

## **Sistema nebuloso para navegação autônoma de veículo aéreo não tripulado**

### **Fuzzy system for autonomous unmanned aerial vehicle navigation**

DOI:10.34117/bjdv7n3-086

Recebimento dos originais: 08/03/2021

Aceitação para publicação: 05/04/2021

#### **Diego Dutra Sampaio**

Graduando em Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão.

INSTITUIÇÃO: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - CAMPUS MONTE CASTELO.

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04 - Monte Castelo, São Luís - MA, 65030-005

E-mail: diego.sampaio@acad.ifma.edu.br

#### **Washington Luís Santos Silva**

Professor Doutor, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão - CAMPUS MONTE CASTELO.

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04 - Monte Castelo, São Luís - MA, 65030-005

E-mail: washigton.silva@ifma.edu.br

#### **RESUMO**

Este trabalho tem como principal objetivo desenvolver um sistema de navegação autônoma para veículos aéreo não tripulado (VANT) do tipo quadricóptero, baseado em lógica nebulosa e sensoriamento do veículo, visando automatizar a função de um piloto, de forma a permitir o máximo grau de autonomia. Para o desenvolvimento do projeto, foi alterado o hardware do rádio controle do drone Syma X8HC e utilizando sensores de ultrassom comum no mercado para permitir o veículo identificar a presença e a distância de obstáculos diversos em uma trajetória. As estruturas do controlador nebuloso foram testadas, por meio de simulações computacionais. Os resultados obtidos por meio de experimentos realizados em uma plataforma de teste e simulações computacionais demonstraram a eficácia e desempenho, tanto do método utilizado como do sistema proposto neste trabalho.

**Palavras-chaves:** Sistema Nebuloso, VANT, Controle Inteligente, Rádio Controle, Navegação autônoma.

#### **ABSTRACT**

This work has as main objective to develop an autonomous navigation system for unmanned aerial vehicles (UAV) of the quadrotor type, based on fuzzy logic and sensing of the vehicle, aiming to automate the function of a pilot, in order to allow the maximum degree of autonomy. For the development of the project, the hardware of the Syma X8HC drone's radio control was changed and common ultrasound sensors were used to allow the vehicle to identify the presence and distance of various obstacles in a trajectory. The fuzzy controller structures were tested, by means of computer simulations. The results obtained through experiments performed on a test platform and computer simulations

demonstrated the effectiveness and performance of both the method used and the system proposed in this work.

**Keywords:** Fuzzy System, UAV, Intelligent Control, Radio Control, Autonomous Navigation.

## 1 INTRODUÇÃO

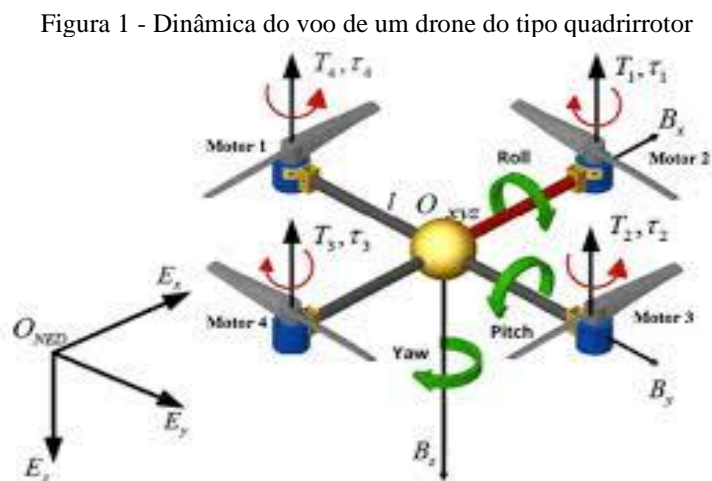
Nos últimos anos, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT), comumente conhecido como drone, despertam o interesse tanto acadêmico como comercial dentro da comunidade robótica, uma vez que as aplicações reais e potenciais são numerosas (WOODS et al, 2017). Espera-se um crescimento sólido na utilização de VANT no futuro, devido ao baixo custo de fabricação e maior flexibilidade em relação as aeronaves convencionais (PENHA NETO, 2019). Atualmente, são usados em uma vasta gama de aplicações como: entregas de mercadorias, agricultura e a pecuária (ELTNER et al., 2014), operações de salvamento (GONCALVES e RENATO, 2015), cartografia de terrenos (James et al., 2017), e monitorização ambiental e climática (DASH et al., 2017). Nessas atividades, o VANT, além de cobrir certa área, precisa ter um alto grau de mobilidade e, principalmente, ser capaz de realizar voos pairados, enquanto realiza manobras para desviar de obstáculos. No entanto, as implementações atuais em VANT ainda requerem a prevenção de colisões e planejamento adaptativo da rota. Sendo assim, é necessário um sistema de navegação eficiente, que seja capaz de tomar a melhor decisão diante do problema e que permita a sincronização entre os dados coletados pelos sensores em tempo real, a fim de aumentar o grau de inteligência e, portanto, autonomia do VANT. Tal sistema autónomo consiste em quatro requisitos essenciais: (i) percepção, o VANT utiliza os seus sensores para extrair informação significativa; (ii) localização, o VANT determina a sua posição no espaço de trabalho; (iii) cognição e planeamento de percursos, o VANT decide como dirigir para alcançar o seu alvo; (iv) controle do movimento, o VANT regula o seu movimento a realizar a trajetória desejada. (MAC, 2017)

Uma forma utilizada para resolver problemas complexo, são os métodos heurísticos como estratégia de controle inteligente baseado em *Lógica Fuzzy*, também conhecida como lógica nebulosa, que modela as ações a partir de conhecimento especialista, ao invés de, necessariamente, modelar o processo em si. Isso nos leva a uma abordagem diferente dos métodos convencionais de controle de processos. (ȚIGĂERU, 2019). Dessa forma, este trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema de navegação

autônomo baseado em inteligência artificial e sensoriamento do veículo, visando automatizar a função de um piloto, de forma que, após ser determinado o melhor percurso, a aeronave tenha o máximo grau de autonomia para navegar durante toda a trajetória.

## 2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO QUADRIRROTOR

Os quadricópteros, tipo de drone com quatro propulsores independentes dispostos na forma de uma cruz, são veículos aéreos, geralmente de pequena dimensão, com uma configuração de asa rotativa, constituída por quatro motores e suas respectivas hélices, que asseguram a sustentação em voo. A dinâmica de voo de um quadricóptero não é relativamente simples, como mostrado na Figura 1. De forma geral, em um drone com quatro hélices rotativas, os motores 1 e 3 rodam no sentido anti-horário e os motores 2 e 4 rodam no sentido horário, isto porque os motores em rotação criam não só forças verticais responsáveis pela sustentação, mas também forças horizontais responsáveis pelos movimentos do quadricóptero sobre o seu eixo central ( $B_z$ ). Os movimentos verticais, responsáveis pelo controle de altitude da aeronave, são controlados pela variação da resultante das forças  $T_1, T_2, T_3$  e  $T_4$ , aumentando ou diminuindo a velocidade dos quatro motores simultaneamente, como é possível verificar na figura 1 e abordado em (YEPES, 2018).



Fonte: (YEPES, 2018)

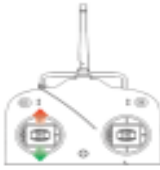

A atitude de um corpo é definida como sendo sua orientação no espaço em relação ao seu centro de gravidade. Estas atitudes são conhecidas como: Guinada (ou Yaw em inglês), Arfagem (ou Pitch em inglês) e Rolagem (ou Roll em inglês). A partir destas







atitudes que é possível o quadricóptero se movimentar na horizontal, uma vez que variando estas atitudes, têm-se uma projeção da propulsão total para uma direção. Na figura 1, foram ilustradas tais atitudes. Ao se variar as velocidades angular ( $\tau_2, \tau_4$ ) dos propulsores 2 e 4, o momento angular total no eixo  $B_y$  não se altera e é gerada uma variação na atitude pitch, consequentemente, um deslocamento positivo no eixo  $B_x$ , ou seja, o veículo se move para frente ou para trás. Da mesma forma, ao se variar as velocidades angular ( $\tau_1, \tau_3$ ) dos propulsores 1 e 3, o momento angular total no eixo  $B_x$  não se altera e é gerada uma variação na atitude roll, consequentemente, um deslocamento positivo no eixo  $B_y$ , ou seja, o veículo se move para direita ou esquerda. Por último, para que a aeronave gire em volta do eixo  $B_z$ , no sentido horário ou anti-horário, deve-se variar a atitude yaw, alterando a velocidade angular dos atuadores em pares, ou seja, variar a velocidade simultânea dos propulsores - 1 e 3 ou 4 e 2, como visto em (SANTANA, 2016) e (MADRUGA, 2013).

### 3 CONTROLE MANUAL DE VOO DE UM DRONE

O percurso de voo que uma aeronave é controlada à distância por uma pessoa com um rádio controle operando os comandos por todo o tempo de voo. Para tal controle, utilizasse um link de RF (Rádio Frequência) do tipo FM (*Frequency Modulation*) composto por um rádio transmissor e um rádio receptor, cuja portadora pode ser de 72MHz ou 2,4GHz, onde tais frequências são liberadas pelo órgão competente (ANATEL no Brasil) para este fim (SHOUFAN, 2018). A tabela 1, ilustra o funcionamento típico de um RC (Rádio Controle) para controlar manualmente aeronaves remotamente, cujos comandos são dados através de dois sticks (alavancas) — um controlado pela mão esquerda e o outro pela mão direita. Cada um deles pode ser inclinado para frente ou para trás, e para um lado ou para o outro (MELO, 2014).

Tabela 1- Esquema geral de pilotagem de VANTs

Comando do Controle	VANT	Função Executada
		Propulsão vertical: utilizada para ganhar ou perder altitude, conforme indicação na imagem. Tal movimento é executado com velocidade linear vertical controlada pelo piloto. O veículo mantém sua altitude se o stick estiver no meio do trajeto.

		<p>Yaw: utilizada para controle de leme, ou orientação de guinada em sentido horário e anti-horário, conforme indicação da imagem. Tal movimento é executado com velocidade angular controlada pelo piloto. O veículo mantém sua orientação se o stick estiver no meio do trajeto</p>
		<p>Roll: utilizada para controlar ângulo de rolagem. Tal movimento é executado com posição angular controlada pelo piloto. O veículo mantém sua orientação se o stick estiver no meio do trajeto</p>
		<p>Pitch: utilizada para controlar ângulo de arfagem. Tal movimento é executado com posição angular controlada pelo piloto automático. O veículo mantém sua orientação se o stick estiver no meio do trajeto</p>

Fonte: Adaptado de (DJI, 2020).

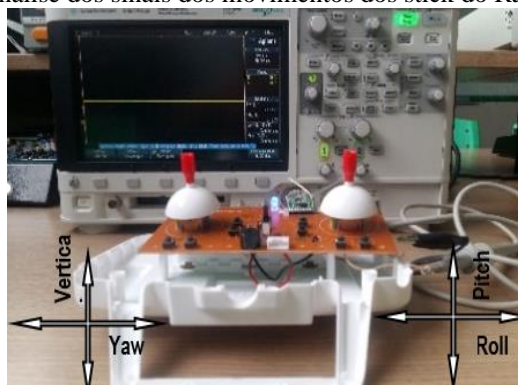
Tratando-se ainda da transmissão usada no RC, os comandos de voo são enviados serialmente e modulados. Neste formato, a posição que cada stick do transmissor assume -longitudinalmente ou transversalmente - é representada por uma informação específica. Esses dados de controle são recebidos pelo receptor que é dividido basicamente em dois blocos: o bloco de RF e o bloco de demultiplexação. O primeiro bloco simplesmente remove a portadora usada no sinal de RF com objetivo de reconstituir o carrilhão de canais. O segundo bloco é responsável por demultiplexar o carrilhão de canais em sinais usados pela placa de voo para controlar os movimentos do veículo, através dos controladores eletrônicos de velocidade (ESC — Electronic Speed Control), que por sua vez controlam a velocidade dos motores (SANTOS, 2018) e (TINETTI at all, 2019).

#### 4 MODIFICAÇÃO DO VEÍCULO

Para o desenvolvimento do protótipo do sistema de voo inteligente, foi necessário realizar teste laboratoriais no sistema do *Drone Syma X8HC*, veículo adquirido no mercado nacional. Devido à forma de construção do *hardware* da aeronave, não foi viável realizar modificações diretamente na placa controladora de voo, para fins experimentais. Por isso, visando a praticidade e a clareza do processo investigativo, optou-se por estudar a relação dos comandos de voo com os movimentos dos sticks do rádio controle. Após testes concluiu-se que cada *stick* é composto por um par de potenciômetros perpendiculares entre si, formando um divisor de tensão, que ao serem movimentados

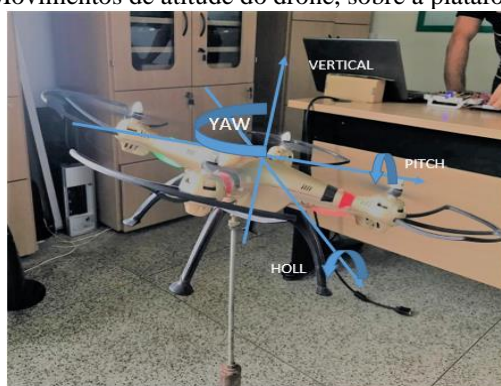
produzem sinais responsáveis por controlar os movimentos do veículo, como mostrado nas figuras 2 e 3. Por meio de um osciloscópio digital, foi possível identificar e catalogar os parâmetros dos sinais de tensão relacionados a posição e movimentos dos sticks. Dessa maneira, tomou-se conhecimento dos comandos necessários para controlar as atitudes e a direção da aeronave, permitindo relacionar a tensão aplicada no canal de transmissão com os movimentos yaw, pitch, roll e vertical do veículo, como descrito na tabela 2

Figura 2 - Análise dos sinais dos movimentos dos stick do Rádio Controle.



Fonte: Compilação do Autor

Figura 3 - Movimentos de atitude do drone, sobre a plataforma de testes.



Fonte: Compilação do Autor

Tabela 2 - Relação entre os movimentos dos stiks, sinais de tensão e os movimentos do veículo.

Movimentos dos sticks	Atitudes	Sinal de tensão (V)	Sentidos de voo da aeronave
Esquerda	Yaw.	1.65 – 3.5	Horário
		1.65 – 0	Anti-horário
	Vertical	1.65 – 3.5	Subir
		1.65 – 0	Descer
Direita	Roll .	1.65 3.5	Esquerda
		1.65 – 0	Direita
	Pitch .	1.65 – 3.5	Avançar
		1.65 – 0	Recuar
Repouso	Parado	1.65	Parado

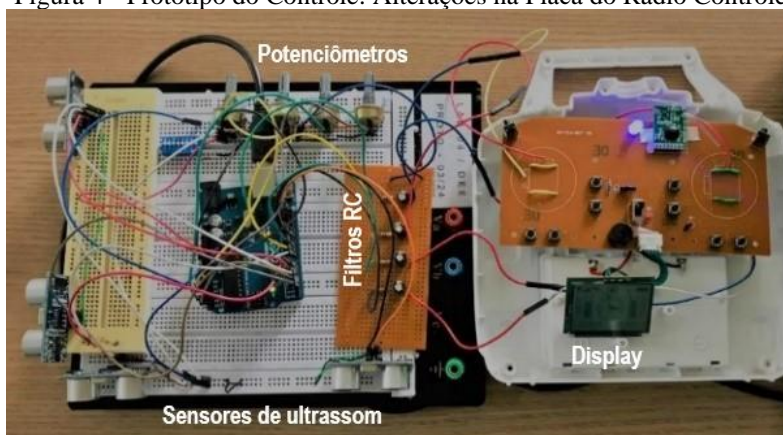
Fonte: 1 compilação do Autor

#### 4.1 PROPOSTAS DE CONTROLE

Tomado o conhecimento das informações de comando de voo, foram realizadas modificações na placa do rádio controle para substituir os *sticks* e controlá-la por um microcontroladora, *Arduino*, utilizando técnica de controle PWM (*Pulse Width Modulation*). Visto que este não possui recursos para operar diretamente como um DAC (conversor digital-analógico), foi necessário o uso de filtros passa-baixas para atenuar as componentes de alta frequência do sinal PWM e manter a componente DC, gerando uma tensão de referência análoga ao sinal antes produzido pelos movimentos dos sticks. Após a montagem do experimento em protoboard, fez-se modificações e derivações em vários pontos do hardware permitindo realizar testes medições de sinais variados, corrigindo então possíveis erros. Dessa maneira, foram usadas quatro saídas PWM do arduino, cada uma com seu próprio filtro passa-baixas, conectadas nas entradas de cada canal relacionado aos movimentos, mas possuindo uma referência de terra comum a todos.

Para testar o sistema foram usados quatro potenciômetros, cada um responsável por controlar os movimentos do veículo, como mostrado na figura 4. Deste modo, usando o osciloscópio e o display do rádio controle, foi possível comparar a saída esperada e saída real. Observado o sucesso do teste inicial, foram usados quatro sensores ultrassom HSR-HC04 para variar o sinal de tensão e controlar os movimentos de atitudes da aeronave, de acordo com a distância do obstáculo detectado e assim implementar o método para o veículo desviar dos obstáculos.

Figura 4 - Protótipo do Controle: Alterações na Placa do Rádio Controle



Fonte: Compilação do autor

#### 4.2 MÉTODOS PARA A AERONAVE IDENTIFICAR OBSTÁCULOS

Para o veículo identificar e desviar de possíveis obstáculos encontrados em seu percurso, teve como proposta o uso de quatro sensores de ultrassom HC-SR04

posicionados: na parte frontal, lateral esquerda e direita e na parte inferior do VANT. Dessa forma, quando o sensor frontal indicar a distância do obstáculo à frente da aeronave, os sensores posicionados nas laterais determinam a direção que o veículo deve seguir: esquerda, caso a distância indicada pelo sensor da lateral direita seja menor; e direita, caso a distância do sensor da lateral esquerda seja menor. Do mesmo modo, o sensor posicionado na parte inferior controla o movimento vertical, subir e descer, além de auxiliar na decolagem e pouso da aeronave.

## 5 SISTEMA DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMO

O sistema de navegação autônomo consiste em um suporte de hardware e software auxiliados por sensores de presença combinados com um receptor GPS (*Global Positioning System*), sendo seu principal objetivo, guiar o VANT por trajetórias previamente introduzidas e desviar de obstáculos encontrados em seu caminho (Alvané, 2014). Para tal, o sistema será composto por dois controles nebulosos responsáveis de efetuar a combinação entre os dados recebidos, traduzindo-se em comandos de voo da aeronave. Sendo um responsável por identificar e desviar dos obstáculos através da análise das informações medidas pelos sensores ultrassom e o outro tem o compromisso de determinar a posição no espaço de trabalho e corrigir o percurso da aeronave a partir das informações processadas pelo sensor de GPS. Para o desenvolvimento dos controladores nebulosos, foram utilizados as bases teóricas e os métodos encontrados em (PENG-YA, 2018), (Shaw e Simões, 2007), e (SILVA, 2017).

### 5.1 CONTROLADOR FUZZY PARA O VEÍCULO DESVIAR DE OBSTÁCULOS

O objetivo deste controlador é fazer a aeronave desviar dos obstáculos encontrados ao longo do caminho, isso implica em receber informações dos sensores ultrassônicos sobre a presença, distância e direção dos obstáculos. E com base nas informações recebidas, avaliar a necessidade de mudar de caminho ou não. Assim, o controlador possui quatro entradas referentes aos sensores ultrassônicos HC-SR04 e as saídas de controle são os sinais PWM filtrados, aplicados aos canais vertical, *pitch* e *roll*. No entanto, para este controlador, não foi utilizado o canal *yaw*, pois os movimentos controlados por esta atitude, podem ser realizados pela combinação dos comandos aplicados nos canais *pitch* e *roll*.

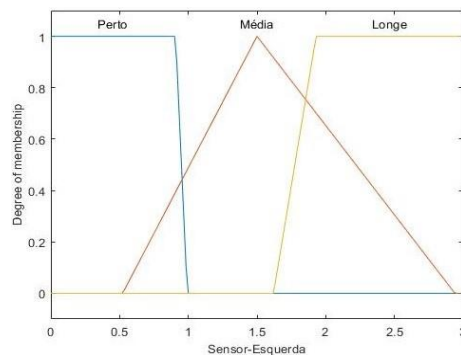
Na fuzzificação do controlador fuzzy, foram definidas como funções de pertinência das entradas, as distâncias dos obstáculos, obtidos a partir dos sensores



ultrassom HSR-HC04 acoplados ao quadricóptero. Cada entrada, foi projetada com três funções de pertinência do mesmo nome – Perto, Média e Longe, e formato geométrico, conforme apresentado na figura 5. As funções de pertinência foram limitadas a faixa de [0, 3] metros, que representa o alcance de medição segura dos sensores ultrassom. De forma que, as variáveis linguísticas Perto e Longe foram definidas no formato trapezoidal e a variável linguística Média no formato triangular. Todos os valores de domínio foram encontrados por meio de tentativas, até que fossem encontrados valores que permitissem que o controlador pudesse atingir o equilíbrio.

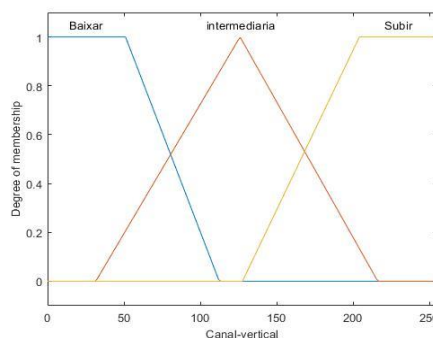
As funções de pertinência das saídas *Roll*, *Pitch* e *Vertical* estão relacionadas ao sinal PWM aplicado aos canais de transmissão. Sendo que, o universo discurso foi limitado em uma faixa de [0, 255] que representa os limites da saída digital. Assim, cada saída foi projetada por três funções linguísticas, sendo que cada conjunto nebuloso representa os movimentos dos sticks e consequentemente os movimentos da aeronave, figura 7. A função triangular define o conjunto que representa o *stick* parado enquanto as funções trapezoidais definem os conjuntos responsáveis pelos movimentos longitudinais dos *sticks*.

Figura 1 - Entrada referente ao Sensor Esquerda do sistema fuzzy: Função pertinência relacionada à distância.



Fonte: Compilação do autor

Figura 2 Saída Canal – Vertical do Sistema de Fuzzy: Função pertinência associada ao sinal de tensão



Fonte: Compilação do Autor

Para a construção da base de regras foi usado como ferramenta o Editor de Regras do *Toolbox Fuzzy MATLAB* (MATHWORKS., 2020), figura 9. Esta ferramenta permitiu construir as instruções de regras automaticamente, com base nas descrições das variáveis de entrada e saída. Cada regra do controlador nebuloso utiliza a operação básica de interseção baseada no modelo da equação (1). Na qual,  $x_n$  corresponde as variáveis linguísticas de entrada, ou seja, os dados dos sensores ultrassom e  $A_n$  corresponde as partições nebulosas das variáveis linguísticas, representada pelos termos Perto, Longe e Media. E  $u_m$  corresponde aos parâmetros de saída do sistema, neste caso a tensão e  $B_m$  representada as partição nebulosa, correspondente aos movimentos dos *sticks*.

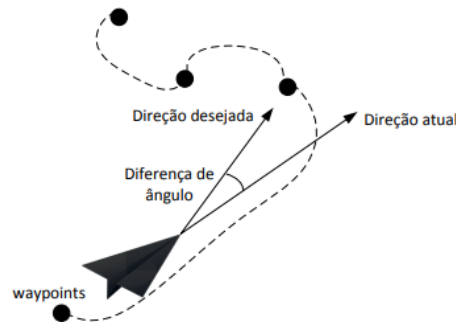
$$R^i = \text{se } x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } \dots x_n \text{ é } A_n \text{ então } u_1 \text{ é } B_1 \text{ e } \dots u_m \text{ é } B_m \quad (1)$$

O defuzzificador do controlador proposto é do tipo Mamdani e usa o Centroide (ou centro de área), para converter a informação do domínio nebuloso para o domínio real, no caso os sinais de tensão aplicado nos canais de transmissão. Este método de defuzzificação embora seja uma aproximação, é bastante utilizado e consiste em uma técnica onde o valor de saída é o centro da gravidade da função de distribuição da possibilidade da ação de controle. A informação convertida pela defuzzificação é o valor em bits que deve ser acrescido ou decrescido do tempo em que as portas digitais da placa microcontrolada devem manter uma tensão para alimentar as entradas de cada canal, referentes aos movimentos de atitudes da aeronave.

## 6 CONTROLADOR FUZZY PARA NAVEGAÇÃO DO VEÍCULO

Para a navegação do VANT, são pré-carregados as informações dos pontos inicial e final com as respectivas latitudes e longitudes definidas, figura 7. Essas informações são recebidas por meio de GPS e transformadas em coordenadas geográficas no formato de graus decimais. Assim, é possível calcular a distância e o ângulo da diferença entre a direção desejada e direção atual, através da fórmula de Haversine (KAVIYARASU et al, 2019).

Figura 3 - Diferença de ângulo entre direção desejada e atual,



Fonte: Adaptado de (Alvané, 2014).

Dessa forma, aplicando a fórmula de Haversine é possível, através das equações 2, 3 e 4, calcular a distância entre dois *waypoints* que, combinada com a diferença entre a direção atual e o posicionamento absoluto do Norte, dá origem à diferença de ângulo entre rota desejada e rota atual.

$$a = \sin^2\left(\frac{\Delta\varphi}{2}\right) + \cos\varphi_1 * \cos\varphi_2 * \sin^2\left(\frac{\Delta\gamma}{2}\right) \quad (2)$$

$$c = 2 * \text{atan2}(\sqrt{a} * \sqrt{1-a}) \quad (3)$$

$$d = R * c \quad (4)$$

Onde:

- R: Raio da Terra (R = 6371 Km);
- $\varphi$ : Latitude;
- $\gamma$  Longitude.
- a: Quadrado de metade da distância entre os WP;
- c: Distância angular em radiados;
- d: distância geográfica entre pontos.

Em que a função *atan2* permite a devolução do quadrante do ângulo entre os dois pontos (y, x). Para calcular a diferença de ângulo entre as duas posições:

$$y = \sin(\Delta\gamma) * \cos\varphi_2 \quad 5$$

$$x = \cos\varphi_1 * \sin\varphi_2 - \cos\varphi_2 * \sin\varphi_1 * \cos\Delta\gamma \quad 6$$

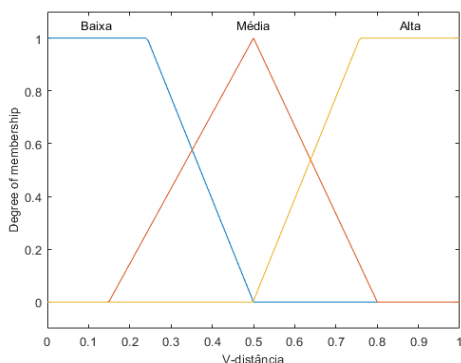
$$\theta = \text{atan2}(y, x) \quad 7$$

A partir das equações 5, 6 e 7 é possível obter o ângulo de rotação  $\theta$  necessário para o drone se direcionar em linha reta para a posição destino.

Assim, os parâmetros das entradas, para este sistema nebuloso, foram definidos a partir do erro angular e erro da proporção entre a distância da posição atual e da posição anterior da aeronave em relação ao ponto de destino, conforme apresentado na figura 8 e 9. Para a entrada que representa o erro entre as distâncias, foi projetada com três funções de pertinência - Baixa, Média e Alta. O universo discurso foi limitado a faixa de [0, 1], que representa a proporção do erro entre as duas distancias. De forma que, as variáveis linguísticas Baixa e Alta foram definidas no formato trapezoidal e a variável linguística Média no formato triangular..

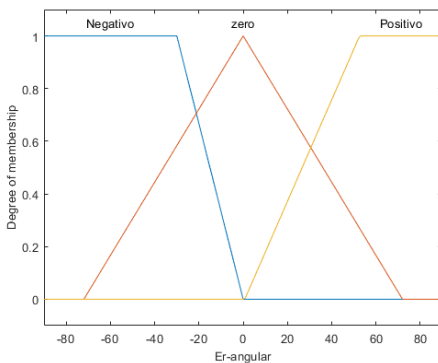
A segunda entrada diz respeito ao erro angular relacionado a direção desejada em relação a direção atual do VANT. Para essa entrada, foram construídas 3 funções de pertinências representadas pelas variáveis linguísticas Positivo, Negativo e Zero. . O universo discurso foi limitado a faixa de [-90, 90], para as variáveis linguísticas Positivo e Negativa no formato trapezoidal e zero na forma triangular.

Figura 4- Entrada referente a proporção do erro entre as distancias.: Função pertinência relacionada à posição da aeronave.



Fonte: Compilação do Autor

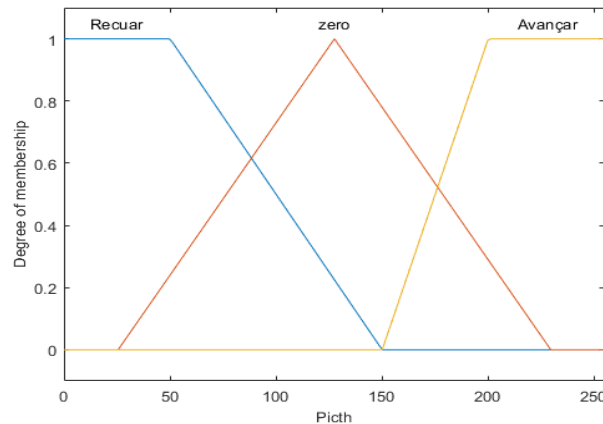
Figura 5 Entrada referente a angular.: Função pertinência relacionada ao ângulo entre a rota desejada e atual da aeronave.



Fonte: Compilação do Autor Para este controle, o canal vertical deve ser excitado por um valor de tensão constante que estabelece a altitude antes da partida do veículo. Da mesma forma que foi apresentado em 6.1, foram construídas funções pertinências das saídas, relacionadas ao sinal PWM aplicado aos canais de transmissão pitch e holl. O universo discurso foi limitado em uma faixa de [0, 255] e cada saída foi projetada por três funções linguísticas, sendo que cada conjunto nebuloso representa os movimentos dos sticks e

consequentemente os movimentos da aeronave, figura 10. A função triangular define o conjunto que representa o stick parado enquanto as funções trapezoidais definem os conjuntos responsáveis pelos movimentos longitudinais dos sticks.

Figura 6 - Saída Pitch – Vertical do Sistema de Fuzzy: Função pertinência associada ao sinal de tensão.



Fonte: Compilação do Autor

Assim como apresentado em (5.1), a base de regras foi construída usando o- Editor de Regras do *Toolbox Fuzzy MATLAB*. Para a inferência de cada regra, foi utilizada a operação de interseção, baseada no modelo da equação (1). Na qual,  $x_n$  corresponde as variáveis linguísticas de entrada e  $A_n$  corresponde as partições nebulosas das variáveis linguísticas.  $u_m$  caracteriza a saída do sistema em níveis de tensão e  $B_m$  representada as partição nebulosa, correspondente aos movimentos dos *sticks*. O defuzzificador é do tipo Mamdani e método usado foi o Centroid. As informações convertidas pela defuzzificação, consiste no valor em bits que deve ser acrescentado ou decrescido do tempo em que as portas digitais da placa microcontrolada devem manter uma tensão para alimentar as entradas de cada canal, referentes aos movimentos pitch e roll da aeronave.

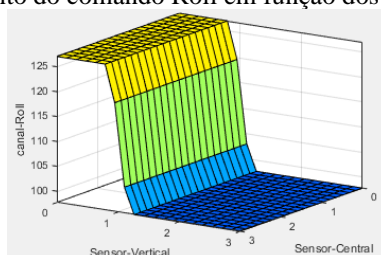
## 7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os movimentos de atitude da aeronave apresentaram uma resposta adequada aos sinais microprocessador e filtrados. Tal eficácia, corresponde a capacidade do filtro passa-baixas em retirar toda as componentes AC do sinal PWM gerado pelo arduino. Para alcançar esse resultado, a frequência da onda gerada pelo arduino,  $F_{PWM}$ , deve ser maior do que a frequência de banda passante  $F_{bw}$ . Assim, o clock do Arduino deve ser configurado para operar na frequência de  $F_{PWM} = 7,81kHz$  com um resistor de  $10k\Omega$  e um capacitor  $100nf$ , de forma que  $F_{bw}$  opere em uma frequência de  $100 kHz$ .

Por meio das simulações computacionais, foi possível observar o comportamento das saídas do sistema em relação a variação dos conjuntos nebulosos das entradas e o

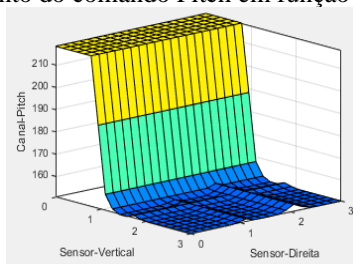
ajustes da base de regras. As superfícies obtidas com a aplicação do método proposto, exibidas nas figuras (11, 12 e 13), mostram o ciclo de trabalho de cada saída do controlador para o veículo desviar dos obstáculos em função das distâncias medidas pelos sensores ultrassom e as superfícies (14 e 15) mostram o comportamento das atitudes Pitch e Roll do controle de navegação, em função do erro angular e da distância da aeronave do ponto de chegada. Ainda, como apresentado em (Shaw e Simões, 2007), foi observado que 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 exige maior tempo de processamento do algoritmo e maior quantidade de memória. Assim, a partir desses resultados foi possível obter as informações para implementar o controle *fuzzy* em linguagem C, utilizando a placa Arduino.

Figura 11 - Comportamento do comando Roll em função dos sensores vertical e central.



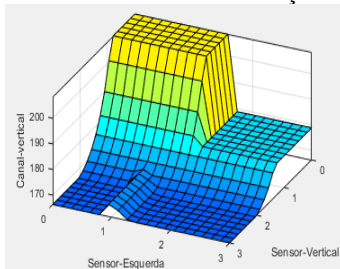
Fonte: Compilação do Autor

Figura 12 - Comportamento do comando Pitch em função sensores vertical e direita.

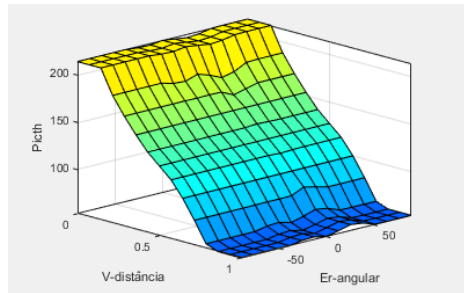


Fonte: Compilação do Autor

Figura 13 - Comportamento do comando Vertical em função dos sensores vertical e esquerda.

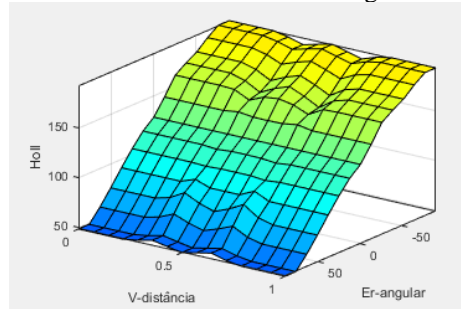


Fonte: compilação do Autor



Fonte 7 Compilação do Autor

Figura 8 Comportamento do comando Holl do erro angular e erro entre as distâncias.



Fonte: Compilação do Autor

## REFERÊNCIAS

ALVANÉ, T. A. G. *Navegação de Drones via GPS*. 2014. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Eletrônica e Telecomunicações, Universidade de Aveiro, Portugal. 2014.

DASH J.P. et al. Assessing very high resolution uav imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.131, p.1–14, Julho de 2017. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007

Eltner.A. et al. Multi-temporal uav data for automatic measurement of rill and interrill erosion on loess soil. *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 40, n. 6, p.741–755, Novembro 2014, doi.org/10.1002/esp.3673.

ENGEL, J.; STURM, J.; CREMERS, D. Tum AR. Drone. 2014. Disponível em: Acesso em: 25.08l. 2020.

GONCALVES, J; RENATO, H. Uav photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v.104, p. 101–111, Fevereiro de 2015. doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009.

KAVIYARASU, A; SARAVANAKUMAR. A; VENKATESH, M. Hardware in Loop Simulation of a Way Point Navigation Using Matlab/Simulink and X-Plane Simulator, 2019 International Conference on Intelligent Sustainable Systems (ICISS), Palladam, Tamilnadu, India, p. 332-335, 2019. doi: 10.1109/ISS1.2019.8908103.

MAC, T; COPOT, C; KEYSER, R. D; IONESCU, C. M. The development of an autonomous navigation system with optimal control of an UAV in partly unknown indoor environment. *Mechatronics*. v. 49, p.187-196, Fevereiro de 2018, doi.org/10.1016/j.mechatronics.2017.11.014

MADRUGA, S. P. *PROJETO DE SISTEMA DO CONTROLE EMBARCADO PARA CONTROLE DE VOO DE QUADRICÓPITERO*. 2018. 99 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Informática, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. 2018.

MATHWORKS. [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/>>. Acesso em: 27 08 2020.

MELO, A. S. D. *IMPLEMENTAÇÃO DE UM QUADROTOR COMO PLATAFORMA DE DESENVOLVIMENTO PARA ALGORITMOS DE CONTROLE*. 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

PENG-YA, X; YUN-JIE, W; JING-XING, Z; LING, C. Longitudinal attitude control of UAV based on fuzzy PID, 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (GNCC), Xiamen, China, p. 1-5, 2018. doi: 10.1109/GNCC42960.2018.9019030.



PENHA NETO, G; VELHO, F.C; IDEITI S. E. UAV AUTO.NOMOUS NAVIGATION BY DATA FUSION AND FPGA. *Mecânica Computacional*, Santa Fé, v .37, p. 609-618, novembro de 2019.

SANTANA, L. V. *SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO E CONTROLE PARA VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS E SUAS APLICAÇÕES*. 2016. 153 f. Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Espírito Santo. 2016.

SANTOS, A. H. L. *IDENTIFICAÇÃO E CONTROLE DE ALTITUDE DE UM QUADRIRROTOR*. 2018. 68 f. Tese (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica -Universidade Federal do Amazonas, 2018.

SHOUFAN, A. et al. Drone Pilot Identification by Classifying Radio-Control Signals, in *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 13, no. 10, pp. 2439-2447, Outubro de 2018, doi: 10.1109/TIFS.2018.2819126.

SILVA, R. C. *CONSTRUÇÃO E CONTROLE DE UM VEÍCULO QUADRIRROTOR USANDO LÓGICA NEBULOSA*. 2017. 74 f. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista – UNESP - Câmpus de Ilha Solteira, São Paulo. 2017.

SIMÕES, M. G; SHAW, I.S. *Controle e Modelagem Fuzzy*.2. ed. São Paulo: Blücher: FAPESP, 2017.185 p.

ȚIGĂERU, L. System on Chip Implementation of a Fuzzy Logic Based Autonomous Robot Navigation System, 2019 IEEE 25th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging (SIITME), Cluj-Napoca, Romania, p. 236-239, 2019. doi: 10.1109/SIITME47687.2019.8990702.

TINETTI, F. G; VALDERRAMA, O. C.; ROMERO, F. L. Unmanned Vehicles: Real Time Problems in Drone Receivers, 2019 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI), Las Vegas, NV, USA, p. 1080-1085, 2019. doi: 10.1109/CSCI49370.2019.00205.

WOODS, A. C; LA, H. M. A Novel Potential Field Controller for Use on Aerial Robots, in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, v. 49, n. 4, p. 665-676, Abril 2019, doi: 10.1109/TSMC.2017.2702701.

YEPES, IGOR. *Robótica Educativa: Drones e Novas Perspectivas*. RENOTE, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, V. 16 Nº 2, dezembro de 2018. DOI: 10.22456/1679-1916.