



DOI: 10.5281/zenodo.19000065

ANÁLISE ESTATÍSTICA DE VARIÁVEIS OPERACIONAIS EM MOTORES AERONÁUTICOS: PREDIÇÃO DO PICO DE TEMPERATURA POR MEIO DE REGRESSÃO LINEAR

Jhonny Inácio Ferreira¹

João Paulo Martins dos Santos²

Kátia Ferreira de Oliveira³

Resumo

O artigo avalia a influência de variáveis operacionais no pico de temperatura em motores aeronáuticos, utilizando regressão linear múltipla. A análise de regressão identificou que o Pico de T5 é estatisticamente dependente da Temperatura do Ar Externa (TAE) e da Estabilização (%NG). Ambas as variáveis apresentaram efeito significativo sobre o comportamento térmico do motor, explicando aproximadamente 61% da variabilidade observada. Esse resultado ressalta a importância do monitoramento e controle desses parâmetros, especialmente diante dos riscos associados ao superaquecimento. **Palavras-chave:** Estatística, Regressão Linear, Desempenho de Motores Aeronáuticos, Pico de temperatura.

Abstract

The article evaluates the influence of operational variables on peak temperature in aircraft engines using multiple linear regression. The regression analysis revealed that the T5 peak is statistically dependent on External Air Temperature (EAT) and Stabilization (%NG). Both variables had a significant effect on the thermal behavior of the engine, explaining approximately 61% of the observed variability. This result highlights the importance of monitoring and controlling these parameters, especially given the risks associated with overheating. **Keywords:** Statistics, Linear Regression, Aircraft Engine Performance, Temperature Peak.

Introdução

A atividade aérea apresenta uma alta complexidade e risco, exigindo dos profissionais envolvidos profundo conhecimento técnico, disciplina, sinceridade e responsabilidade, além de uma cultura organizacional robusta direcionada à segurança operacional (Ministério

¹Academia da Força Aérea (AFA), jhonny.inacio.f@gmail.com

²Academia da Força Aérea (AFA), jp2@alumni.usp.br

³Academia da Força Aérea (AFA), eng.katiaferoli@gmail.com

da Defesa, 2013). Logo, compreender o comportamento térmico dos motores aeronáuticos torna-se crucial para a confiabilidade e eficiência das operações. A importância da análise estatística no contexto é ressaltada em (Profito, 2010; Cancian, 2013; Pintar, Possolo, Zhang, 2013; Steinke *et al.*, 2020).

Este estudo investiga as relações entre parâmetros "Pico de Temperatura ($^{\circ}C$)" e variáveis como Temperatura do Ar na Entrada (TAE), Estabilização (%NG) em motores T-27, por meio de um modelo de regressão linear múltipla para qualificar os fatores relevantes.

Objetivo

O objetivo geral deste trabalho foi obter o modelo de regressão linear múltipla sem interações para investigar os fatores que influenciam o pico de temperatura (Pico de T5 ($^{\circ}C$)) em motores aeronáuticos por meio dos seguintes passos: Para alcançar essa meta, estabelecem-se os seguintes objetivos específicos:

- tratamento dos dados de forma a eliminar inconsistências e outliers;
- avaliar a significância estatística das variáveis identificando seu impacto individual no comportamento térmico do motor;
- Verificação das hipóteses a posteriori do modelo de regressão.

Material e Método

Os dados são provenientes dos registros operacionais, obtidos por meio de relatórios gerados após voo de instrução, das variáveis: Pico de T5 [$^{\circ}C$] – variável dependente, representando o pico máximo de temperatura registrado no motor durante a partida; TAE [$^{\circ}C$] – Temperatura do Ar Externa; Estabilização [%NG] – relacionado ao esforço necessário para o funcionamento do motor; NG MÁXIMA [%NG] – rotação máxima da turbina do compressor e PARADA DA HÉLICE [s] – relacionada com a qualidade dos rolamentos de lubrificação do motor.

A metodologia incluiu a aplicação da regressão linear múltipla de ordem 1 e sem interações para investigar os fatores que influenciam o Pico de T5 ($^{\circ}C$) em motores aeronáuticos, bem como testes de significância para avaliar a adequação do modelo e a análise dos residuais para verificar se as premissas do modelo foram atendidas (BUSSAB, 2017; DEVORE, 2014; MONTGOMERY *et al.*, 2009). Ambos, a análise e a visualização gráfica foram conduzidas com base na linguagem R (R CORE TEAM, 2023; WICKHAM & GROLEMUND, 2017; FARAWAY, 2014) com interface RStudio (RSTUDIO TEAM, 2023).

Resultados e Discussão

A Figura 1 ilustra os diagramas de dispersão, as correlações e respectivas indicações de significância das correlações (valor $p < 0.05$), enquanto a Figura 2 os resumos dos modelos lineares completo e reduzido.

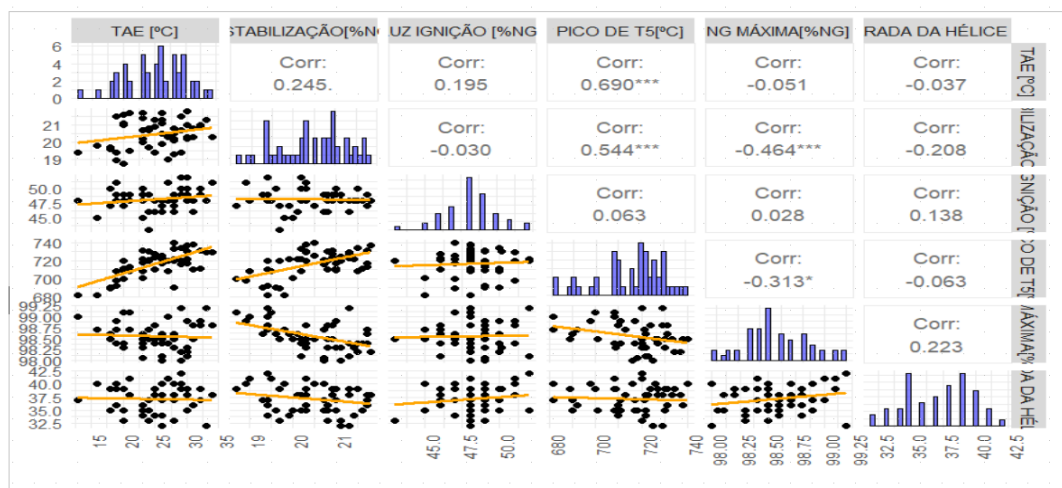


Figura 1: Diagrama de Dispersão, correlação e testes de hipóteses das correlações duas a duas.

Fonte: Autores, 2025

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	1185.7810	488.7419	2.426	0.01924	*
`ESTABILIZAÇÃO [%NG]`	6.1306	1.8411	3.330	0.00172	**
`LUZ IGNIÇÃO [%NG]`	-0.4194	0.7421	-0.565	0.57473	
`TAE [°C]`	1.8670	0.2845	6.562	4.15e-08	***
`NG MÁXIMA [%NG]`	-6.4517	4.7878	-1.348	0.18441	
`PARADA DA HÉLICE [s]`	0.3872	0.5164	0.750	0.45715	

Coefficients:					
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	525.5935	31.8773	16.488	< 2e-16	***
`ESTABILIZAÇÃO [%NG]`	7.1055	1.6038	4.430	5.28e-05	***
`TAE [°C]`	1.8090	0.2757	6.563	3.16e-08	***

Figura 2: Resumo dos modelos lineares completo e reduzido.

Fonte: Autores, 2025

Em particular, a TAE (°C) apresentou a correlação mais elevada com o Pico de T5 ($r=0,690$, $p < 0,001$), sugerindo que maiores picos de temperatura T5 tendem a acompanhar valores mais altos de TAE. A Estabilização (%NG) também se correlacionou positivamente com o Pico de T5 ($r=0,544$, $p < 0,001$), mas exibiu uma correlação negativa moderada com o parâmetro de NG Máxima ($r=-0,464$, $p < 0,001$), indicando que, à medida que a Estabilização aumenta, a NG Máxima tende a ser menor.

A partir de estatísticas descritivas foi possível observar que TAE [$^{\circ}C$] obteve média de $25,30 \pm 0,64$ e mediana de 26,0, sugerindo uma distribuição próxima à mediana. A variável ESTABILIZAÇÃO [%NG] mostrou média de $20,45 \pm 0,11$, com mediana de 20,5. A LUZ IGNIÇÃO [%NG] teve média de $47,36 \pm 0,80$ e mediana de 48,0, apontando maior dispersão em relação às demais. O PICO DE T5 [$^{\circ}C$] apresentou média de $716,00 \pm 2,60$ e mediana de 720,0, enquanto NG MÁXIMA [%NG] manteve valores elevados e estáveis, com média de $98,54 \pm 0,04$ e mediana de 98,5. Por fim, o tempo de PARADA DA HÉLICE [s] registrou média de $36,98 \pm 0,37$ e mediana de 37,0, indicando uma dispersão moderada em torno dos valores centrais. Esses resultados evidenciam padrões distintos de variabilidade e centralidade para cada parâmetro avaliado. Os boxplots e histogramas com curvas de densidade empíricas combinadas (Figura 2) fornecem uma visualização gráfica dos dados analisados.

A Temperatura do Ar Externo (TAE $^{\circ}C$) exibiu a mais forte correlação positiva com o Pico de T5 ($r=0,690$, $p<0,001$), indicando que valores elevados de T5 estão relacionados a picos maiores de TAE. A Estabilização (%NG) também se correlacionou positivamente com o Pico de T5 ($r=0,544$, $p<0,001$). Contudo, a Estabilização (%NG) teve uma correlação negativa moderada com a NG Máxima ($r=-0,464$, $p<0,001$), o que sugere que uma maior Estabilização está associada a uma NG Máxima menor.

Os resultados estatísticos indicam que o modelo ($F = 40,92$; *valor p* $\approx 0,0$) e as estimativas são significativas (*valor p* $\approx 0,0$). O teste *a posteriori* de Shapiro-Wilk aponta que não há evidências para rejeitar a hipótese nula de normalidade dos residuais (*valor p* = 0,1891 $> \alpha = 5\%$).

Matematicamente, faz sentido que o modelo traga um intercepto diferente de zero como parte do melhor ajuste estatístico aos dados observados. Porém, fisicamente, se tanto a temperatura ambiente (TAE) quanto a estabilização fossem efetivamente zero, não é plausível que o motor apresente um Pico de T5 em torno de $525^{\circ}C$. O esperado, nesse cenário, é que o motor esteja em equilíbrio com a temperatura ambiente, que seria muito mais baixa.

Portanto, esse valor de intercepto (525,59) é apenas um artefato estatístico resultante de como a regressão linear funciona — ela tenta ajustar a melhor reta (ou hiperplano, no caso de múltiplas variáveis) possível para todos os pontos disponíveis, sem necessariamente respeitar vínculos físicos que digam que, ao zerar certas variáveis, a temperatura deveria ser zero ou próxima da ambiente. Em outras palavras, a regressão linear pura não 'sabe' que existe um limite físico para o valor de T5 em determinadas condições.

Os coeficientes de regressão positivos (1,809 para TAE e 7,1055 para Estabilização) evidenciam que incrementos nessas variáveis elevam a temperatura máxima registrada.

O coeficiente de determinação (R^2) de 0,6255 e o R^2 ajustado de 0,6102 indicam que aproximadamente 61% da variabilidade do pico de temperatura é explicada pelo modelo.

Por fim, o Erro Padrão Residual de aproximadamente $9^{\circ}C$ revela uma dispersão

moderada em torno das previsões, sinalizando que, embora o modelo apresenta bom ajuste, há possibilidade de divergências pontuais entre valores previstos e observados. Em síntese, os resultados evidenciam a relevância de TAE e Estabilização para o pico de temperatura.

Conclusão

Este estudo, ao investigar o impacto de TAE e Estabilização no Pico de T5 por meio de regressão linear múltipla, evidenciou a importância dessas variáveis para a compreensão do comportamento térmico de motores aeronáuticos. O modelo resultante, ao explicar cerca de 61% da variação do Pico de T5, reforça o papel fundamental da Estabilização na elevação das temperaturas, embora a TAE também tenha se mostrado significativamente associada ao aquecimento do motor.

A lacuna de 39% na explicação do modelo sinaliza a necessidade de expandir as análises, incorporando tanto aspectos ambientais (umidade, pressão atmosférica) quanto operacionais (tempo de voo, regime de potência) e características mecânicas do motor. A inclusão de tais fatores pode aumentar a precisão e a robustez das previsões, permitindo um planejamento operacional mais assertivo. Um elemento adicional e proposta futura é explorar outros modelos tais como interações ou modelos com características exponenciais.

REFERÊNCIAS

- CANCIAM, César Augusto. Efeito da temperatura na viscosidade dinâmica dos óleos lubrificantes SAE 5W20, SAE 5W30 e SAE 5W40. Revista da Universidade Vale do Rio Verde, v. 11, n. 2, p. 228-238, 2013.
- DEVORE, J. L.; CORDEIRO, M. T. A. Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências. São Paulo: Cengage Learning Edições Ltda., 2014.
- FARAWAY, J. J. Linear Models with R. 2. ed. Boca Raton: Chapman & Hall/CRC, 2014.
- MINISTÉRIO DA DEFESA (Brasil). Comando da Aeronáutica. Doutrina de Segurança de Voo (DCA 3-1). Brasília: COMAER, 2013.
- MONTGOMERY, D. C. et al. Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- PINTAR, A. L.; POSSOLO, A.; ZHANG, N. F. Statistical methods for change-point detection in surface temperature records. In: Temperature: Its Measurement and Control in Science and Industry. AIP Conference Proceedings, v. 1552, p. 1048-1053, 2013.

PROFITO, Francisco José. Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicada a superfícies texturizadas / F.J. Profito. Ed. Rev. -- São Paulo, 2010.

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. Estatística Básica. 9. ed. São Paulo: Saraiva, 2017.

R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2023. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

RSTUDIO TEAM. RStudio: Integrated Development for R. Boston, MA: RStudio, PBC, 2023. Disponível em: <https://www.rstudio.com/>. Acesso em: 15 mar. 2025.

STEINKE, V. A.; MARTINS PALHARES DE MELO, L. A.; LUIZ MELO, M.; RODRIGUES DA FRANÇA, R.; LUNA LUCENA, R.; TORRES STEINKE, E. Trend analysis of air temperature in the Federal District of Brazil: 1980–2010. *Climate*, Basel, v. 8, n. 8, art. 89, 2020. DOI: 10.3390/cli8080089

WICKHAM, H.; GROLEMUND, G. R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2017.

Anexo

Os dados e códigos utilizados podem ser acessados via GitHub.