

## 15º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2024

### ADAPTAÇÃO DO MÉTODO DE PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO DIFUSO PARA AVALIAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE

RICARDO MASSON NARDINI<sup>1</sup>, GIOVANNA FERNANDES PÓLVORA<sup>2</sup>, KAWAN R. MENDES  
DO AMARAL<sup>3</sup>, ALEXANDRE BRINCALEPE CAMPO<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia Eletrônica, Bolsista PIBIC/IFSP, IFSP, Campus São Paulo, [nardini.r@aluno.ifsp.edu.br](mailto:nardini.r@aluno.ifsp.edu.br).

<sup>2</sup> Graduando em Engenharia Eletrônica, Voluntário, IFSP, Campus São Paulo, [giovanna.polvora@aluno.ifsp.edu.br](mailto:giovanna.polvora@aluno.ifsp.edu.br).

<sup>3</sup> Graduando em Engenharia Eletrônica, Voluntário, IFSP, Campus São Paulo, [kawan.rokiston03@gmail.com](mailto:kawan.rokiston03@gmail.com).

<sup>4</sup> Professor, Orientador, IFSP, Campus São Paulo, [brinca@ifsp.edu.br](mailto:brinca@ifsp.edu.br).

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.00.00.00-9 Engenharias

**RESUMO:** O presente artigo apresenta um estudo sobre a aplicação do método FAHP (Processo Analítico Hierárquico Difuso) no auxílio de tomada de decisão. O objetivo da análise é utilizar esse método para realizar uma comparação hierárquica entre um controlador baseado em lógica fuzzy e um controlador PID, ambos em um sistema de malha fechada. O método foi implementado em um kit didático de robótica mole com um atuador controlado por pressão. Para a aplicação do método FAHP, foi desenvolvido um código em Python, que descreve a hierarquia do problema e os pesos de cada critério estabelecido. O parâmetro de comparação entre os ajustes foi o valor do erro absoluto de cada controlador, que considera a diferença entre o valor medido e o valor do setpoint. Constatou-se que a aplicação do método FAHP ajudou na tomada de decisão ao identificar qual controlador oferece o melhor desempenho de acordo com os critérios estabelecidos e isso ocorre porque o método combina diversas técnicas para lidar com decisões em processos didáticos e de engenharia.

**PALAVRAS-CHAVE:** FAHP (Processo Analítico Hierárquico Difuso); Robótica mole; Lógica fuzzy; métodos multicritérios.

#### ADAPTATION OF THE FUZZY ANALYTIC HIERARCHY PROCESS METHOD FOR CONTROL SYSTEM EVALUATION

**ABSTRACT:** This paper presents a study on the application of the FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) method to support decision making. The goal of the analysis is to use this method to perform a hierarchical comparison between a fuzzy logic-based controller and a PID controller, both in a closed-loop system. The method was implemented in an educational soft robotics kit with a pressure-controlled actuator. For the application of the FAHP method, a Python code was developed that outlines the problem hierarchy and the weights of each established criterion. The comparison parameter between the adjustments was the absolute error value of each controller, considering the difference between the measured value and the setpoint. It was found that the application of the FAHP method assisted in decision-making by identifying which controller provides the best performance according to the established criteria. This occurs because the method combines various techniques to address decisions in educational and engineering processes.

**KEYWORDS:** FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process); Soft Robotics; Fuzzy logic; multicriteria methods.

## INTRODUÇÃO

Nos dias atuais, novas técnicas de ensino são necessárias na melhora do aprendizado dos estudantes e para o desenvolvimento de habilidades essenciais na indústria. Na área de engenharia, o uso de tecnologias de ensino como a realidade aumentada, ajudam na performance dos alunos e melhoram a sua interação com educadores, encorajando o aprendizado em grupo, na solução de problemas e no desenvolvimento de habilidades de comunicação (Nava-Pintor, 2021). O *Kit de Soft Robotics* segue essa linha de pensamento, adicionando simulações e testes práticos para aprimorar o raciocínio, auxiliando no desenvolvimento de habilidades em equipe, sendo útil no controle de sistemas em malha fechada.

O processo de tomada de decisão é formado por diversas escolhas, em que cada pessoa participa analisando e escolhendo entre as alternativas e, como trata-se de pessoas escolhendo, o processo pode prejudicar a análise e o resultado final, pois o que se vê e interpreta influencia o que se aprecia e deseja e vice versa. As pessoas decidem em função da percepção da situação, trabalhando mais como processadoras de informações do que tomadoras de decisões, por esse e outros motivos o uso dos métodos multicritérios agregam tanto valor no auxílio à tomada de decisão, pois trazem uma clareza para problemas considerados complexos, o que seria impossível com procedimentos de natureza monocritérios (Freitas; Martins; Souza, 2006).

## MATERIAL E MÉTODOS

### CONTROLADOR DIFUSO

Antes de fazer a comparação hierárquica entre dois tipos de controladores com o método FAHP, foi desenvolvido o controlador com lógica difusa (Fuzzy). A Lógica Fuzzy pode ser analisada como uma lógica de conjuntos, onde o objeto em análise pode fazer parte de um ou mais conjuntos, mas com pesos diferentes.

Para se projetar um controlador difuso (FUZZY) é necessário realizar os seguintes passos:

- Identificação das variáveis de entrada e de saída do controlador.
- Criação dos conjuntos difusos relacionados a cada variável do sistema.
- Elaboração das regras de inferência.
- Escolha do procedimento de geração do valor de saída (CRISP).
- 

Observe a figura 1 abaixo:

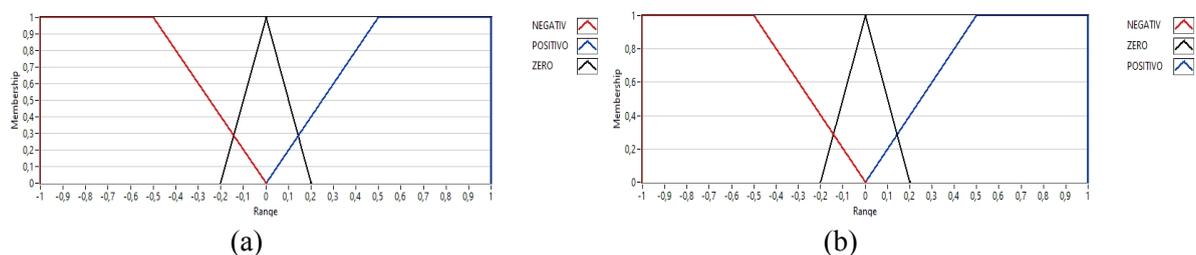


FIGURA 1. (a) Erro; (b) Va - Output (Fonte: autores)

Essa figura é o gráfico de conjuntos difusos do controlador FUZZY aplicado no Kit de *Soft Robotics*, tendo sido criado utilizando o LabVIEW. A figura 1.(a) representa a variável ERRO. Nesse gráfico, é feita a análise da pertinência da pressão do atuador com os conjuntos, ou seja, para determinados níveis de pressão a variável vai pertencer a diferentes conjuntos. Há três tipos de erros: ERRO NEGATIVO, ERRO POSITIVO E ERRO ZERO; onde para cada conjunto o controlador irá incrementar ou decrementar no valor de saída CRISP.

A figura 1.(b) é o gráfico de conjuntos difusos de Va (Output), em outras palavras são os conjuntos responsáveis por determinar a saída do controlador, valor (CRISP). Esse valor de saída é o PWM aplicado na válvula proporcional, parte que controla a pressão de saída aplicada no atuador.

### SOFTWARE DE TESTES:

Com a lógica FUZZY em mãos, foi necessário também desenvolver um ambiente para a coleta de dados a serem utilizados pelo método FAHP. A coleta foi feita no ambiente LabVIEW, figura 2, utilizando um software derivado do controlador PID, sendo modificado para um controlador difuso.

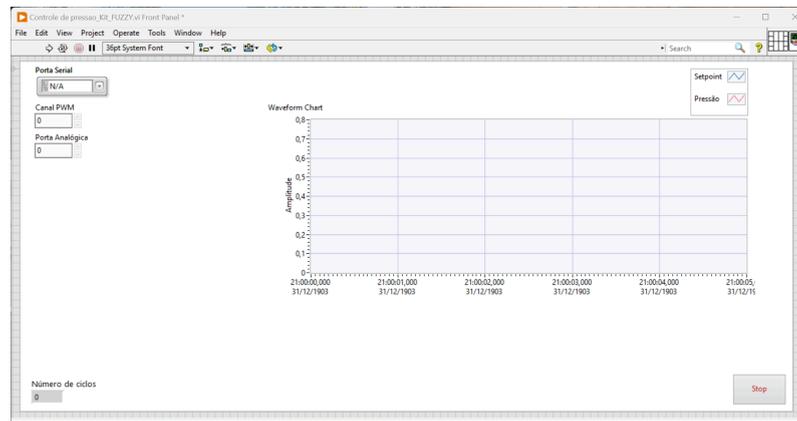


FIGURA 2. Controlador Difuso (Fonte: autores)

### MÉTODO MULTICRITÉRIO:

O método utilizado para a comparação entre os dois tipos de lógica de controle foi o FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process). Neste método é criada uma hierarquia do problema, onde devem ser identificados o objetivo final, os critérios de decisão e as alternativas. Desse modo serão criadas as matrizes de comparações entre os critérios, que são compostas pelos pesos de cada um. O segundo passo é a normalização das matrizes e a retirada da média aritmética de cada linha da matriz normalizada, assim obtendo o vetor de prioridade para cada critério. Seguindo os mesmos passos para os subcritérios, temos no final da análise um vetor global que será correspondente ao quanto cada alternativa contribui para o nosso objetivo.

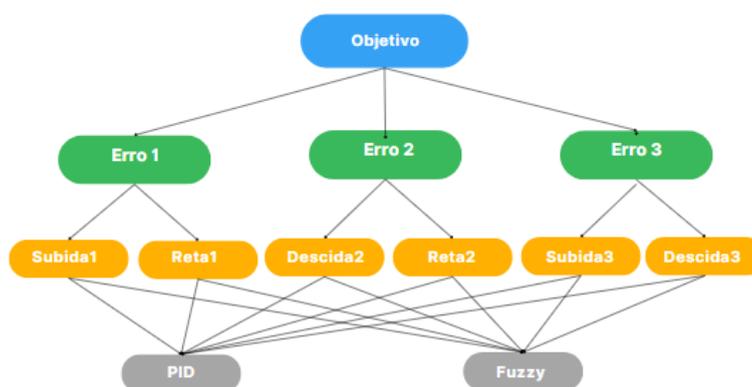


FIGURA 3. Hierarquia do problema (Fonte: autores)

Além disso, é preciso decidir o grau de importância de um critério em relação ao outro, para isso são utilizados os números Fuzzy triangulares.

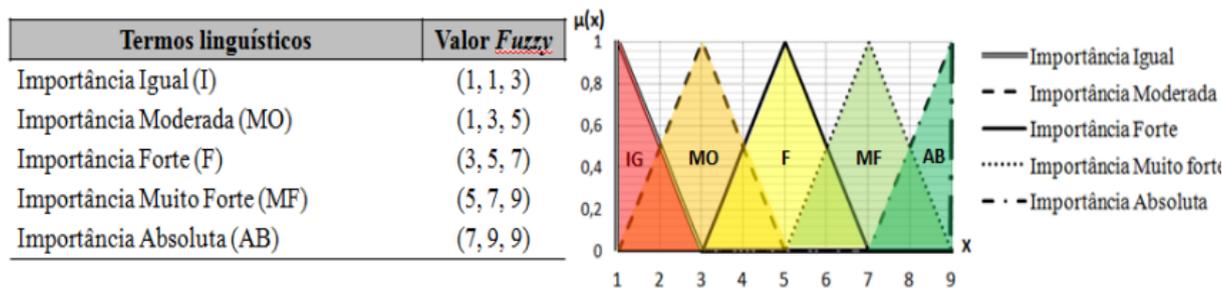


FIGURA 4. Gráfico de importâncias (Fonte: autores)

Nesta figura é possível identificar o gráfico de conjuntos difusos, assim como o do controlador. Porém, desta vez, cada conjunto corresponde a um certo grau de importância e, como se trata de um número fuzzy, teremos três componentes para cada peso de importância. Para ser utilizado no método será necessário fazer a defuzzificação destes números.

### CÓDIGO FAHP

Para a implementação do método FAHP, dado que existem diversos cálculos a serem feitos como as etapas de normalização de matrizes, retirada dos vetores de importância das matrizes normalizadas, defuzzificação dos números triangulares de fuzzy e o cálculo dos pesos globais de cada alternativa, foi desenvolvido um código na linguagem python para facilitar nesta etapa. Na criação do código foram utilizadas as bibliotecas ‘ahpy’, ‘numpy’, e ‘pyDecision’, para que fosse possível a realização do método de uma maneira mais precisa e evitar erros de cálculos.

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a realização da comparação entre as lógicas de controle, o critério utilizado foi o valor de erro, calculado a partir da soma da diferença entre o valor medido e o valor do setpoint. Como nesta análise tanto os erros negativos quanto positivos tem o mesmo valor, para fazer a soma foi utilizado o módulo de cada erro.

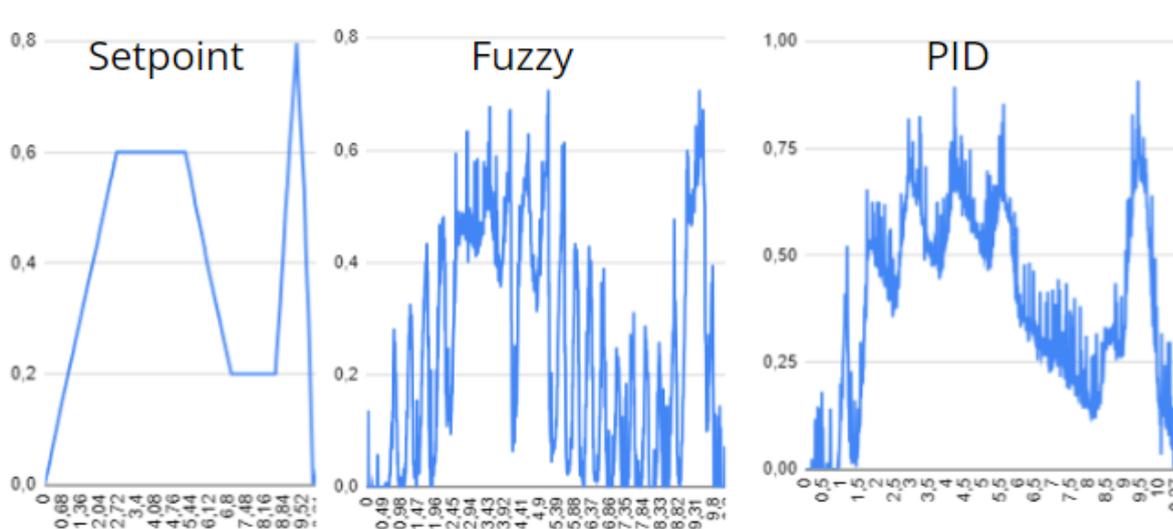


FIGURA 5. Setpoint e valores medidos

Como pode ser visto na Figura 4, o erro foi dividido em três, cada um correspondente a um trecho do setpoint, e cada um dos três critérios foram divididos em dois, que correspondem a cada segmento de reta do setpoint. Isto foi feito para que fosse possível definir quais trechos teriam mais importância para o objetivo final. Como neste caso o kit tem objetivo didático, os valores de importância para cada trecho foram escolhidos sem uma análise muito profunda, somente para testar a

capacidade do método ao definir as prioridades, afinal o kit não nos diz qual parte do setpoint seria mais ou menos importante obter menos erros.

Pesos	Erro 1	Erro 2	Erro 3
Erro 1	(1,1,1)	(5,5,5)	(1/3,1/3,1/3)
Erro2	(1/5,1/5,1/5)	(1,1,1)	(1/5,1/5,1/5)
Erro3	(3,3,3)	(5,5,5)	(1,1,1)

TABELA 1. Pesos dos critérios

Erro 1	Reta	Erro 2	Reta	Erro 3	Descida
Subida	(3,3,3)	Descida	(4,4,4)	Subida	(6,6,6)

TABELA 2. Pesos dos subcritérios

Nas tabelas acima é possível identificar os pesos de cada critério e subcritérios. A decisão foi priorizar nos subcritérios as subidas, em segundo as descidas ficando com menor importância as retas do setpoint. E nos critérios de primeiro escalão priorizar o Erro 3, em segundo o Erro 1 restando o Erro 2 com menor importância.

Subida	21,28	Descida	10,25	Subida	8,61
Descida	17,36	Reta	10,77	Descida	10,40

(a)

Subida	36,52	Descida	31,94	Subida	13,08
Descida	42,56	Reta	20,95	Descida	11,29

(b)

TABELA 3. (a) Valores de erro PID; (b) Valores de erro FUZZY

Nas tabelas acima estão os valores médios dos erros em cada divisão, que foi calculado a partir dos valores coletados nos três ciclos de setpoint, na tabela 3(a) estão os erros quando o sistema de controle era o PID, e na tabela 3(b) quando o sistema era o FUZZY, estes valores que de fato serão inseridos em nosso código e relacionados a cada alternativa.

Após a definição da hierarquia do problema e a criação das matrizes de comparação entre todos os critérios, os dados foram coletados para que fossem utilizados no cálculo dos erros em cada subdivisão do setpoint, assim colocados no código em python para que com a utilização do método FAHP fosse indicada alternativa atendesse melhor o objetivo final.

	PID	FUZZY
Vetor Global	0,622	0,379

TABELA 4. Vetores globais

Os vetores globais, como dito anteriormente, significam o quanto cada alternativa contribui para o cumprimento do objetivo final. A soma dos vetores globais sempre se resultará em 1, que significa cem por cento. Neste caso, após a análise, o nosso método indicou que o sistema de controle PID obteve o vetor global maior do que o sistema FUZZY.

## CONCLUSÕES

Após a utilização do método FAHP, realizado pelo código elaborado na linguagem python, foi indicado que o sistema PID atendeu melhor os critérios pré estabelecidos do que o sistema de controle FUZZY, pode-se dizer que essa melhor pontuação foi devida aos valores de erro medidos nos testes de do controlador PID, que principalmente em critérios que possuíam um grande peso, tinha um valor menor do que nos testes do controlador FUZZY. Uma hipótese levantada durante o projeto que pode explicar o porquê dos testes com FUZZY terem mais erros, é o fato de que o grupo possui uma maior

experiência na criação de controladores PID em relação ao FUZZY. Como o intuito do teste era analisar a utilidade do método, isto não foi um problema, pois da mesma forma foi possível criar uma comparação em que seria analisado cada critério com diferentes pesos, com isso foi apontado a utilidade do método em análises de sistemas de controle, pois com a sua metodologia e hierarquias é possível descrevermos o problema com muitos detalhes, criando quantos critérios e subcritérios fossem necessários. Houve a observação de que a válvula proporcional utilizada pode ter afetado o desempenho do sistema nos testes.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

A.B.C, G.F.P, K..R.M.A. e R.M.N. contribuíram com a metodologia e experimentos. G.F.P, K.R.M.A. e R.M.N. contribuíram com a análise dos dados e redação do trabalho. G.F.P e K..R.M.A. elaboraram o código em LabVIEW. R.M.N elaborou o código em python.

Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq - Conselho Nacional de desenvolvimento científico e tecnológico, ao IFSP - Instituto Federal de São Paulo e ao LCA - Laboratório de Controle Aplicado pelo apoio fornecido ao longo de todo o trabalho.

## REFERÊNCIAS

FREITAS, André Luís Policani; MARINS, Cristiano Souza; DE OLIVEIRA SOUZA, Daniela. A metodologia de multicritério como ferramenta para a tomada de decisões gerenciais: um estudo de caso. **Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas**, n. 2, p. 51-51, 2006.

MUNIZ D. J. et al. Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) on Control Tuning Evaluation in Servomotors. **CNPq - Aquarius Software**, Brasil, 2024.

NAVA-PINTOR J. A. et al. Design and Implementation of an Educational Technology Kit Aligned to the Conceptual Framework of Educational Mechatronics. **2021 Machine Learning-Driven Digital Technologies for Educational Innovation Workshop**, Monterrey, Mexico, 2021, pp. 1-8.

WU A. et al. Analysis of Weight for Thrust Fluctuations of Linear Motor System Based on FAHP. **2010 International Conference on Manufacturing Automation**, Hong Kong, China, 2010, pp. 217-223.