

YURI LIMA ALMEIDA

**SISTEMAS NEURO-FUZZY APLICADOS NO CONTROLE
DE UMA AERONAVE DE ASA FIXA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

YURI LIMA ALMEIDA

SISTEMAS NEURO-FUZZY APLICADOS NO CONTROLE DE UMA
AERONAVE DE ASA FIXA

Monografia apresentada
ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecatrônica da
Universidade Federal de
Uberlândia, com parte dos
requisitos para a obtenção do
título de **BACHAREL EM
ENGENHARIA
MECATRÔNICA.**

Orientador: Prof. Dr. Roberto
Mendes Finzi Neto

Uberlândia – MG

2019



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECATRÔNICA



ATA DE DEFESA DE PROJETO DE FIM DE CURSO II

NÚMERO DE ORDEM: 220/2019

Às quatorze horas do décimo nono dia do mês de fevereiro de dois mil e dezenove, no Bloco 1M, Sala de Reuniões da FEMEC, no Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelo professor Roberto Mendes Finzi Neto, da Faculdade de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Uberlândia, e os Engenheiros Bruno Luiz Pereira, e Felipe Machini Malachias Marques, alunos de doutorado da Pós-Graduação da FEMEC-UFU, sob a presidência do primeiro, para desenvolver o processo de avaliação do **Projeto de Fim de Curso II**, intitulado **"SISTEMAS NEURO-FUZZY APLICADOS NO CONTROLE DE UMA AERONAVE DE ASA FIXA"**, apresentado pela aluna **RENATA BERNARDES – MATRÍCULA 11411EMT012** em atendimento aos requisitos determinados pelo Projeto Pedagógico do Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica. Após discorrer sobre seu trabalho, o candidato foi arguido pelos membros da Banca, diante das comunidades universitária e externa. Em seguida, a defesa do trabalho foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram aprovada. As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 30 (trinta) dias corridos a contar da data da defesa, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a Ata que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca.

Assinaturas:

Prof. Dr. Roberto Mendes Finzi Neto / (Orientador)

Eng. MSc. Bruno Luiz Pereira

Eng. MSc. Felipe Machini Malachias Marques

19 de fevereiro de 2019

Agradecimientos

Resumo

de controle da aeronave durante o voo é a principal causa de morte em acidentes aéreos. Devido a isso torna-se de suma importância o desenvolvimento de um sistema de controle eficiente, que muitas das vezes não consegue ser obtido através das técnicas clássicas. Neste trabalho é realizado o controle de uma aeronave de asa fixa utilizando Sistemas *Neuro-fuzzy*, com parâmetros obtidos através da Evolução Diferencial e do Recozimento Simulado. Utiliza-se o *software* MatLab® para a obtenção do controlador e para a avaliação do desempenho e estabilidade do sistema. Os resultados obtidos indicam que o controlador é capaz de compensar eventuais perturbações no sistema. Além disso, o Recozimento Simulado requer um tempo menor de execução para obter a solução desejada, em contrapartida, este método apresenta maior desvio padrão dos resultados, o que sugere maior aleatoriedade e imprecisão que o método da Evolução Diferencial.

Palavras-chave: controle inteligente, Sistemas Neuro-fuzzy, Evolução Diferencial, Recozimento Simulado, desempenho, estabilidade.

Abstract

The loss of the aircraft's control during the flight is the main cause of deaths in plane crashes. For this reason, it is of great importance to develop an efficient controller, that many times cannot be obtained through the basic techniques. In this project it is performed the control of a fixed-wing airplane using neuro-fuzzy systems, with parameters obtained through Differential Evolution and from Simulated Annealing. It is used MatLab® *software* to obtain the controller and to evaluate the system's performance and stability. The obtained results indicate that the controller is capable of compensating eventual system disturbances. Furthermore, the Simulated Annealing shows a shorter time of execution to find the optimum controller, by contrast, this method shows a higher standard deviation of the results, which suggests a higher randomness and imprecision than the Differential Evolution method.

Keywords: intelligent control, Neuro-fuzzy systems, Differential Evolution, simulated annealing, performance, stability.

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

Lista de Símbolos

a_i^l - variável de saída do neurônio i da RNA
 b_i^l - bias associado ao neurônio i
 Cf - função custo
 $C_{i,k}$ - vetor de cruzamento da Evolução Diferencial
 CR - taxa de cruzamento
 dt - tempo de amostragem
 E^k - energia interna da solução k
 F - fator de perturbação
 f_{obj} - função objetivo
 h - altitude
 I_{CG} - momento de inércia do centro de gravidade da aeronave
 I_x - momento de inércia em relação ao eixo x
 I_y - momento de inércia em relação ao eixo y
 I_z - momento de inércia em relação ao eixo z
 I_{xz} - produto de inércia relativamente a x e z
 L - momento de rolagem da aeronave
 L_0 - valor nominal de momento de rolagem
 M - momento de arfagem da aeronave
 M_0 - valor nominal de momento de arfagem
 m - massa do sistema
 N - momento de guinada da aeronave
 N_0 - valor nominal de momento de guinada
 n_e - número de elementos dos vetores
 P - velocidade angular de rolagem da aeronave
 P_0 - valor nominal da velocidade angular de rolagem
 p - perturbação da velocidade angular de rolagem
 p_{RM} - probabilidade em se aceitar um ponto com maior energia interna
 Q - velocidade angular de arfagem da aeronave
 Q_0 - valor nominal da velocidade angular de arfagem
 q - perturbação da velocidade angular de arfagem
 R - velocidade angular de guinada da aeronave
 R_0 - valor nominal da velocidade angular de guinada
 r - perturbação da velocidade angular de guinada
 $R_{x,\Phi}$ - matriz de transformação do sistema do corpo para o sistema inercial na direção x
 $R_{x,\Phi}^T$ - matriz de transformação do sistema inercial para o sistema do corpo na direção x
 $R_{y,\Theta}$ - matriz de transformação do sistema do corpo para o sistema inercial na direção y
 $R_{y,\Theta}^T$ - matriz de transformação do sistema inercial para o sistema do corpo na direção y
 $R_{z,\Psi}$ - matriz de transformação do sistema do corpo para o sistema inercial na direção z
 T - constante de tempo T_a - tempo de acomodação do sistema
 T^k - temperatura no instante k
 U - velocidade longitudinal da aeronave
 U_0 - valor nominal de velocidade longitudinal
 u - perturbação da velocidade longitudinal
 V - Velocidade lateral da aeronave
 V_0 - valor nominal de velocidade lateral
 $V_{i,k}$ - vetor de mutação da Evolução Diferencial

v - perturbação da velocidade lateral
 W - velocidade vertical da aeronave
 W_0 - valor nominal de velocidade vertical
 w - perturbação da velocidade vertical
 w_{ij}^l - peso sináptico associado ao neurônio i
 X - força longitudinal
 X_0 - valor nominal de força longitudinal
 X_E - posição x do eixo inercial da terra
 $X_{i,k}$ - vetor de inicialização da Evolução Diferencial
 x_k - valor de x (variável qualquer) no instante k
 x_{ref} - valor de x (variável qualquer) de referência
 Y - força transversal
 Y_0 - valor nominal de força transversal
 Y_E - posição y do eixo inercial da terra
 y_r - parâmetro de controle
 y_s - saída do controlador
 Z - força vertical
 Z_0 - valor nominal de força vertical
 Z_E - posição z do eixo inercial da terra
 α - fator utilizado no decaimento da temperatura no Recozimento Simulado
 δ_{ail} - deflexão do aileron da aeronave
 δL - perturbação do momento de rolagem
 δ_{lem} - deflexão do leme da aeronave
 δM - perturbação do momento de arfagem
 δN - perturbação do momento de guinada
 δ_{pr} - deflexão do profundor da aeronave
 δX - perturbação da força longitudinal
 δY - perturbação da força transversal
 δZ - perturbação da força vertical
 Θ - ângulo de arfagem da aeronave
 Θ_0 - valor nominal do ângulo de arfagem
 θ - perturbação do ângulo de arfagem
 σ - função de ativação da rede neural
 $\vec{\tau}_1$ - forças do sistema
 $\vec{\tau}_2$ - momentos do sistema
 Φ - ângulo de rolagem da aeronave
 Φ_0 - valor nominal do ângulo de rolagem
 ϕ - perturbação do ângulo de rolagem
 Ψ - ângulo de guinada da aeronave
 Ψ_0 - valor nominal do ângulo de guinada
 ψ - perturbação do ângulo de guinada

Glossário

ANFIS – Sistema de Inferência Neuro-*Fuzzy* Adaptativo (*Adaptative neuro-fuzzy inference system*)

ANN – Redes Neurais Artificiais (*Artificial Neural Network*)

CENIPA - Centro de Investigação e Prevenção de Acidentes Aeronáuticos

FIS – Sistema de Inferência *Fuzzy* (*Fuzzy Inference System*)

IA – Inteligência Artificial

PID - Proporcional-Integral-Derivativo

RNA – Rede Neural Artificial

SBRF – Sistema Baseado em Regras *Fuzzy*

VANTS – Veículos aéreos não tripulados

Conteúdo

1	Introdução	12
2	Objetivos	14
3	Justificativa	15
4	Fundamentação Teórica	16
4.1	Mecânica do Voo	16
5	Conclusão e trabalhos futuros	17
6	Referências Bibliográficas	18

1 Introdução

- Falha do motor em voo;
- Perda de controle no solo;
- Perda de controle em voo;

Além disso, registros mostram que o número de vítimas fatais é considerável. Dessa forma, é interessante que se desenvolva um controle de aeronaves que tenha como objetivo diminuir a ocorrência dos acidentes, garantindo assim, uma maior segurança para quem utiliza esse meio de transporte.

Devido a sua simplicidade e robustez, o controlador PID (Proporcional Integral Derivativo) é o principal método de controle utilizado hoje no mundo. Porém, quando dispomos de processos não lineares, que possuem variantes no tempo, estes controladores podem não responder de uma forma satisfatória (Gianelli, 2013). Existem então outras técnicas de controle capazes de se adaptar ao sistema complexo e fornecer uma resposta otimizada, uma delas é utilizando a Inteligência Artificial (IA) para a obtenção do controlador e sua estrutura matemática.

A Inteligência artificial, sendo um ramo de pesquisa da ciência da computação, tem como objetivo construir algoritmos capazes de simular a inteligência dos seres vivos e aplicá-la no processamento de informações. Estes algoritmos devem, a partir da combinação de grandes quantidades de dados, de forma rápida e interativa, aprender com informações ou padrões apresentados nos dados e tomar decisões. Algumas tecnologias englobadas dentro do ramo da IA são:

- **Rede neural:** estrutura composta de unidades interconectadas, denominadas neurônios. Estas unidades processam os dados de entrada e retransmitem às unidades seguintes, até se obter a resposta desejada.
- **Machine learning:** processo de automatização da construção de modelos analíticos que utiliza da técnica de redes neurais aliada à estatística, pesquisa de operações e física para que sejam encontrados pontos de interesse nos dados.
- **Visão computacional:** utiliza do reconhecimento de padrões em imagens para identificar e interpretar o que existe ao redor.

Hoje existem alguns avanços na área, como a criação de uma tecnologia de aprendizagem desenvolvida por cientistas na Universidade de Berkley, Califórnia, que permite aos robôs que os mesmos imaginem o futuro de suas ações, possibilitando a tomada de decisões a partir do futuro previsto (O FUTURO DAS COISAS, 2017).

Neste projeto, a IA é de grande importância para criar um controlador que tem como principal característica a adaptabilidade, obtendo os parâmetros de forma eficaz e rápida. As técnicas utilizadas para a criação do controlador são apresentadas abaixo:

- **Sistema Neuro-fuzzy:** sistema de hibridização das técnicas de modelagem de Redes Neurais e Sistemas de Inferência Fuzzy.
- **Evolução Diferencial:** método robusto de minimização de funções, utilizado para obtenção dos parâmetros do Sistema Neuro-fuzzy.
- **Recozimento Simulado:** método de minimização de funções originado da analogia do recozimento de metais, também utilizado para obtenção dos parâmetros do Sistema Neuro-fuzzy.

O projeto a seguir contará com: objetivos, justificativa, fundamentação teórica, onde será realizada uma breve revisão bibliográfica acerca do tema, metodologia, desenvolvimento, resultados e discussões, conclusão e trabalhos futuros e referências bibliográficas.

2 Objetivos

Esta monografia está inserida em um projeto desenvolvido por alunos, professores, mestrandos e doutorandos da Universidade Federal de Uberlândia que tem como objetivo principal o desenvolvimento de um controlador adaptativo inteligente aplicado a uma aeronave Cessna 172 em escala reduzida, possibilitando sua total autonomia durante os vôos, que é garantida pela estabilidade e pelo desempenho do controlador.

Como objetivos específicos, tem-se a utilização de técnicas *neuro-fuzzy* frequentemente utilizada na inteligência artificial e, a obtenção dos parâmetros deverá ser feita utilizando dois métodos diferentes (Evolução Diferencial e Recozimento Simulado), os quais serão comparados ao fim deste trabalho. Também será realizada a avaliação do sistema quando submetido à perturbações em suas variáveis de estado.

3 Justificativa

É importante que, na graduação, tenha-se a aplicação na prática das disciplinas apresentadas de forma teórica e didática durante o curso. O projeto em questão engloba desde disciplinas mais básicas até as mais complexas, como Programação Aplicada à Engenharia, Controle de Sistemas Lineares, Controle Digital de Sistemas e Inteligência Computacional (oferecida como optativa), cumprindo a proposta de um Projeto de Fim de Curso.

Finalmente, vislumbrando o desenvolvimento da pesquisa nessa área, esse projeto está inserido na tese de doutorado do aluno Bruno Luiz Pereira, que vem com uma proposta inovadora e gerando uma grande e importante contribuição para o meio científico.

4 Fundamentação Teórica

4.1 Mecânica do Voo

Esse item tem como objetivo fornecer uma breve introdução à modelagem dinâmica de uma aeronave. Para um estudo mais aprofundado pode-se utilizar como referência (Fossen, 2011) e (Roskam, 1997).

De acordo com Machini (2016) as equações do movimento para qualquer configuração tradicional de aeronave como helicópteros e aviões, podem ser derivadas a partir da segunda lei de Newton aplicada a corpos rígidos com 6 graus de liberdade, possuindo assim 3 graus de translação e 3 graus de rotação. Sendo assim, utiliza-se para a modelagem dois referenciais, sendo eles: um referencial inercial fixo à terra denotado por I_{cs} e outro baricêntrico fixo à aeronave capaz de transladar e rotacionar junto com a mesma B_{cs} . Uma vez que as forças e momentos, sejam elas aerodinâmicas ou inerciais, atuam no corpo, as equações do movimento são derivadas em relação ao referencial B_{cs} . Por consequência pode-se definir qualquer vetor escrito no referencial B_{cs} no referencial I_{cs} utilizando os ângulos de Euler. Estes representam a atitude da aeronave, que é definida por: arfagem (Θ), rolagem (Φ) e guinada (Ψ).

A definição das velocidades, posição ou ângulos e forças ou momentos podem ser visualizados a partir das Eq. (4.1), (4.2) e (4.3).

5 Conclusão e trabalhos futuros

O trabalho apresenta a aplicação de técnicas de controle inteligente na análise e controle do avião Cessna 172 em escala real, para isso faz-se necessária a realização da modelagem dinâmica da aeronave e do sistema de controle utilizado. São realizadas simulações envolvendo dois métodos diferentes de otimização, utilizados na obtenção dos parâmetros do controlador.

Observa-se que, para todas as análises de sistemas realizadas, o controlador agiu de forma efetiva, produzindo na entrada uma resposta evoluindo ao encontro do ponto de referencia definido.

Ambos os métodos de otimização utilizados se mostraram capazes de encontrar os parâmetros para se obter um controlador otimizado, porém, demonstraram características que diferem entre si e devem ser analisadas conforme comportamento e necessidades do problema a ser estudado. A Evolução Diferencial é um método que se mostra assertivo no cálculo do controlador, produzindo menores erros e uma constância na apresentação dos resultados, com desvio padrão relacionado ao erro RMS igual a zero para diferentes simulações. Apesar disso, possui um tempo de execução maior, comprometendo a eficiência do controlador na hipótese de ser utilizado em aplicação *online*. O Recozimento Simulado apresenta maior dispersão no erro RMS, podendo influenciar na resposta do controlador a cada simulação realizada. Em contrapartida, a média e o desvio padrão do tempo de execução do método é inferior, viabilizando sua utilização em aplicação *online*.

Vislumbrando trabalhos futuros, pretende-se observar o comportamento dos dois métodos apresentados quando utilizadas outras funções objetivo, a fim de melhorar a resposta do sistema controlado. Ainda, o desenvolvimento do controle de forma *online* se faz pertinente, uma vez que confere a adaptabilidade do controlador a condições extremas que modificam o comportamento do sistema.

6 Referências Bibliográficas

BATISTA, Rafael Gomes; MENEGHETTI, Carlos Renato. Sistema comparativo de controle inteligente de nível aplicado às lógicas *fuzzy* e *pid*. Unisal, jun. 2018.

BRASIL ESCOLA. Inteligencia artificial. Disponível em: <<https://brasilecola.uol.com.br/informatica/inteligencia-artificial.htm>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

CONTEUDO - USP. Redes neurais artificiais. Disponível em: <<http://conteudo.icmc.usp.br/pessoas/andre/research/neural/>>. Acesso em: 29 mai. 2018.

FOSSEN, Thor I. Mathematical models for control of aircraft and satellites: subtítulo do livro. 2 ed. Department of Engineering Cybernetics, NTNU, 2001. 31 p.

FTP - UNICAMP. Redes neurais artificiais. Disponível em: <ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ia006_03/topico5_03.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2018.

Gianelli, C. A., “Estudo Comparativo entre Controle Adaptativo e Controle Fuzzy”, Monografia, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil, 2013.

GOMIDE, Fernando A. C.; GUDWIN, Ricardo R.; TANSCHKEIT, Ricardo. Conceitos fundamentais da teoria de conjuntos fuzzy, lógica fuzzy e aplicações. Proceedings of 6th international fuzzy systems association (ifsa) conference, São paulo, 1995.

HAN, Ming-Feng; LIN, Chin-Teng; CHANG, Jyh-Yeong. Differential Evolution With Local Information for Neuro-Fuzzy Systems Optimisation. Knowledge-Based Systems, Taiwan, v. 44, p. 78-89, fev. 2013.

HAYKIN, Simon. Redes neurais : Princípios e prática. 2 ed. Hamilton, Ontário, Canadá: Bookman, 2001.

KIRKPATRICK, S.; JR., C. D. Gelatt; VECCHI, M. P.. Optimization by simulated annealing. Science , [S.L.], v. 220, n. 4598, p. 671-680, mai. 1983.

MACHINI, F. M. M., “Modelagem, Simulação e Controle de uma Aeronave Multirrotora”, Monografia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2016.

MAXWELL - PUC - RIO. Sistemas neuro-fuzzy. Disponível em: <https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/32823/32823_5.pdf>. Acesso em: 30 mai. 2018.

MTC - M . Capítulo 5 recozimento simulado (simulated annealing). Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/01.20.19.25/doc/cap5.pdf?metadatarepository=&mirror=sid.inpe.br/mtc-m19@80/2009/08.21.17.02.53>>. Acesso em: 25 mai. 2018.

O FUTURO DAS COISAS. Robôs agora podem visualizar o próprio futuro. Disponível em: <<https://ofuturodascoisas.com/robos-agora-podem-visualizar-o-proprio-futuro/>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

PADILHA, Bruno Ricardo; ZAIONS, Douglas Roberto; SPULDARO, Everton. Projeto aerodinâmico, estabilidade e controle de um veículo aéreo não tripulado (vant) de asa fixa. Unoesc, jan. 2012. Disponível em: <<https://editora.unoesc.edu.br/index.php/acet/article/download/1515/pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2019.

PEQ DR. Método de recozimento simulado (simulated annealing). Disponível em: <http://www2.peq.coppe.ufrj.br/pessoal/professores/arge/coq897/naturais/aulas_piloto/aula2.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2018.

PEREIRA, B. L. “Aplicação de Sistemas Neuro-Fuzzy e Evolução Diferencial na Modelagem e Controle de Veículo de Duas Rodas”, Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, Brasil, 2017

ROSKAM, Jan; LAN, Chuan-tau Edward. Airplane aerodynamics and performance. 1 ed.

KANSAS: Design, Analysis and Research Corporation(DARcorporation), 1997. 699 p.

SAS. Inteligencia artificial. Disponível em: <https://www.sas.com/pt_br/insights/analytics/inteligencia-artificial.html>. Acesso em: 10 jan. 2019.

SISTEMA CENIPA. Aviação sumário estatístico. Disponível em: <http://sistema.cenipa.aer.mil.br/cenipa/paginas/arquivos/avioes_sumario_estatistico.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2019.

STORN, Rainer; PRICE, Kenneth. Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces. Journal of Global Optimization, Netherlands, v. 11, p. 341-359, Novembro 1996.

TAFNER, Malcon Anderson. Redes neurais artificiais: aprendizado e plasticidade,. Cérebro&mentev. 2, n. 5, Março/Maio 1998.

USPNET- USP. Sistemas fuzzy lógica fuzzy e sistemas baseados em regras fuzzy. Disponível em: <http://each.uspnet.usp.br/sarajane/wp-content/uploads/2015/06/2015-sistemas_fuzzy.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2018 .

Valavanis, K.P., 2007.Advances in Unmanned Aerial Vehicles. Vol. 33, Springer, ISBN 978-1-4020-6113-4.

ZADEH, L.a. Fuzzy sets*. Information and control, v. 8, n. 3, p. 338-353, Junho 1965.