

## 14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

### APLICAÇÃO DO MÉTODO DE PROCESSO DE HIERARQUIA ANALÍTICA DIFUSA (FAHP) NA AVALIAÇÃO DE TESTES DE MOTORES A DIESEL

Daniel J. Muniz<sup>1</sup>, Isabela G.T. Francisco<sup>2</sup>, Alexandre B. CAMPO<sup>3</sup>, Ricardo PIRES<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Graduando em Engenharia de Controle e Automação; Bolsista ITC; IFSP; São Paulo; SP; daniel.muniz@aluno.ifsp.edu.br; **MUNIZ, Daniel Jorge.**

<sup>2</sup> Graduanda em Engenharia de Controle e Automação; Bolsista ITC; IFSP; São Paulo; SP; isabela.gilho@aluno.ifsp.edu.br; **FRANCISCO, Isabela Gilho Teixeira.**

<sup>3</sup> Doutor em Engenharia Elétrica/USP; Docente do Departamento de Elétrica IFSP; São Paulo; SP; brinca@ifsp.edu.br; **CAMPO, Alexandre Brincalpe.**

<sup>4</sup> Doutor em Sistemas Automáticos e Microeletrônicos/Université de Montpellier II; Docente do Departamento de Elétrica IFSP; São Paulo; SP; ricardo\_pires@ifsp.edu.br; **PIRES, Ricardo.**

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.04.05.02-5 Automação Eletrônica de Processos Elétricos e Industriais

**RESUMO:** O presente projeto apresenta o desenvolvimento de um programa computacional com a aplicação do método FAHP (*Fuzzy Analytical Hierarchy Process*) na avaliação de testes de motores a diesel. Estes testes são normalmente executados através de uma sequência de passos em que o motor é colocado em diversos regimes de trabalho, alterando velocidades, temperaturas e, por consequência, o consumo de combustível. Os dados gerados nos testes são complexos e devem obedecer a normas pré-definidas que possibilitam uma detalhada análise de desempenho. A análise dos testes normalmente é executada por especialistas que avaliam os dados gerados durante os testes utilizando uma metodologia baseada na experiência previamente adquirida ao longo de anos de trabalho. Essas análises qualitativas muitas vezes são pouco precisas e não uniformes, trazendo subjetividades a partir da divergência entre os especialistas quanto à preferência nos critérios mais importantes para o desempenho final dos testes. Foi verificado que a aplicação do método FAHP pôde auxiliar uma tomada de decisão ao identificar o motor com o melhor desempenho a partir dos testes realizados, uma vez que combina técnicas qualitativas e quantitativas para lidar com problemas complexos, permitindo a decomposição de múltiplos critérios em níveis hierárquicos a partir de definições de prioridades.

**PALAVRAS-CHAVE:** FAHP; fuzzy; desempenho; tomada de decisão; múltiplos critérios.

### APPLICATION OF FUZZY ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS (FAHP) IN THE EVALUATION OF DIESEL ENGINE TESTS

**ABSTRACT:** This project presents the development of a computational program with the application of the FAHP method (*Fuzzy Analytical Hierarchy Process*) in the evaluation of diesel engine tests. These tests are usually carried out through a sequence of steps in which the engine is placed in different working regimes, changing speeds, temperatures and, consequently, fuel consumption. The data generated in the tests are complex and must comply with pre-defined norms that allow a detailed performance analysis. Test analysis is usually performed by specialists who evaluate the data generated during tests using a methodology based on experience previously acquired over years of work. These qualitative analyzes are often inaccurate and non-uniform, bringing subjectivities from the divergence between specialists regarding the preference in the most important criteria for the final performance of the tests. It was verified that the application of the FAHP method could help decision-making by identifying the engine with the best performance from the tests carried out, since it combines qualitative and quantitative techniques to deal with complex problems, allowing the decomposition of multiple criteria into levels hierarchical from definitions of priorities.

**KEYWORDS:** FAHP; fuzzy; performance; decision making; multiple criteria.

## INTRODUÇÃO

O Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP), um dos métodos de decisão multicritério, combina a lógica difusa com o método AHP desenvolvido por Tomas L. Saaty. Nesse método, o problema é estruturado em níveis hierárquicos, facilitando sua avaliação e compreensão. Ele permite a definição de prioridades na análise, por meio do julgamento paritário, que leva a uma matriz de julgamentos (Costa, 2002) e (Saaty, 2000). O AHP auxilia em tomadas de decisões partindo do princípio de que o usuário do modelo possui informações completas e definidas a respeito do tema a ser tratado (Saxena et al., 2010). No entanto, problemas mais complexos começam a apresentar imprecisões e ambiguidades da percepção humana. Segundo Tang e Beynon (2005), é exatamente a existência de tais subjetividades que abrem espaço para a aplicação de lógica difusa em conjunto com esse método. Sendo assim, o FAHP considera a realidade de que os julgamentos humanos são imprecisos e incertos, trazendo a lógica difusa para o tratamento desse grau de imprecisão.

A partir dessas definições, enxerga-se na indústria uma grande abertura para a utilização dessa técnica na avaliação de testes de motores a diesel, que possuem múltiplos critérios de avaliação e níveis hierárquicos definidos a partir da criação de prioridades construídas por diferentes opiniões de especialistas no processo (Jia; Qin; Zuo, 2010). Dessa forma, no presente estudo objetiva-se implementar o método FAHP para análise de testes de motores a diesel, de forma a trazer a combinação qualitativa e quantitativa do processo, apresentando avaliações mais rápidas de desempenho dos testes, permitindo também, apontar falhas ou ajustes a serem feitos, auxiliando na tomada de decisão.

## MATERIAL E MÉTODOS

Para a aplicação do método FAHP foi desenvolvido um algoritmo computacional em Python, com a utilização das bibliotecas numpy, pandas, matplotlib.pyplot, AHPy e FAHPy. Na sua implementação, o algoritmo recebeu dados de testes de motores a diesel que foram adaptados dos testes reais feitos por uma empresa brasileira, mantendo a confidencialidade de todas as informações consideradas sensíveis. O desenvolvimento computacional para a aplicação do FAHP foi separado em três etapas analíticas, conforme representado na Figura 1.

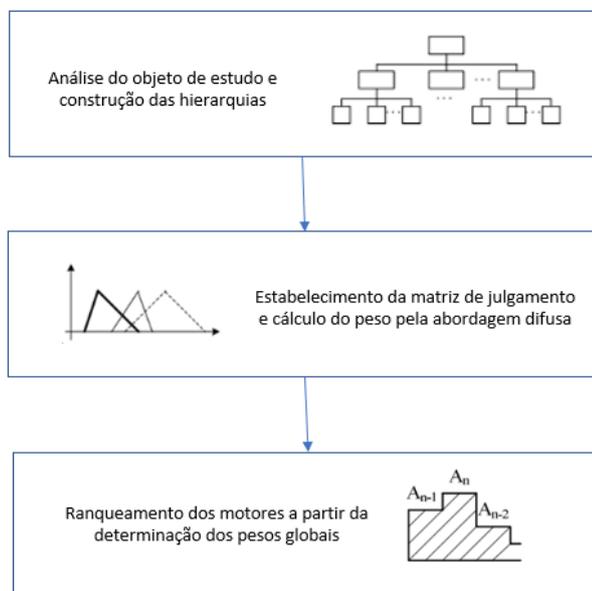


FIGURA 1. Etapas de fluxo da aplicação do FAHP.

Na primeira etapa definiu-se a análise do objeto de estudo, construindo a sua estrutura hierárquica. A constituição dessas hierarquias utiliza como apoio o conceito de análise multicritério do método FAHP em que, são definidos critérios de análise organizados em diferentes níveis de hierarquia categorizados de acordo com a importância relativa entre eles. Para a definição desses critérios buscou-se entender, em conjunto com os especialistas do processo, as regras que avaliam as características dos sinais de rotação e consumo do processo de teste de validação de motor a diesel. Assim, verificou-se que os testes

são divididos em diferentes ciclos que, por sua vez, são compostos por uma sequência de 4 passos. No primeiro e no último passo temos situações de estabilidade e de baixa exigência do motor, com baixa duração do passo e não sendo pontos cruciais para a análise. Já nos passos 3 e 4 temos situações de maior exigência do motor, com um passo de aceleração livre a um certo limite de rotação e outro com a aplicação de uma carga, respectivamente e, dessa vez, com maior duração em relação aos outros dois. Com isso, o terceiro e o quarto passo são mais relevantes na validação do desempenho do motor.

A partir dessas regras e comportamentos são construídos os critérios envolvidos na análise, bem como sua estrutura hierárquica. Nela, determinou-se que a primeira camada é composta pelos critérios: consumo dos motores e o tempo de acomodação em cada um dos quatro passos. Cada critério foi então composto em subcritérios que se relacionavam diretamente com cada um dos quatro passos analisados para a classificação de um ciclo do teste. Estabelecendo-se assim, que os ensaios seriam avaliados globalmente de acordo com os dados relacionados a consumo e tempo de acomodação e de maneira relativa a cada um dos estágios de um ensaio. A representação dos critérios estabelecidos para o problema em questão pode ser observada na Figura 2.

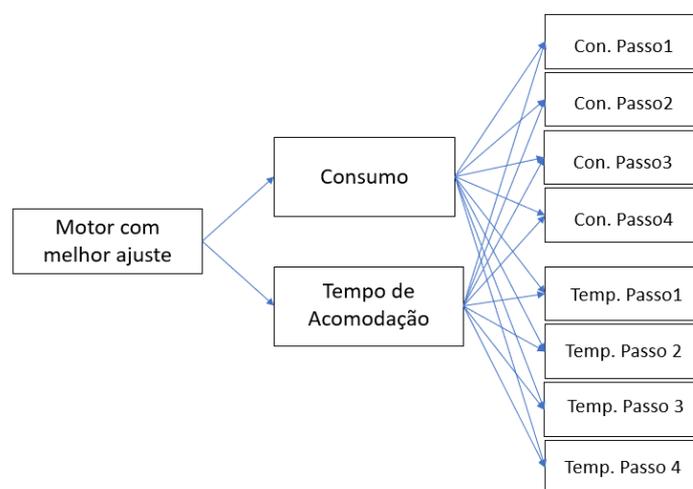


FIGURA 2. Representação da estrutura hierárquica.

Na segunda etapa, ocorre a implantação da lógica difusa empregando a associação entre julgamentos verbais linguísticos e a escala de intensidade de importância de Saaty, modelando-a mediante números difusos que formarão as matrizes de comparações dos critérios (Kahraman, Cebeci e Ulukan, 2003). Desse modo, de acordo com as experiências e opiniões dos especialistas estabeleceu-se que no primeiro nível hierárquico o tempo de acomodação seria um pouco mais importante que o consumo. Nas camadas seguintes, definiu-se que dentre o consumo nos passos que definem um ciclo, o consumo nos passos 1 e 4 teriam igualdade de preferência entre si e são menos importantes em relação ao consumo nos passos 2 e 3 que, por sua vez, teriam o consumo no passo 2 como o mais importante entre todos os outros e o consumo no passo 3 sendo um pouco menos importante que o 2.

Com relação aos subníveis do tempo de acomodação, seguiu-se a mesma lógica do consumo, ou seja, o tempo de acomodação no passo 2 seria mais importante entre todos, o tempo de acomodação no passo 3 seria um pouco menos importante que o passo 2 e mais importante que o tempo nos passos 1 e 4, que por sua vez teriam igualdade de preferência. Em seguida, diante desses critérios e preferências, construíram-se as Tabelas 1 e 2 que demonstram a matriz de comparação paritária entre os critérios das camadas a partir da fuzzificação, descrevendo a imprecisão dos julgamentos e preferências dos especialistas em uma escala difusa triangular.

TABELA 1. Matriz de comparação paritária entre os critérios da primeira camada.

	Tempo de acomodação	Consumo
Tempo de acomodação	(1,1,1)	(1,3,5)
Consumo	(0.2,0.333,1)	(1,1,1)

TABELA 2. Matriz de comparação paritária entre os critérios da segunda camada.

Tempo de acomodação	TSpasso1	TSpasso2	TSpasso3	TSpasso4
TSpasso1	(1,1,1)	(0.125, 0.167, 0.2)	(0.143, 0.2, 0.333)	(1,1,1)
TSpasso2	(5,6,8)	(1,1,1)	(1,2,3)	(0.125, 0.167, 0.2)
TSpasso3	(3,5,7)	(0.333, 0.5, 1)	(1,1,1)	(0.143, 0.2, 0.333)
TSpasso4	(1,1,1)	(0.125, 0.167, 0.2)	(0.143, 0.2, 0.333)	(1,1,1)
Consumo	ConsumoSt1	ConsumoSt2	ConsumoSt3	ConsumoSt4
ConsumoSt1	(1,1,1)	(0.125, 0.167, 0.2)	(0.143, 0.2, 0.333)	(1,1,1)
ConsumoSt2	(5,6,8)	(1,1,1)	(1,2,3)	(0.125, 0.167, 0.2)
ConsumoSt3	(3,5,7)	(0.333, 0.5, 1)	(1,1,1)	(0.143, 0.2, 0.333)
ConsumoSt4	(1,1,1)	(0.125, 0.167, 0.2)	(0.143, 0.2, 0.333)	(1,1,1)

A partir de comparações pareadas de todos os critérios, a saída do fuzzy permite a determinação de pesos de julgamento para cada um dos critérios, através do cálculo de vetores de prioridade. Posteriormente compara os números difusos associados a cada par de alternativas e, ponderando pelo peso individual de cada critério chega a um valor final de hierarquização. Por fim aplica-se a técnica de defuzzificação a fim de transformar os pesos globais em valores *crisp*, gerando a classificação final dos motores testados.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

No teste estudado, quatro motores foram submetidos a três ciclos e, para fins de análise foi selecionado o segundo ciclo de cada motor. Em seguida, cada especialista avaliou de forma individual os resultados e determinou com base em suas percepções e experiências a classificação dos motores conforme a Tabela 3.

Com a implementação da lógica difusa no método AHP foi possível parametrizar as diferentes opiniões dos especialistas buscando um resultado que tratasse a imprecisão proveniente dos julgamentos pessoais de cada um deles. Com isso, mensurou-se o desempenho dos quatro motores que possuíam ajustes eletromecânicos variados e, diante disso, foi identificado através do algoritmo implementado que o motor 3 (M\_3) apresentou o melhor desempenho nos testes a partir da definição coletiva da importância dos critérios, uma vez que obteve a maior pontuação final dentre as que foram obtidas pelo método, quando comparado aos outros motores, (Tabela 4 e Figura 3).

TABELA 3. Análise individual dos especialistas para o teste.

Análise Especialista 1		Análise Especialista 2	
Classificação	Alternativa	Classificação	Alternativa
1	M_2	1	M_3
2	M_3	2	M_4
3	M_4	3	M_2
4	M_1	4	M_1

TABELA 4. Pontuação global das alternativas.

Resultado do Algoritmo		
Classificação	Alternativa	Pontuação
1	M_3	0.307
2	M_2	0.247
3	M_4	0.244
4	M_1	0.203

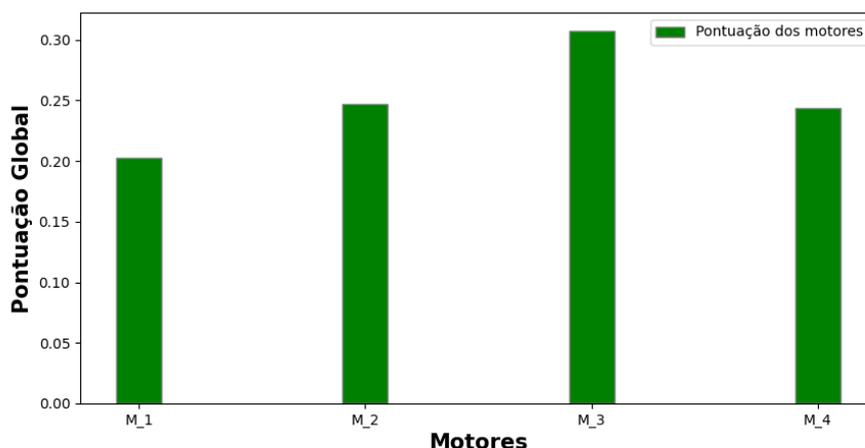


FIGURA 3. Pontuação global dos motores segundo o método FAHP.

A pontuação global para os diferentes motores é construída a partir da normalização de pesos da matriz de julgamento dos principais critérios e subcritérios estabelecidos. Essa matriz é obtida a partir da comparação de pares que avaliam as alternativas de modo a expressar os graus de preferências entre esses critérios. As opiniões dos especialistas divergiam entre si e, dado o grau de incerteza e imprecisão na definição das preferências dos critérios, fez-se necessária a utilização da lógica difusa para que houvesse uma abordagem que levasse em conta parâmetros que possuem variações de importância. Essa abordagem, considerando incertezas e imprecisões, levou à definição dessas preferências que determinaram como os testes seriam avaliados.

Com isso os especialistas puderam concluir que os ajustes realizados para o motor 3 levaram a um melhor desempenho, permitindo que analisassem com maior atenção como foram ajustados seus componentes eletromecânicos de modo a replicar em outros testes. Além disso, dada a pontuação global dos critérios de maior preferência, que foram o tempo de acomodação no passo 2, tempo de acomodação no passo 3, consumo no passo 2 e consumo no passo 3, observa-se que, conforme demonstrado na Figura 4, o melhor motor (M\_3), apresentou uma combinação de alta pontuação em quatro critérios, ainda que a pontuação no tempo de acomodação no passo 3 tenha sido menor quando comparado ao motor 2 (M\_2) e, o seu consumo no passo 3 tenha sido menor que o do motor 1 (M\_1).

Ao analisar o segundo motor (M\_2), verifica-se que uma combinação de altas pontuações nos critérios de tempo de acomodação nos passos 2 e 3 levou ao segundo lugar na classificação, ainda que com uma pontuação muito próxima ao quarto motor (M\_4) conforme a classificação observada na Tabela 2. Essa proximidade se dá devido a sua pontuação no critério de consumo no passo 3 ser a mais baixa entre todos os motores.

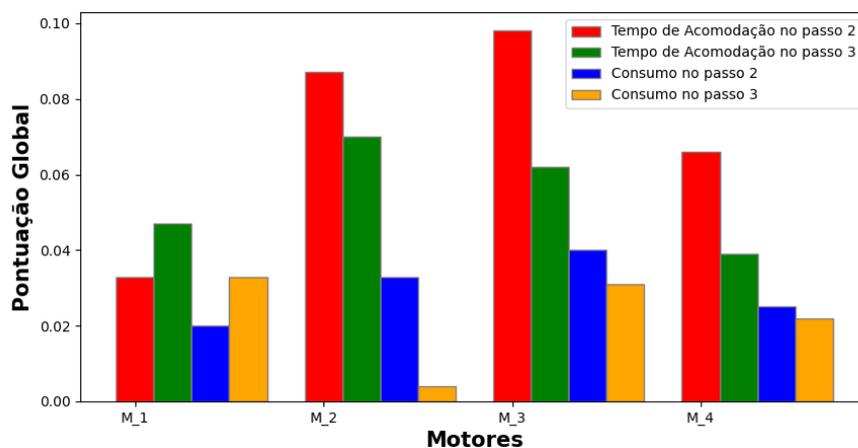


FIGURA 4. Pontuação global dos principais critérios versus motores testados.

## CONCLUSÕES

A aplicação do algoritmo de inferência difusa utilizando o método AHP para avaliar os ensaios de teste realizados em motores se demonstrou capaz de mensurar as preferências e avaliações subjetivas dos especialistas, auxiliando na tomada de decisão em um problema com múltiplos critérios e alternativas, considerando também, incertezas e imprecisões, uma vez que fornece a possibilidade de decompor esses critérios em hierarquias e trazer uma comparação em pares, construindo graus de preferência com base nas diferentes opiniões fornecidas.

Dessa forma, pôde-se identificar qual motor desempenhou melhor a partir dos ajustes de seus componentes eletromecânicos, trazendo, assim, pontuação melhor ou pior nos testes realizados e qual foi a influência individual de cada critério para o resultado. Com isso, os especialistas conseguem tomar decisões de forma mais clara e uniformizada quanto aos motores testados, permitindo replicar e combinar os melhores ajustes identificados em cada um deles.

Apesar da aplicação do método e do algoritmo ter sido implementado em um teste simplificado, ele pode desempenhar tão bem quanto constatado em problemas mais complexos, com mais níveis hierárquicos e com maiores amostras de dados. A implementação desse método, junto ao algoritmo desenvolvido em Python, também oferece como vantagem uma grande versatilidade para aplicação em diferentes processos além dos industriais, como processos empresariais ou na identificação de problemas sociais e ambientais, que possuam parâmetros de desempenho ou de classificação e que possibilitem o ajuste da prioridade de cada critério em relação aos demais.

## CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

D.J.M e I.G.T.F contribuíram com a curadoria, experimentos e análise dos dados. A.B.C, R.P, D.J.M e I.G.T.F procederam com a metodologia e atuaram na redação do trabalho. Todos os autores contribuíram com a revisão do trabalho e aprovaram a versão submetida.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de iniciação técnica científica (ITC), e aos orientadores do Laboratório de Controle Aplicado (LCA) por toda a confiança e ajuda que nos foi prestada, além do incentivo para realizar o estudo proposto.

## REFERÊNCIAS

COSTA, H. G. **Introdução ao método de análise hierárquica: análise multicritério no auxílio à decisão**. Niterói: H.G.C., 2002. v.1. p. 14-61.

JIA, D.; QIN, W. e ZUO, Z. **Application of Fuzzy Analytic Hierarchy Process on Design Evaluation of Diesel Engine Structure Aimed to Improve Volume Power**, IEEE 8th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), 2010.

KAHRAMAN, C.; CEBECI, U. e ULUKAN, Z. **Multi-criteria supplier selection using fuzzy AHP**. **Logistics Information Management**, 2003. v. 16(6), p. 382-394.

SAATY, T. L. **Decision making for leaders**. Pitts burg, USA: WS. Publications, 2000. v.2. p. 14-91.

SAXENA, V.; JAIN, M.; SINGH, P. e SAXENA, P.K. **Fuzzy Delphi Hierarchy Process and its Application to Improve Indian Telemedical Services**, 2010. p. 2.

TANG, Y. e BEYNON, M. **Application and Development of a Fuzzy Analytic Hierarchy Process within a Capital Investment Study**. *Journal of Economics and Management*, 2005. v.1, n.2, 207-230.