuzzy descrevem o comportamento do sistema mediante combinações das entradas dos ângulos a serem controlados através de conectivos lógicos. A base de regras representa as ações a serem tomadas mediante as possíveis entradas, sendo necessário o conhecimento especializado do comportamento da dinâmica do sistema.

A criação da base de regras foi definida inicialmente com a menor quantidade de regras possíveis para efetuar o controle de estabilidade do sistema, sendo inicialmente 9 regras linguísticas aplicadas pela combinação das variáveis de entrada, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Regras do acionamento dos motores do quadrotor.

		Motor 2 e Motor 1					Motor 4 e Motor 3		
ϕ/ψ		N	Z	P	θ/ψ		N	Z	P
N		VMA	VA	VM	N		VM	VB	VMB
Z		VA	VM	VB	Z		VA	VM	VB
P		VM	VB	VMB	P		VMA	VA	VM

A abreviação das entradas utilizadas na Tabela 3 são: “N” para “Negativo”, “Z” para “Zero”, “P” para “Positivo” e as regras geradas para as saídas do sistema são: “VA” para “Velocidade Alta”, “VMA” para “Velocidade Muito Alta”, “VM” para “Velocidade Média”, “VB” para “Velocidade Baixa” e “VMB” para “Velocidade Muito Baixa”.

3.10.2 Funções de Pertinência

A definição das funções de pertinência é uma fase importante no desenvolvimento dos controladores fuzzy pois as características do controlador são definidas a partir da quantidade de funções utilizadas e sua posição em relação as outras classes, apresentando dificuldades na definição das regras e de ajuste das funções de pertinência dos termos linguísticos. Alguns procedimentos são efetuados de forma empírica pelo método da tentativa e erro, o que pode ser bastante lento dependendo da complexidade do sistema que se proponha a controlar. Estudos conhecidos na literatura apresentam métodos que podem obter melhores resultados em relação ao método empírico como SARSA, Reinforcement Learning, Q-learning dentre outros. (S. Zangenehpour et al, 2010)

As funções de pertinência utilizadas para a implementação das regras dos controladores foram baseadas na respostas das funções de transferência do sistema dinâmico do quadrotor baseado nos estudos apresentados no artigo de (J. C. Netto, 2005) que implementou testes de forma simulada do comportamento de um controlador do tipo fuzzy aplicado a diversos tipos de plantas. Descrevendo o comportamento do sistema mediante a classificação de suas variáveis de controle, as Figuras 29 e 30 descrevem a implementação da função de pertinência aplicada ao ângulo roll e giroscópio onde são divididos em três classes: Negativo, Zero e Positivo com o formato triangular e trapezoidal.

A classificação Negativo e Positivo apresenta a largura de atuação do controlador na faixa de ângulos negativos e positivos. A classe Zero apresenta os valores em que o controlador deve buscar sua estabilidade de acordo com a definição do método centroide, onde o grau de pertinência da classe Zero é 1 no ângulo 0 grau.

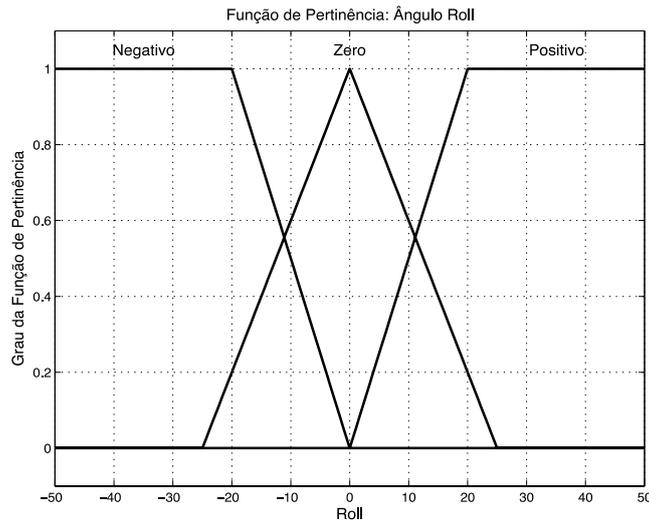


Figura 29- Escolha da função de pertinência do ângulo de entrada Roll

O controle do sinal proveniente do giroscópio apresenta a velocidade angular do eixo onde o ajuste do comportamento desta função de pertinência altera significativamente a velocidade da ação do controlador em relação a uma perturbação apresentado no capítulo de resultados a resposta do sistema mediante as alterações nas funções de pertinência. Os ajustes definidos previamente buscam fazer com que o sistema tenha uma menor oscilação com perturbações.

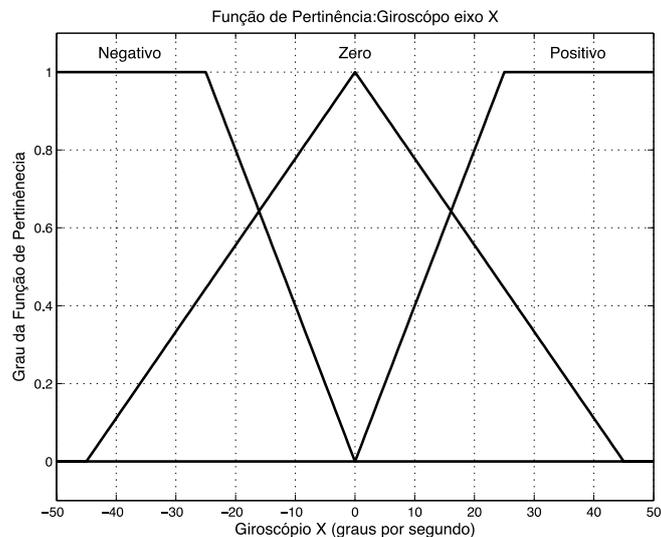


Figura 30- Escolha da função de pertinência do Giroscópio X.

A função de pertinência da saída do sistema de controle é feita em uma faixa de [0,50] do sinal de PWM, conforme é apresentada na Figura 31. A alteração da faixa de operação do controlador para valores maiores afeta diretamente no comportamento do controlador causando alguma oscilação, com isso foi definido uma faixa de valores suficientes para atuar na estabilidade do sistema obtendo uma menor oscilação. (K. Gowrishankar et all, 2008)

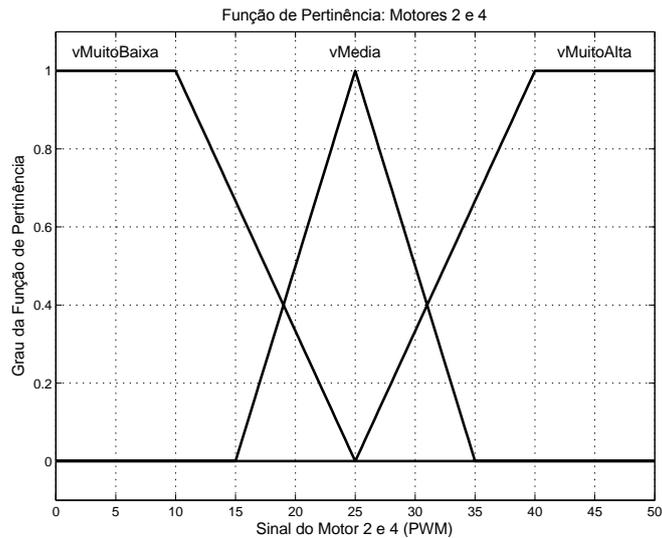


Figura 31- Funções de Pertinência do Ângulo de Entrada Roll e Giroscópio X.

Segundo Shaw e Simões (1999), o número de funções de pertinência influencia na suavidade da resposta e precisão do sistema de controle nebuloso. No entanto, um número elevado de funções de pertinência ocasiona um aumento no número de regras para o controlador, o que acaba tornando complicada a sintonia, além disso, outros trabalhos já demonstraram que com apenas 3 funções de pertinência e 9 regras é possível controlar sistemas diversos (Sayed Ali Raza et al.,2010; M. Santos et al.,2010; S. Costa,2008).

3.11 Implementação do Controle em Simulador Computacional

A simulação do controlador *fuzzy* foi feita utilizando o programa MATLAB 2014b com o uso da ferramenta *fuzzy*. O primeiro passo para o desenvolvimento do controlador é definir o nome do projeto, tipo de sistema fuzzy: podendo ser Mandami ou Takagi Sugeno, método utilizado: AND ou OR e o tipo de defuzzificação utilizado, declarando as entradas e saídas do sistema e as regras antecedentes e consequentes, um diagrama completo é apresentado na Figura 32 demonstrando as configurações necessárias para o devido funcionamento do controlador fuzzy.

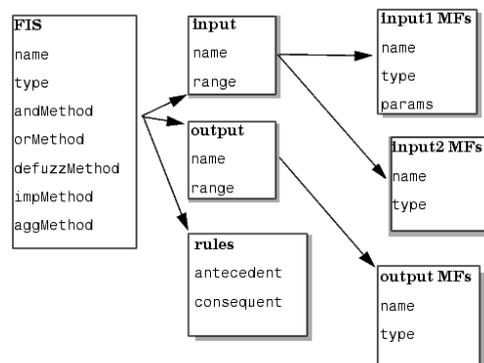


Figura 32 - Configuração do controlador *fuzzy* no Matlab.

O ambiente da ferramenta *fuzzy* é apresentado na Figura 33 onde pode ser observado a configuração do sistema *fuzzy* assim como a faixa de atuação, entradas e saídas utilizadas. A grande maioria dos sistemas *fuzzy* Mamdani utiliza a configuração AND com implicação produto e defuzzificação centroide, a configuração das funções de pertinência de entrada e saída pode ser feito clicando nas caixas indicadas na Figura 33.

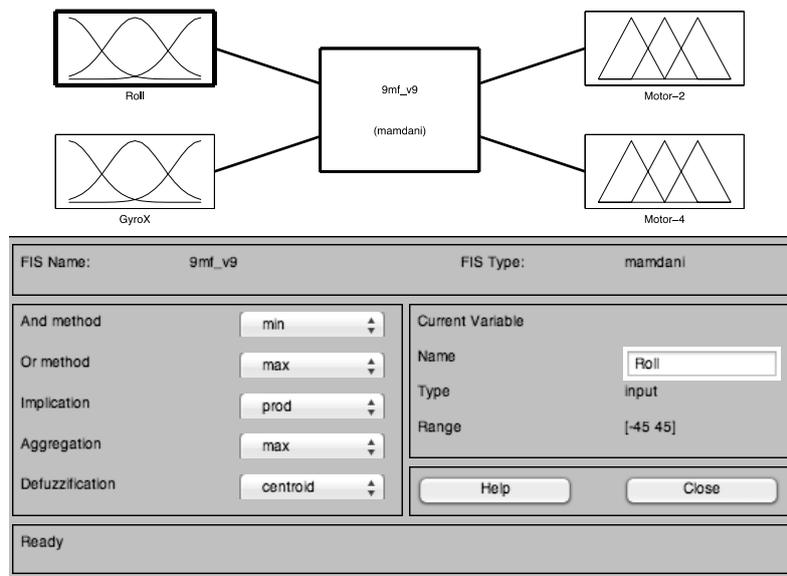


Figura 33 - Configuração do Toolbox *fuzzy*

As funções de pertinência são ajustadas baseadas na análise de comportamento da planta genérica do quadrotor a ser controlada, sendo necessário definir a posição dos vértices de cada conjunto indicado. O tipo de função de pertinência pode também ser definido, sendo utilizado para o conjunto Negativo e Positivo o tipo Trapézio e para o conjunto Zero o formato triangular, conforme é apresentado na Figura 34.

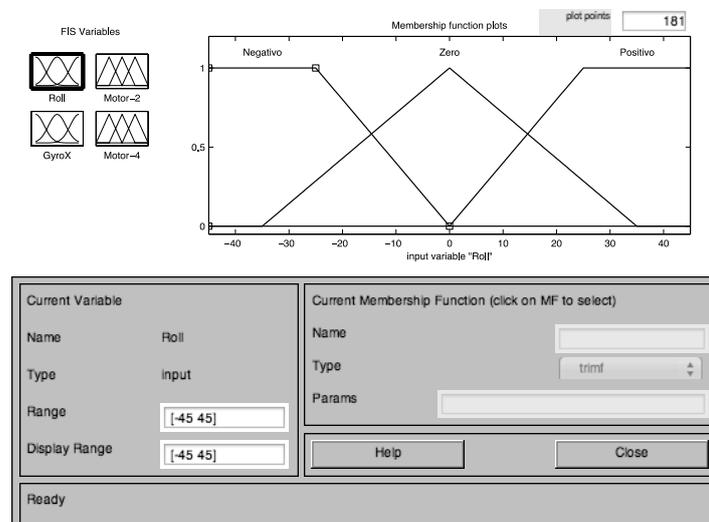


Figura 34 - Configuração das funções de pertinência no Toolbox *fuzzy*

As regras podem ser definidas através da aba *edit* e clicando em *rules*, a definição das regras foi feita previamente seguindo a metodologia proposta neste trabalho. A definição dos antecedentes e consequentes é feita utilizando os conectivos *fuzzy* e as abas com a definição *if* e *and*, conforme apresentado na Figura 35.

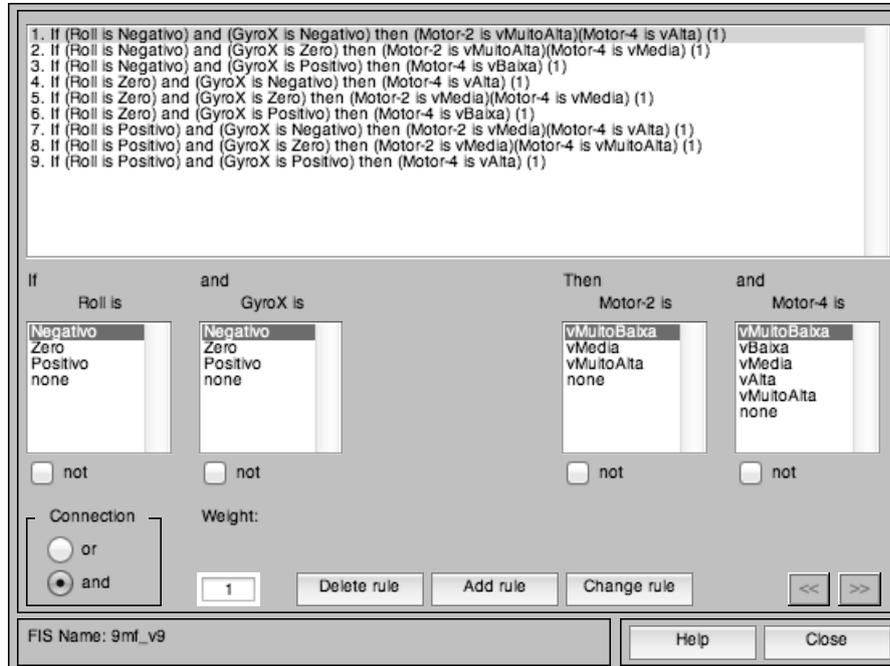


Figura 35 - Configuração das Regras utilizando Toolbox fuzzy

A simulação do sistema fuzzy busca identificar o comportamento do controlador mediante análise das entradas e saídas previamente definidas nas base de regras. O método de defuzzificação Centroeide escolhido neste trabalho pode ser identificado no resultado dos valores numéricos indicados na saída do sistema, conforme a Figura 36 apresentada a seguir.

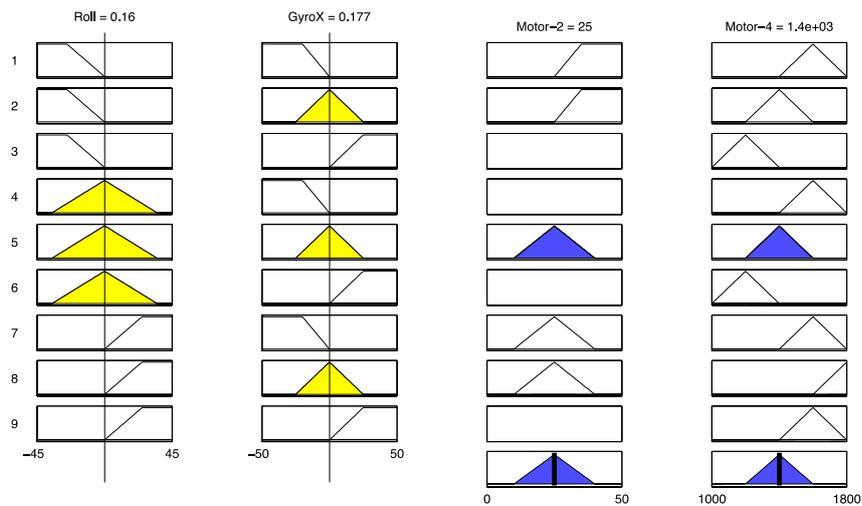


Figura 36 - Simulação do comportamento do Sistema fuzzy proposto.

A configuração do controle fuzzy pode ser salva em um arquivo de extensão do tipo .fis que pode ser emulado dentro do MATLAB com o uso da modelagem em bloco Simulink.

A simulação do sistema é baseado nas características da planta de controle desenvolvida por (S. Bouabdallah,2007), sendo utilizado como referência para análise do comportamento do controlador. A implementação de três controladores *fuzzy* foi necessária para garantir a estabilidade nos ângulos roll, pitch e yaw sem que seja necessário efetuar alterações na planta do sistema a ser controlado, pois o controlador proposto neste trabalho considera a planta como sendo uma caixa preta. A Figura 37 apresenta o controlador do ângulo roll simulado utilizando como entrada o angulo roll e sua derivada, e como saída de controle U.

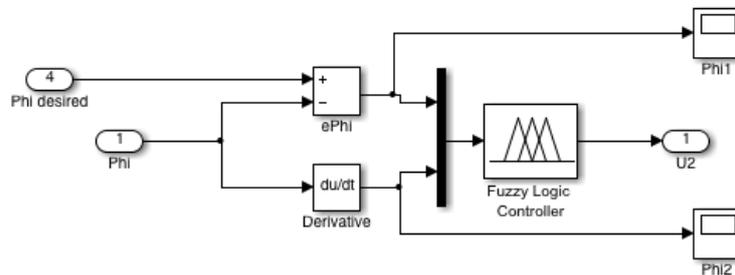


Figura 37 - Controlador roll simulado no software MATLAB

Os testes simulados realizados na planta apresentada na Figura 38 descrevem o comportamento do sistema com o uso do controlador do tipo Proporcional Derivativo e do controlador proposto neste trabalho, no anexo é apresentado a descrição detalhada de cada bloco. As simulações experimentais verificam o controle de estabilidade dos ângulos roll, pitch e yaw não fazendo o uso direto do sinal de controle U1.

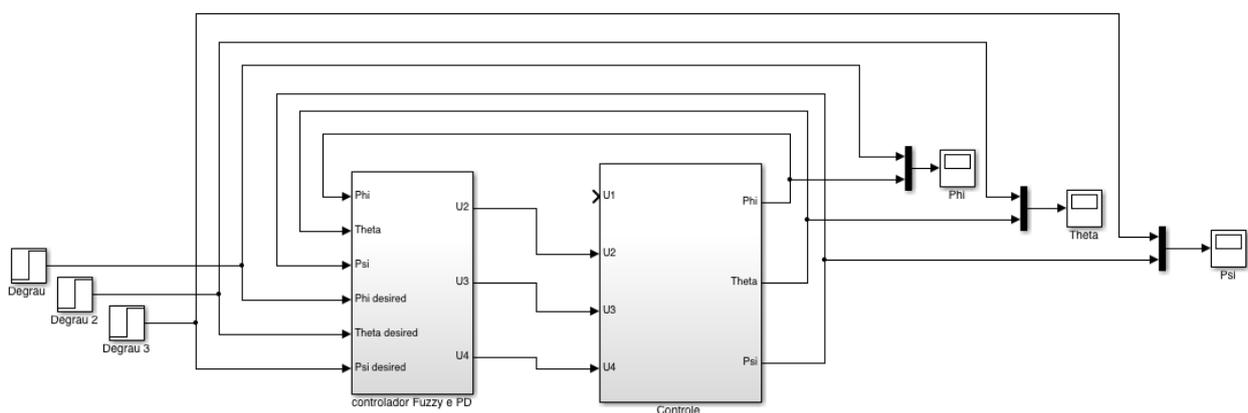


Figura 38 - Sistema de Controle Simulado

A planta do sistema é dividida em dois blocos conforme apresentado na Figura 39, onde o bloco omegasqr tem por função efetuar a conversão entre a velocidade angular de cada motor para

força. O segundo bloco intitulado ângulo é apresentado a modelagem cinemática e dinâmica de um quadrotor.

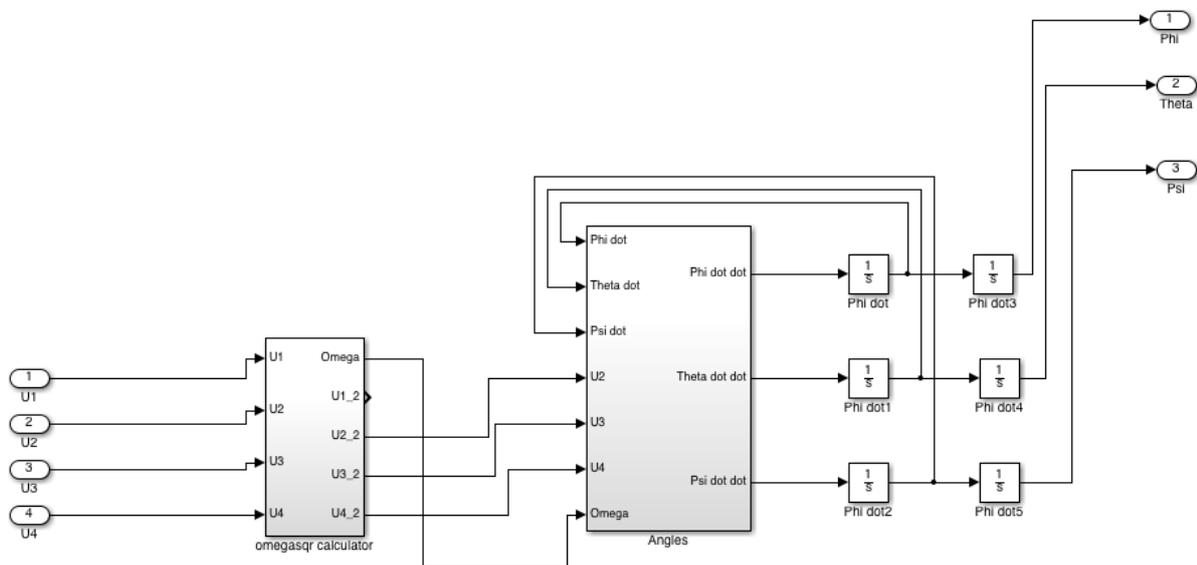


Figura 39 - Modelo Cinemático e Dinâmico do Quadrotor

A resposta ao degrau demonstra o comportamento do sistema mediante a entrada de um sinal do tipo Degrau, onde pode ser observado a ação do controlador em busca da estabilidade do sistema. A Figura 40 apresenta a resposta ao degrau do sistema aplicado ao ângulo roll com o uso de dois tipos de controladores, controlador clássico do tipo Proporcional Derivativo bastante conhecido na literatura e eficiente na busca da estabilidade do quadrotor e o controlador inteligente do tipo fuzzy proposto neste trabalho.

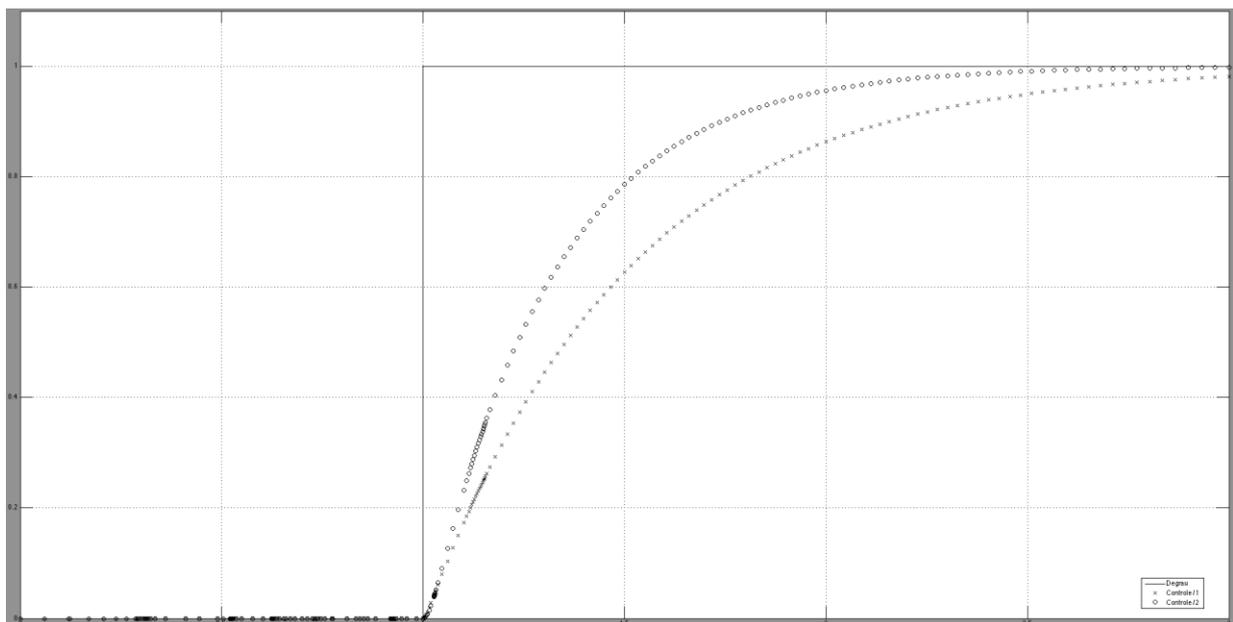


Figura 40 - Resposta ao Degrau do Controlador Fuzzy Proposto x PD aplicado ao ângulo Roll

Na Figura 40 pode ser observado o controlador PD utilizando círculos “o” e com “x” o controlador *fuzzy*, o tempo de acomodação do controlador *fuzzy* é superior em 1 segundo relação ao controlador PD levando mais tempo para que o sistema consiga ser estabilizado o que demonstra o grande potencial de utilização deste tipo de controlador e configuração para resolver problemas de estabilização de uma forma mais simples diminuindo o tempo de projeto do controlador.

3.12 Implementação do Controle em Sistema Embarcado

O controlador *fuzzy* desenvolvido utiliza uma biblioteca escrita em C++ que auxilia na implementação de controladores *fuzzy* em plataformas embarcadas, conhecida como eFLL (Embedded Fuzzy Logic Library) efetuando as adequações necessárias no uso das entradas e saídas assim como as definições das funções de pertinência utilizadas.

A configuração do controlador é feita seguindo os seguintes passos:

Definir as funções de pertinência das entradas e saídas.

Relacionar as funções de pertinência seguindo a seguinte lógica: funções de pertinência da entrada com as seis entradas dos sensores e funções de pertinência da saída com os quatro motores do sistema.

Criação das regras que antecedem a ação do controlador *fuzzy* definindo todas as possibilidades de leitura do sensor, exemplo: roll sendo negativo, zero e positivo, giroscópio x sendo negativo, zero e positivo.

Criação das regras de consequência das entradas do controlador *fuzzy* com seus conectivos, exemplo: roll negativo e giroscópio x negativo. Relacionar as regras de consequência com as saídas a serem atuadas.

Criação das regras do controlador informando as relações que antecedem e suas consequências. Após a configuração do controlador, deve ser indicado as entradas e saídas do sistema relacionando com as variáveis provenientes dos sensores e dos motores para que possa ser feito a fuzzificação e defuzzificação.

A implementação do controlador na plataforma embarcada foi feita utilizando a plataforma de desenvolvimento arduino versão 1.5.6r2 que é utilizada especificadamente para o uso da placa arduino due com o processador ARM7, onde a Figura 41 apresenta o ambiente de desenvolvimento arduino utilizado.

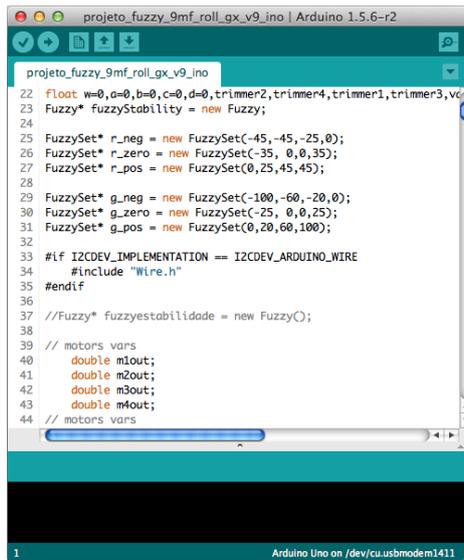


Figura 41 - Plataforma de Desenvolvimento Arduino Due

A recepção dos dados proveniente dos ângulos de estabilidade a serem controlados são feitas através do canal de comunicação serial com a taxa de transmissão em 57600 bits sendo efetuado o armazenamento dos dados em arquivo do tipo *txt* e posteriormente analisado com o software MATLAB.

Os dados provenientes da IMU e o valor de PWM a ser aplicado nos motores do quadrotor são apresentados na porta de comunicação do computador possibilitando efetuar a análise do comportamento do controlador, a Figura 42 apresenta os dados adquiridos na porta serial do computador onde *ypr* representa os ângulos yaw, pitch e roll e *RzRyRx* indicando a velocidade angular nos eixos Z,Y,X e os sinais de controle PWM aplicados nos motores apresentado nas últimas três colunas.

<u>ypr</u>	292.13	-1.75	-9.12	<u>RzRyRx</u>	-2.14	-3.20	0.09	0.00	1474.96	0.00
<u>ypr</u>	290.87	-2.35	-2.84	<u>RzRyRx</u>	2.35	-10.24	-3.66	0.00	1469.53	0.00
<u>ypr</u>	290.84	-2.10	-3.27	<u>RzRyRx</u>	-5.19	-3.93	-6.13	0.00	1471.39	0.00
<u>ypr</u>	290.79	-2.30	-3.06	<u>RzRyRx</u>	-10.37	-5.70	-4.64	0.00	1470.27	0.00
<u>ypr</u>	290.96	-1.82	-2.85	<u>RzRyRx</u>	-6.65	-5.61	-4.73	0.00	1470.32	0.00
<u>ypr</u>	290.96	-1.82	-2.85	<u>RzRyRx</u>	-6.65	-5.61	-4.73	0.00	1470.32	0.00
<u>ypr</u>	291.22	-1.66	-3.04	<u>RzRyRx</u>	-0.55	-5.39	-0.95	0.00	1469.79	0.00
<u>ypr</u>	291.45	-2.18	-2.18	<u>RzRyRx</u>	-3.97	-7.59	1.46	0.00	1467.53	0.00
<u>ypr</u>	291.45	-2.18	-2.18	<u>RzRyRx</u>	-3.97	-7.59	1.46	0.00	1467.53	0.00
<u>ypr</u>	291.69	-1.68	-1.61	<u>RzRyRx</u>	-2.35	-8.26	1.37	0.00	1466.75	0.00
<u>ypr</u>	291.69	-1.68	-1.61	<u>RzRyRx</u>	-2.35	-8.26	1.37	0.00	1466.75	0.00

Figura 42 - Dados da Serial: ypr e PWM

CAPITULO 4

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados dos experimentos com a plataforma desenvolvida utilizando o controlador fuzzy proposto assim como o comportamento do sistema ao ser aplicado algumas perturbações e ajustes das funções de pertinência em busca da menor variação do ângulo de atitude e ajustes da atuação do controlador. A análise dos dados obtidos com as experiências foram interpretadas mediante os parâmetros quantitativos e qualitativos baseados no comportamento do controlador fuzzy, onde os parâmetros observados foram: o valor máximo, valor mínimo e o tempo de acomodação aplicados a experimentos com perturbações e erro em regime permanente do sistema.

As variações dos parâmetros foram realizadas efetuando deslocamentos incrementais dos vértices das funções de pertinência do controlador partindo de valores inferiores ao inicial até valores que se aproximavam do universo de discurso, conforme apresentado no capítulo de *fuzzy*. Os testes de controle foram efetuados para o ângulo de atitude roll sendo que o controle do ângulo pitch segue o mesmo comportamento pois são simétricos. A taxa de amostragem utilizada nos experimentos é de 20 milissegundos, 50 Hertz, sendo analisado o comportamento do sistema com um tempo mínimo de 20 segundos até 40 segundos.

4.1 Comparativo entre as Hélices APC, GWS e Fibra de Carbono

O comportamento do controlador fuzzy depende diretamente da resposta dos atuadores utilizados no quadrotor, o empuxo exercido por cada um dos motores devem ser iguais para que o sistema possa ser controlado sem a necessidade de efetuar ajustes de offset em determinadas faixas de operação. A hélice tem fundamental importância no comportamento do motor sendo necessário efetuar experimentos para definir a influência das hélices no sistema e poder assim definir o melhor conjunto hélice motor para a estrutura do quadrotor.

A Figura 43 apresenta o comportamento do controlador em relação ao uso das hélices do tipo APC de três palhetas ao efetuar o controle do ângulo roll, GWS de duas palhetas onde demonstra a superioridade do uso das hélices APC de três palhetas que proporcionam menor ruído ao sistema e maior empuxo gerado pelo conjunto hélice motor.

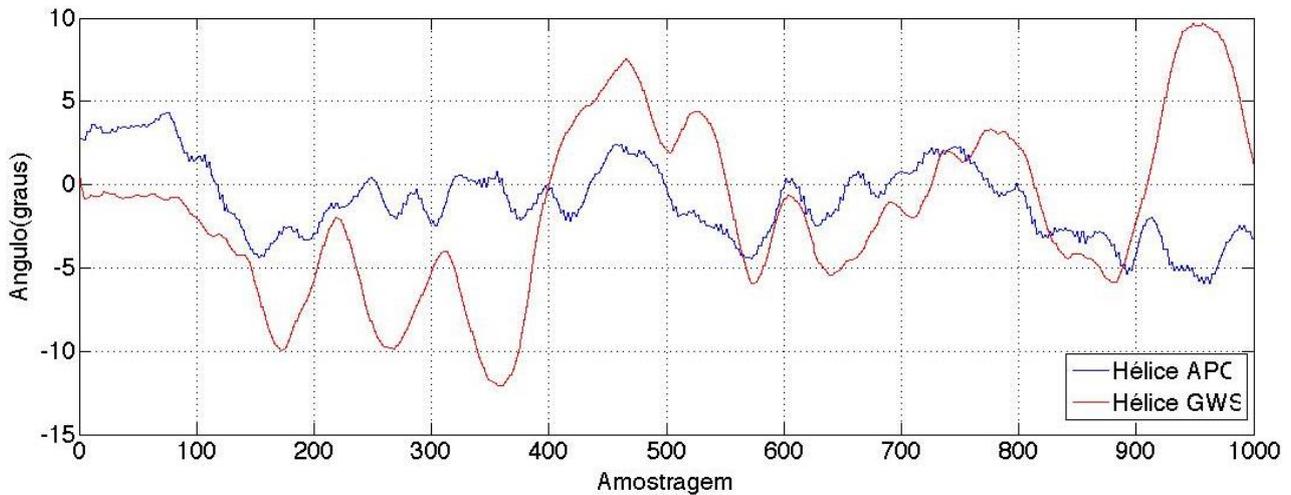


Figura 43 - Comparativo entre as hélices APC e GWS no controle do ângulo roll

A faixa de variação dos ângulos com as hélices do tipo APC é menor 111,57% em relação ao tipo GWS demonstrando menor oscilação, conforme Tabela 4. Tendo como referência o ângulo 0 grau, a média dos valores do ângulo roll utilizando hélices do tipo APC tiveram um erro de regime permanente de -0.92 graus enquanto que o modelo GWS apresentou -1.69 graus comprovando que o uso das hélices do tipo APC são melhores em comparação com o modelo GWS.

Tabela 4 - Comparativo das Hélices APC e GWS.

Ângulo Roll em graus	Hélice APC	Hélice GWS
Mínimo	-5.96	-12.06
Máximo	4.35	9.69
Media	-0.92	-1.69
Range	10.28	21.75

4.2 Controle do ângulo roll com 45% de potência e 8bits de resolução.

Os testes experimentais executados neste tópico descrevem o controle de atitude do angulo roll com o PWM_{offset} em 45% da potência máxima do motor simulando uma situação próximo da decolagem utilizando uma resolução de 8 bits no sinal de controle PWM, definido como angulo de referência em 0 graus. A Figura 44 apresenta o sinal de controle do giroscópio no eixo X onde observa-se a oscilação do sistema na faixa entre [-20,20] graus por segundo demonstrando a atuação do controlador.

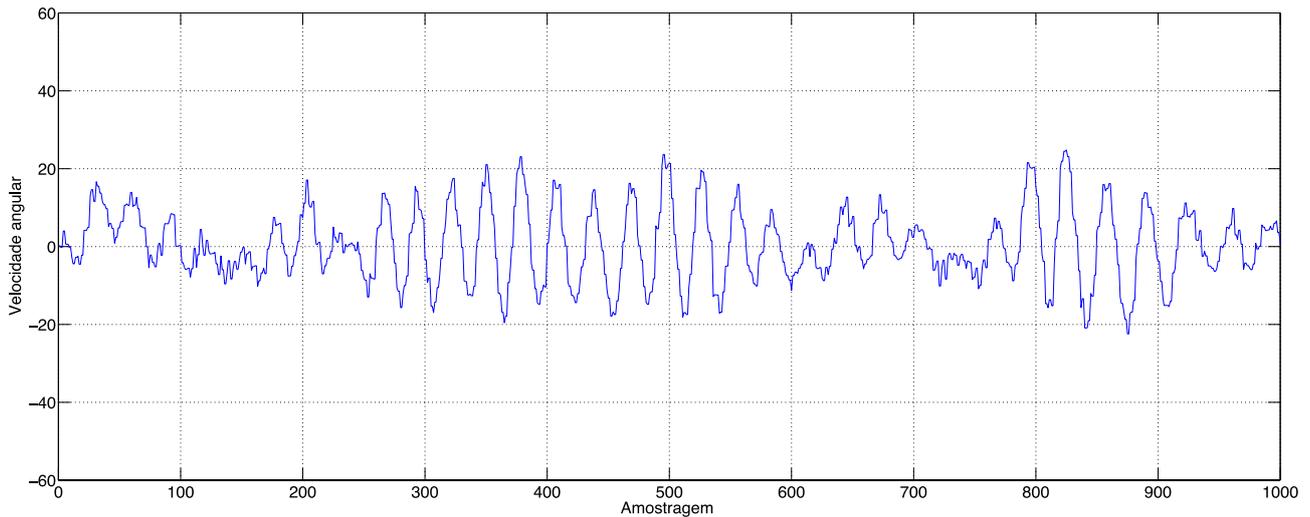


Figura 44 - Controle do Giroscópio no eixo X.

O controlador efetua o controle da velocidade angular e do ângulo roll de forma a compensar perturbações externas atuando suavemente em busca de atingir a estabilidade do sistema. A figura 45 apresenta a estabilidade do sistema ocorrendo pequenas oscilações em uma faixa de aproximadamente $[-5,5]$ graus.

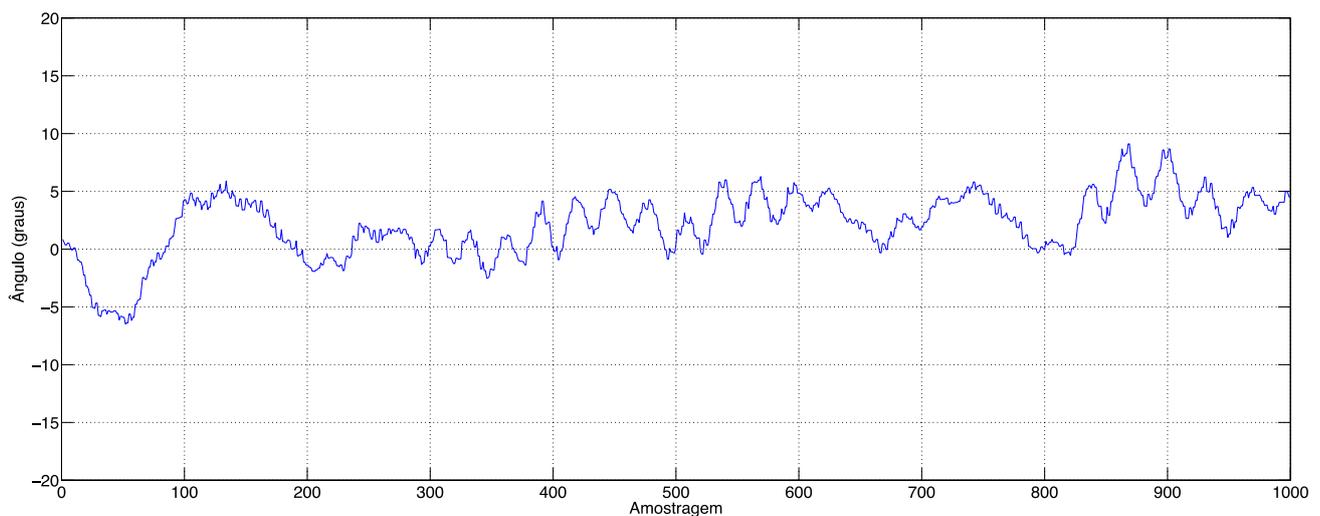


Figura 45 - Controle do Ângulo roll

O controlador proposto desenvolvido experimentalmente e testado na plataforma de testes apresentou melhores resultados quando comparado com os trabalhos experimentais de (S. Costa,2008;) onde a faixa de oscilação varia em aproximadamente $[-10,10]$ graus e de $[-8,7]$ graus em (Syed Ali et al.,2010).

As figuras 46 e 47 apresentam o acionamento dos motores através do sinal de controle PWM em 8 bits aplicado ao controle eletrônico de velocidade onde pode ser identificado a ação complementar entre os dois motores sendo efetuado o aumento do sinal de controle no motor 2 e a diminuição no motor 4 demonstrando a ação do controlador em busca da estabilização do ângulo.

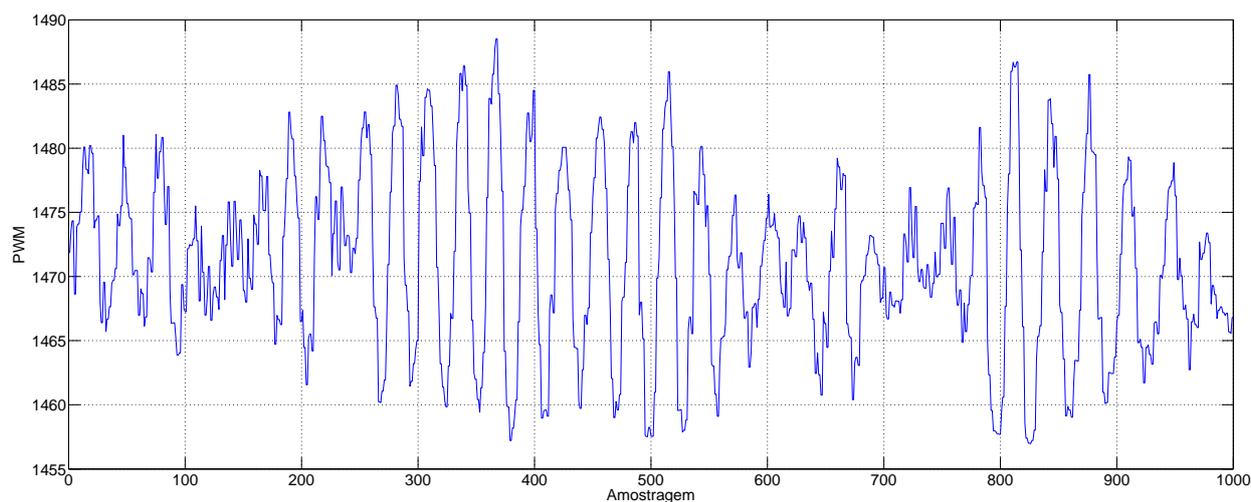


Figura 46 - Sinal de controle PWM do motor 2

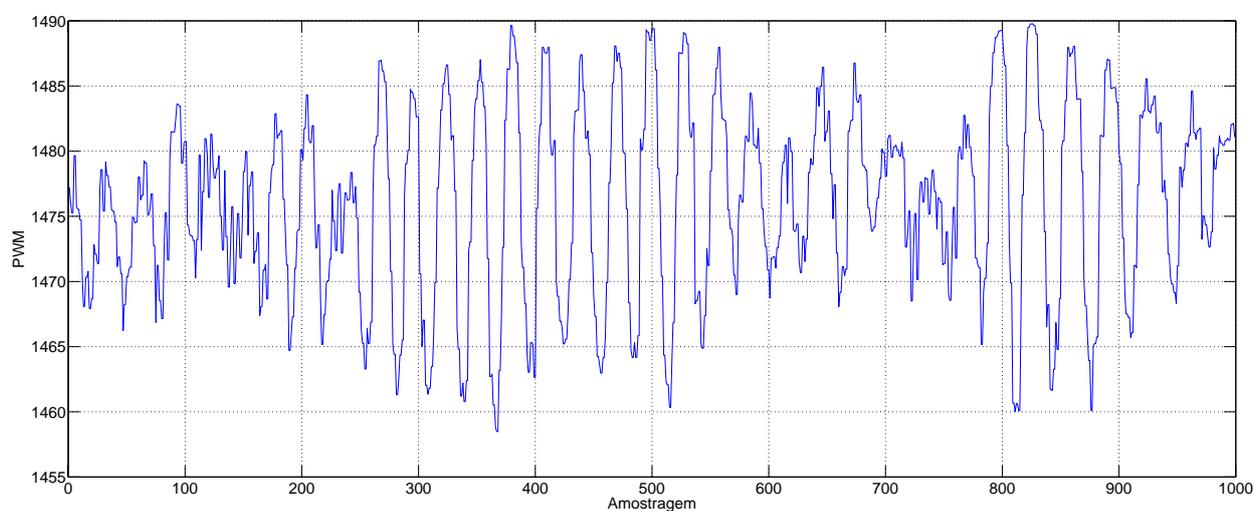


Figura 47 - Sinal de controle PWM do motor 4

O sinal de controle PWM utilizado para efetuar o acionamento dos motores, neste experimento, é de 8 bits apresentando uma resposta com oscilação e agressividade em virtude da faixa de velocidades possíveis que é de 2^8-1 totalizando 255 posições de velocidade do motor. Experimentos comparando o uso de 8 bits e 12 bits são apresentados a seguir

4.3 Controle do ângulo roll com 8 e 12 bits de resolução do PWM.

O sistema embarcado da plataforma de testes possibilitou a execução de testes com a resolução do sinal PWM em 8 e 12 bits. Desta forma pode ser visto a ação do controlador com estas resoluções, onde na Figura 48 a cor azul representa o sinal de controle com 8 bits e o sinal vermelho a resolução de 12 bits.

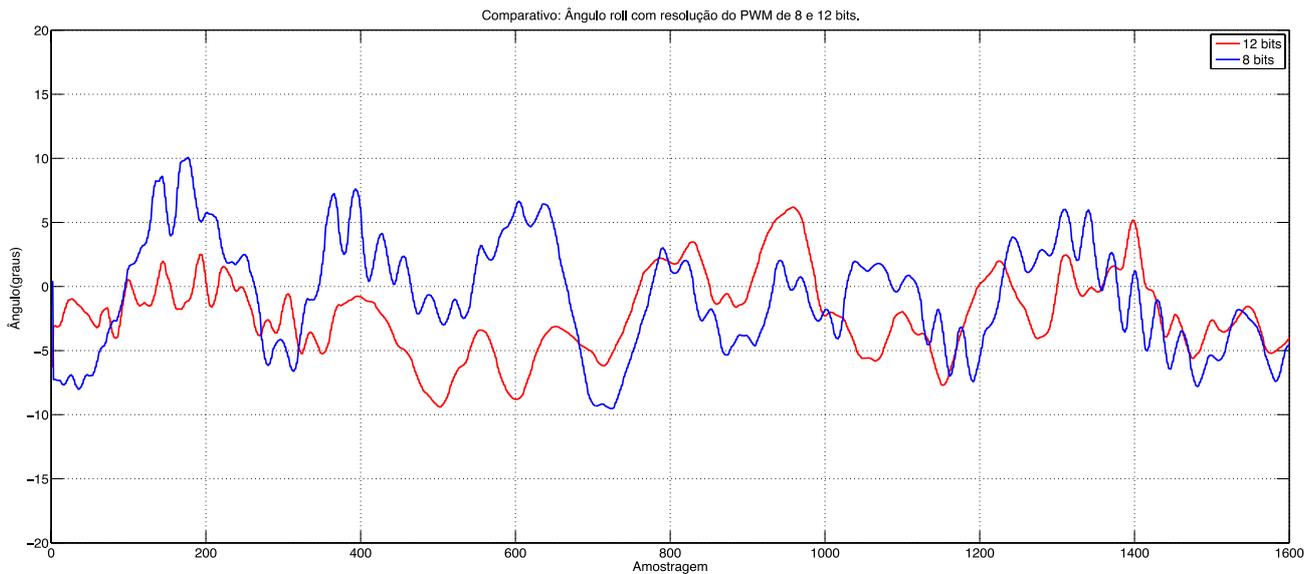


Figura 48 - Comparativo do ângulo roll com resolução do PWM de 8 e 12 bits.

O comportamento do controle pode ser visto na Tabela 5. A utilização do sinal PWM em 12 bits demonstrou uma grande melhoria em relação ao de 8 bits. A taxa de variação do ângulo de controle com o sinal de PWM em 12 bits demonstrou ser melhor aproximadamente 64% em relação a resolução de 8 bits, sendo menos eficiente ao buscar o ângulo de referência definido em 0 graus sendo necessário efetuar compensações no sinal de offset dos motores para melhorar o seu comportamento. A Tabela 5 também apresenta o comparativo entre a resolução do sinal de PWM utilizado para acionar os motores onde pode ser observado a faixa de valores de atuação com 8 bits que é de $[-14.6, 7.95]$ graus e de $[-11.16, 2.58]$ graus com 12 bits confirmando a melhoria no comportamento do sistema, este comportamento se dá mediante o aumento da quantidade de velocidades que o motor pode atuar, apresentando maior suavidade na resposta do sistema.

Tabela 5 - Comparativo entre 8 e 12 bits de resolução do PWM.

Ângulo Roll	Roll 8bits	Roll 12 bits
Mínimo	-9.6	-8.5
Máximo	10.12	6.8
Media	-2.52	-5.04
Range	19.72	15.3

4.4 Controle do ângulo roll com perturbação

Neste experimento pode ser observado o comportamento do controlador *fuzzy* do ângulo de atitude roll ao ser aplicado uma perturbação, simulando uma colisão com um obstáculo ou outros tipos de distúrbios onde a atuação do controlador demonstra ser satisfatória rejeitando as

perturbações e mantendo a posição de referência desejada em 0 graus conforme apresentado na Figura 49, as setas indicam o momento em que ocorre as perturbações no sistema. O tempo de acomodação do sistema após uma perturbação é menor que 100 amostras, 2 segundos, demonstrando melhor performance em comparação ao trabalho desenvolvido por (Sayed Ali Raza et al.,2010) com o controle de um grau de liberdade.

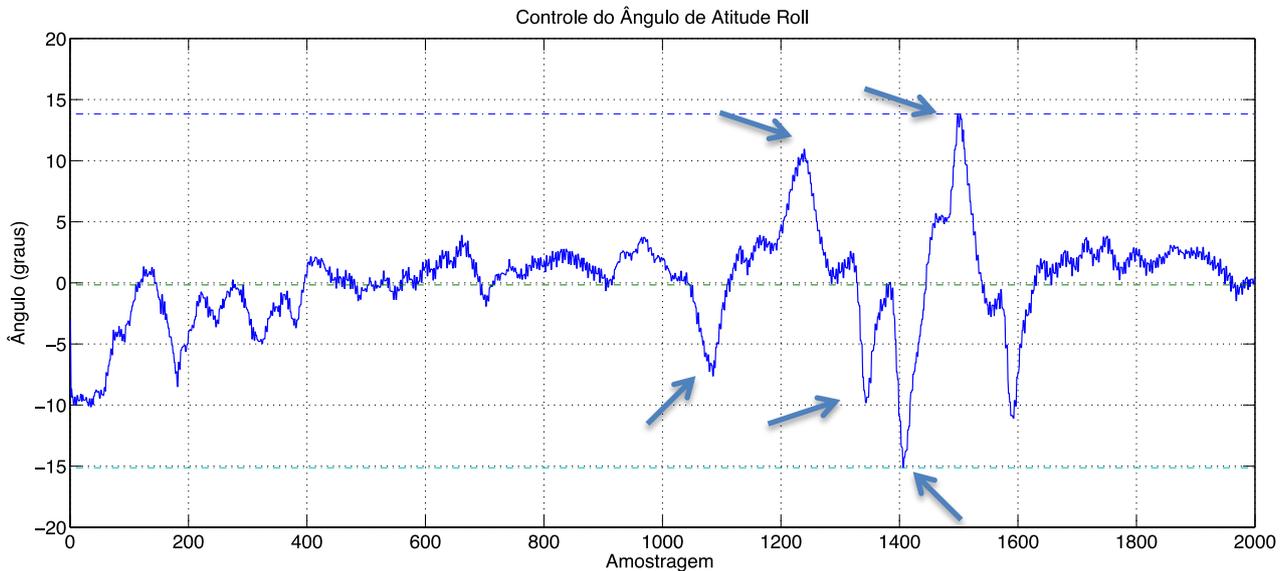


Figura 49 - Controle do Angulo de atitude roll e giroscópio do eixo X , 8 bits.

4.5 Sintonia da Função de Pertinência Zero

A experiência consiste em analisar o comportamento do sistema ao efetuar a sintonia da função de pertinência Zero aumentando/diminuindo a sua faixa de atuação. A sintonia é feita com o deslocamento proporcional da função ZERO, como mostrado na Figura 50, fazendo a contração/extensão da sua base.

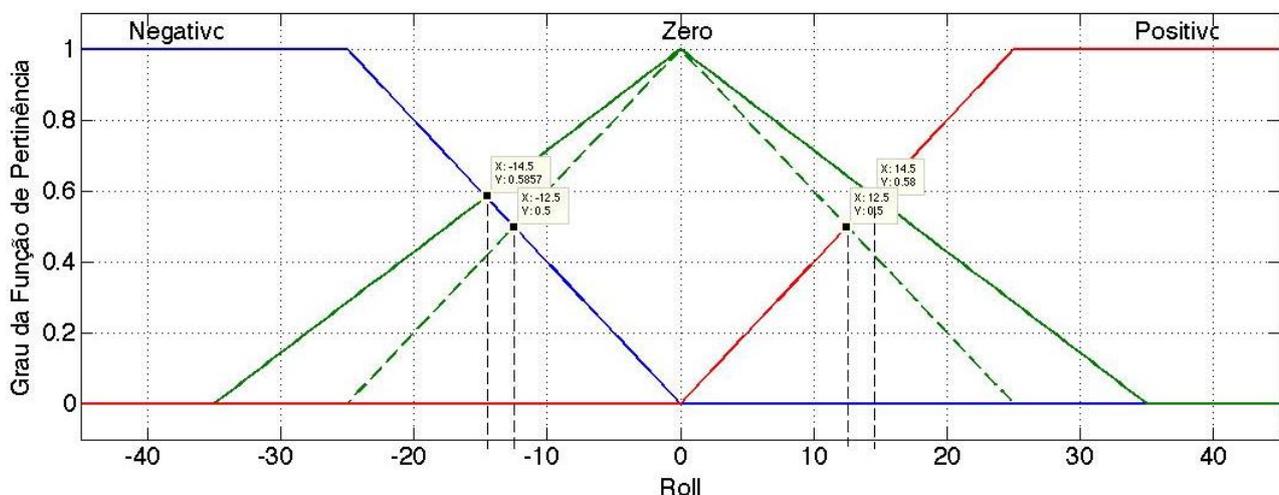


Figura 50 - Sintonia da Função de Pertinência Zero.

O comportamento do controlador fuzzy ao efetuar a contração da função de pertinência zero apresentou uma maior oscilação em virtude do estreitamento da faixa de operação sendo indicado a utilização da faixa de $[-35,35]$ graus por obter um erro de regime estacionário mais próximo de zero, conforme apresentando na Figura 51, utilizando como angulo de referencia 0 grau. A base de regras utilizada pelo controlador na faixa de $[-35,35]$ demonstra a atuação da função de pertinência Zero com a Velocidade Média, conforme Tabela 2 que descreve as regras do controlador, fazendo com que o sistema responda de forma mais suave, pois o grau de participação da pertinência da função Zero é maior em comparação com as funções Negativo e Positivo.

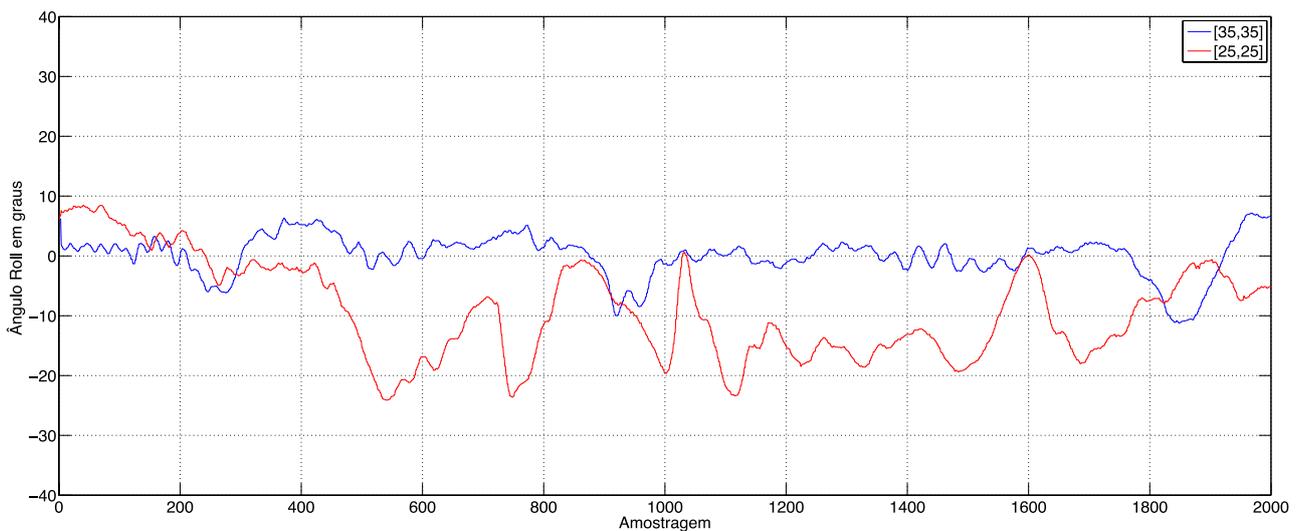


Figura 51 - Comparativo da Sintonia da função de pertinência Zero.

A diminuição da faixa de atuação da função de pertinência Zero fez com que seu grau de pertinência diminuísse em relação as funções Negativo e Positivo tendo como consequência a ação do controlador baseado nas regras: Velocidade Baixa e Velocidade Alta, fazendo com que o sistema tenha uma resposta mais rápida e oscilatória, pois a participação destas funções aumentou em relação a função Zero.

4.6 Sintonia da Função de Pertinência de Entrada Negativo e Positivo

O comportamento do sistema foi observado ao efetuar o deslocamento dos vértices das funções Negativo e Positivo num movimento de contração/extensão da distância entre estes vértices, como visto na Figura 52. A experiência anterior realizada com a função Zero comprovou que ao diminuir a faixa de atuação da função central as funções adjacentes obterão maior grau de pertinência influenciando diretamente na ação do controlador, a sintonia das funções de pertinência da entrada Negativo e Positivo obteve o mesmo resultado descrito na experiência anterior onde a extensão dos vértices gerou um aumento na oscilação do sistema e melhor resposta a perturbações.

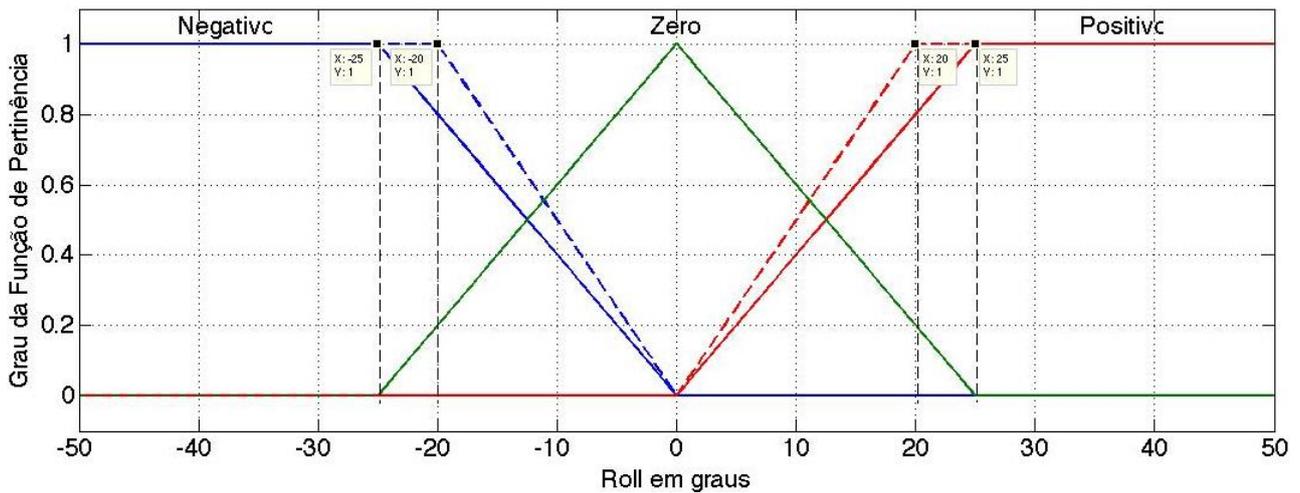


Figura 52 - Sintonia da Função de Pertinência Negativo e Positivo.

4.7 Sintonia da Função de Pertinência de Saída

A função de pertinência da saída descreve o valor máximo e mínimo de atuação do controlador. A faixa de valores entre [0,60] unidades do PWM utilizada nos experimentos consegue fazer com que o sistema seja estável e com baixa oscilação, o aumento para a faixa de [0,100] representa uma melhoria na resposta a perturbações mas causando uma maior oscilação no sistema, conforme Figura 53 apresentada a seguir.

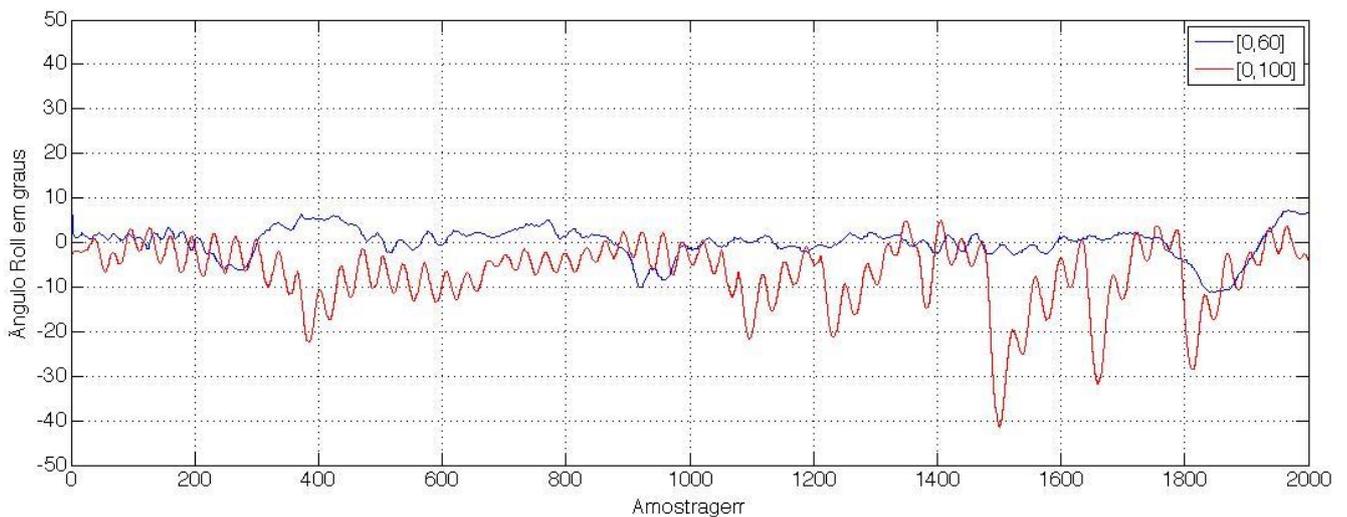


Figura 53 - Comparativo da função de pertinência da saída.

A sintonia da função de pertinência da saída deve ser feita em conjunto com as faixas de valores da entrada do controlador fuzzy para que o sistema tenha o comportamento desejado. Estudos desenvolvidos no trabalho de (K. Gowrishankar,2008) demonstram de forma simulada o controle de uma turbina de velocidade utilizando a lógica fuzzy, cujo a função de transferência é de

terceira ordem, concluindo que o aumento da escala de saída melhora a resposta do sistema mas pode causar alguma oscilação. Esta afirmação é comprovada de forma experimental neste trabalho.

CAPITULO 5

CONCLUSÃO

A identificação de um modelo associado à dinâmica do sistema possibilitou a definição das funções de pertinência de acordo com a resposta do sistema mediante o ajuste dos conjuntos das entradas Negativo, Zero, Positivo. Assim como os conjuntos das saídas Velocidade baixa, Velocidade Media, Velocidade Alta dos controladores. Esta metodologia de ajuste diminuiu o tempo de definição das funções de pertinência em comparação ao método empírico, cujo os ajustes deve ser feito mediante testes de comportamento do controle.

A plataforma de testes desenvolvida apresenta limitações em relação a resposta dos motores por utilizar um controlador de velocidade eletrônico de 50 hertz e o uso de uma unidade móvel inercial de baixo custo, apresentando resultados satisfatórios com o uso do filtro passa baixa digital do componente MPU 6050.

O controlador fuzzy implementado no sistema embarcado proposto demonstrou uma dificuldade na utilização das funções básicas da biblioteca eFLL mas que foram contornadas através de estudos com a utilização de múltiplas variáveis de entrada e saída do sistema.

O comportamento do sistema foi testado mediante os ajustes das funções de pertinência do controlador, onde o ajuste do conjunto Zero dos ângulos roll e pitch demonstrou que quanto maior a faixa de atuação deste conjunto menor será a oscilação do sistema e maior será o tempo que leva para o controlador reagir a uma perturbação em um dos eixos.

Testes com o uso de hélices diferentes demonstrou que a escolha da hélice deve ser feita em conjunto com o motor. Os testes compararam o comportamento do controlador com o uso de hélices de duas e três pás demonstrando que com três pás o motor utilizado apresenta melhor resposta para o sistema.

A utilização de um sistema embarcado que possibilitou a execução do controlador fuzzy com 8 e 12 bits de resolução do sinal de controle dos motores demonstrou que com 12 bits de resolução o controlador apresente respostas mais suaves e de menor oscilação apresentando melhores resultados do que com o uso de 8 bits de resolução.

BIBLIOGRAFIA

- Agostino S., Mammone M., Nelson M., Zhou T. CLASSIFICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES. University Of Adelaide, Australia.
- K. M. Passino and S. Yurkovich, livro Fuzzy Control. Menlo Park CA: Addison Wesley Longman,1998.
- Mamdani, E. H.. Applications of fuzzy algorithms for simple dynamic plants. Proceedings of the IEEE, 121(12), 1585–1588, 1974.
- M. Santos, V. López, F. Morata, “Intelligent Fuzzy Controller of a Quadrotor” em IEEE International. Conference on Intelligent Systems and Knowledge Engineering, Hangzhou, 2010.
- M. Amendola, A. Souza, L. Barros, Manual do uso da teoria dos conjuntos fuzzy no Matlab, Apostila IMECC e UNICAMP, 2005.
- Marro A. A., Souza A. M de C., Cavalcante E. R de S., Bezerra G. S., Nunes R. De O., Lógica Fuzzy: Conceitos e aplicações, UFRN, Departamento de Informática e Matemática Aplicada,2010.
- R. Sugiura, T. Fukagawa, N. Noguchi, K. Ishii, Y. Shibata, K. Toriyama, Field information system using an agricultural helicopter towards precision farming. Proceedings of 2003 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2 1073 1078 , July 2003.
- S. Bouabdallah. Design and control of quadrotors with application to autonomous flying. PhD thesis, Swiss Federal Institute of Technology, 2007.
- Syed Ali Raza and Wail Gueaieb. Intelligent Flight Control of an Autonomous Quadrotor, Motion Control, Federico Casolo (Ed.), 2010.
- S. Costa , “Controlo e Simulação de um Quadrirotor convencional” , em Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Aeroespacial. IST- Portugal, 2008.
- S. Zangenehpour, B. Dehghan, B. Asaei, “Controlling a One Degree of Freedom Arm, Using Fuzzy Controller” , em International Conference on Information, Networking and Automation (ICINA), 2010.
- Shaw, I.S., Simões, M. G., Controle e Modelagem Fuzzy. Ed. Edgard Blücher segunda edição,1999.
- R. Sugiura, T. Fukagawa, N. Noguchi, K. Ishii, Y. Shibata, K. Toriyama, Field information system using an agricultural helicopter towards precision farming. Proceedings of 2003 2003

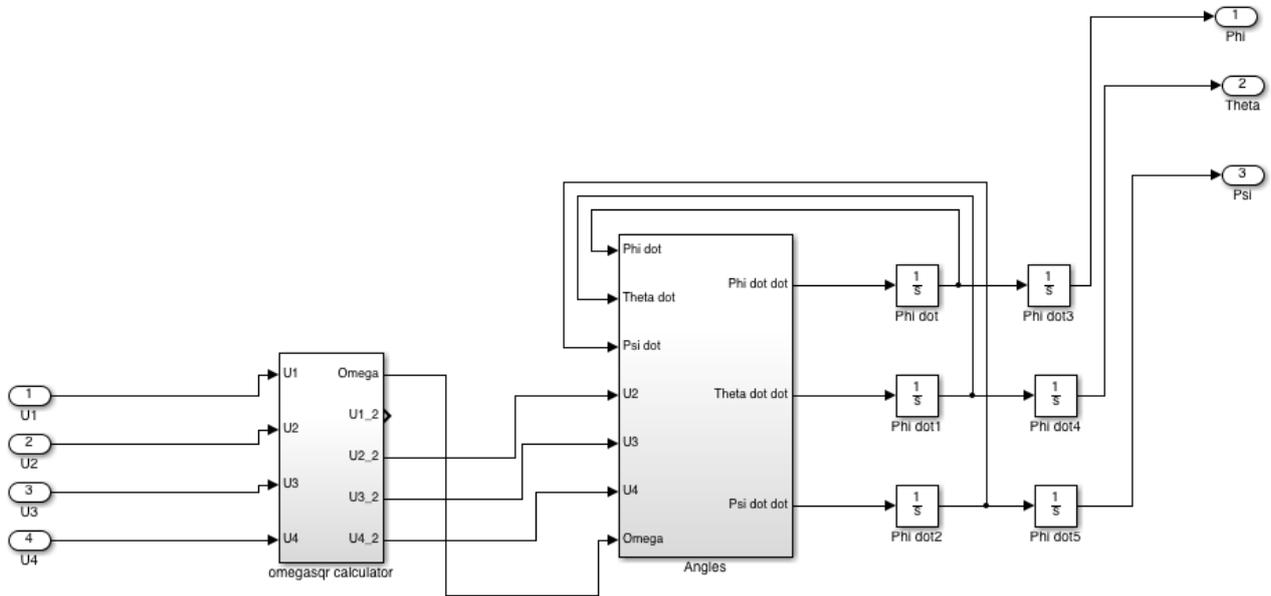
IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2 1073 1078 ,
July 2003.

J. C. Netto, Controladores Nebulosos Aplicados a Processos Industriais: Estudo Comparativo de
Métodos de Sintonia. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

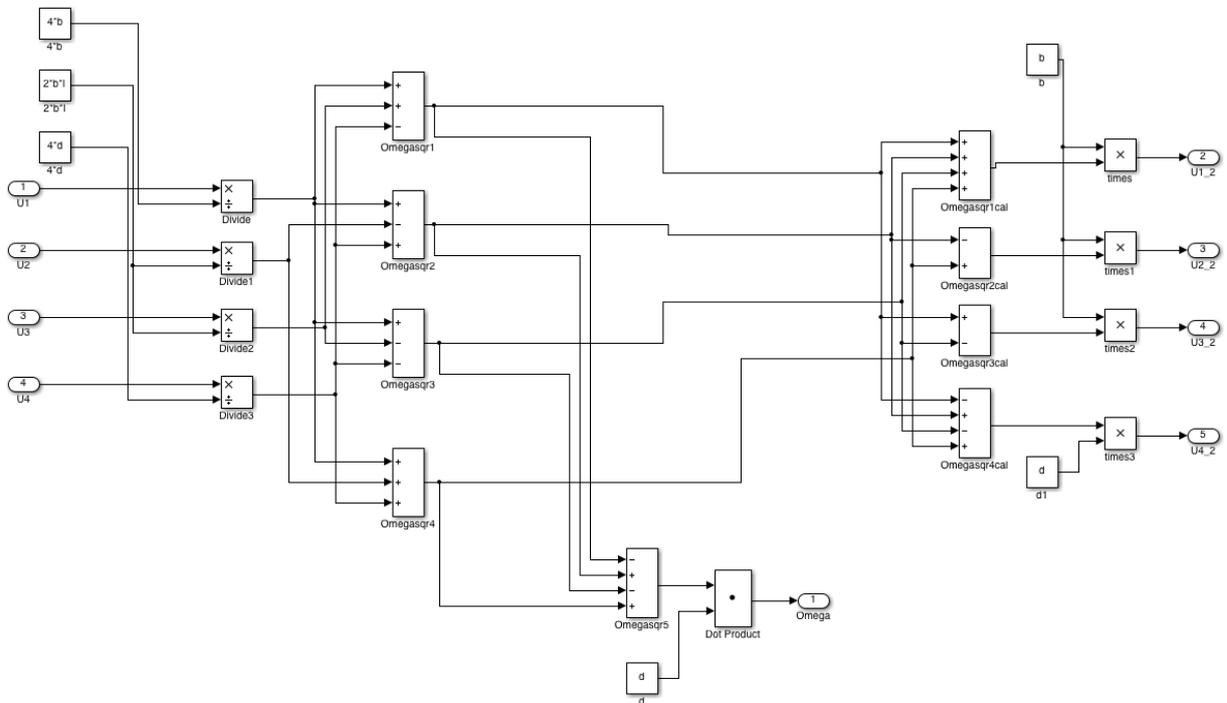
K. Gowrishankar, Vasanth Elancheralathan. Adaptative Fuzzy Controller to Control Turbine Speed.
Em Ubiquitous Computing and Communication Journal, India, V.3 n.5 pg. 59,2008.

ANEXO A

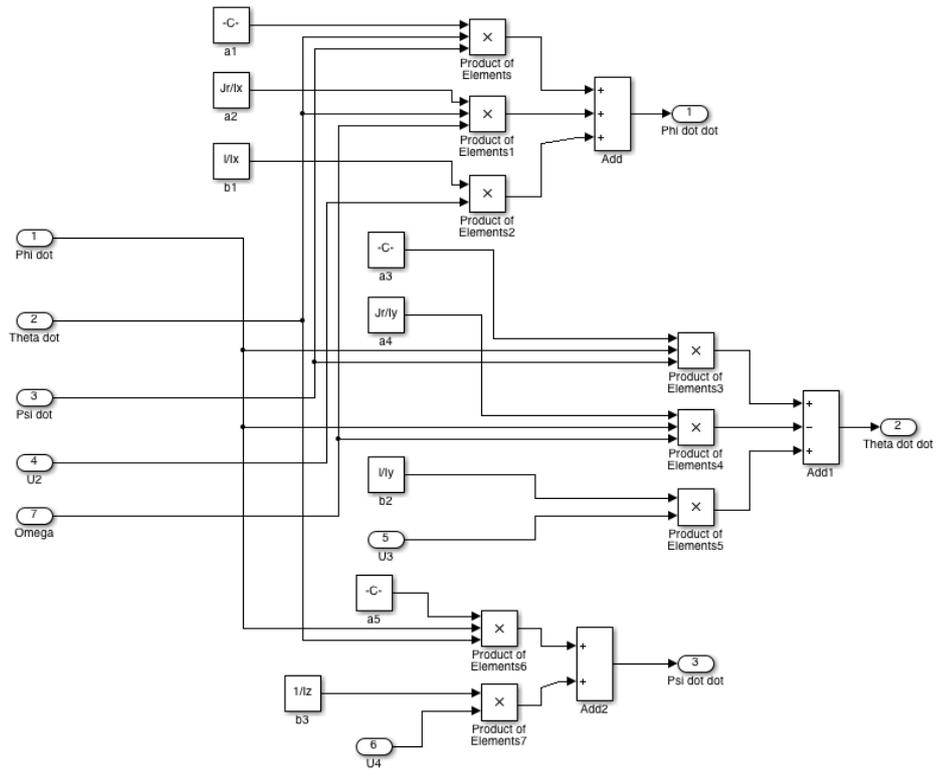
Simulação da planta modelo utilizado como referência. Este modelo é baseado no trabalho desenvolvido por (S. Bouad,2007).



Bloco de Conversão de velocidade angular para empuxo



Bloco de Modelagem Dinâmica da Planta



Bloco de Controle Fuzzy e Controle PD utilizado na Simulação

