



Previsão de Falha em Turbofan Jet Engine

Allan Mattos, Leandro Simões, Lucas Paiva e Renato Maximiano



01

Introdução

Motores turbofan

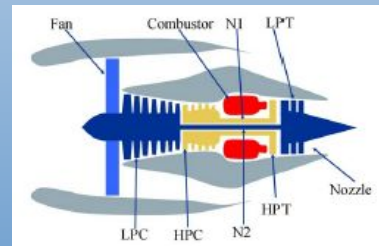
NASA Turbofan Jet Engine Data Set

Data set com dados de operação de um motor turbofan, gerados com um modelo termodinâmico da NASA (C-MAPSS).

- 100 motores simulados (ID)
- Ciclo do motor (até a falha, quando $RUL=0$)
- 3 parâmetros para condição de operação
- 21 sensores

Utilizado apenas o primeiro data set:

- Uma condição de operação (nível do mar)
- Um modo de falha (degradação do HPC)



<https://www.kaggle.com/datasets/behrad3d/nasa-cmaps>

NASA Turbofan Jet Engine Data Set

- Sensores representam diversos tipos de variáveis
 - Temperaturas, pressões, rotações, vazões etc
- Maioria dos sensores são variáveis contínuas
 - Exceto sensores 17 e 18, que são discretas
- RUL: Remaining Useful Life

	id	cycle	op1	op2	op3	sensor1	sensor2	sensor3	sensor4	sensor5	sensor6	sensor7	sensor8	sensor9	sensor10
0	1	1	-0.0007	-0.0004	100.0	518.67	641.82	1589.70	1400.60	14.62	21.61	554.36	2388.06	9046.19	1.3
1	1	2	0.0019	-0.0003	100.0	518.67	642.15	1591.82	1403.14	14.62	21.61	553.75	2388.04	9044.07	1.3
2	1	3	-0.0043	0.0003	100.0	518.67	642.35	1587.99	1404.20	14.62	21.61	554.26	2388.08	9052.94	1.3
3	1	4	0.0007	0.0000	100.0	518.67	642.35	1582.79	1401.87	14.62	21.61	554.45	2388.11	9049.48	1.3

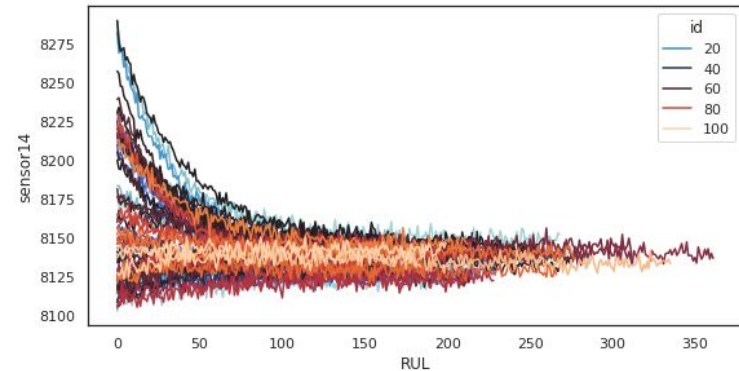
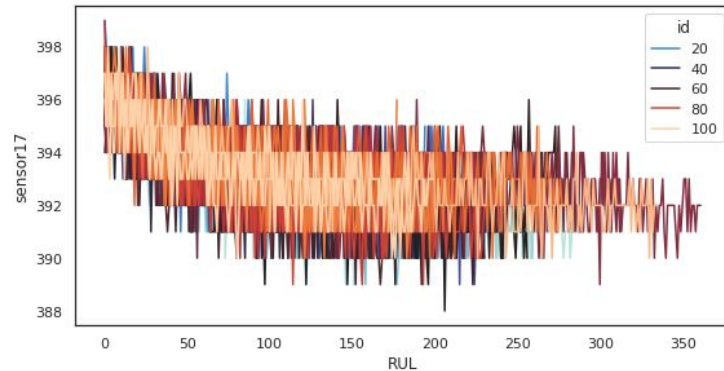
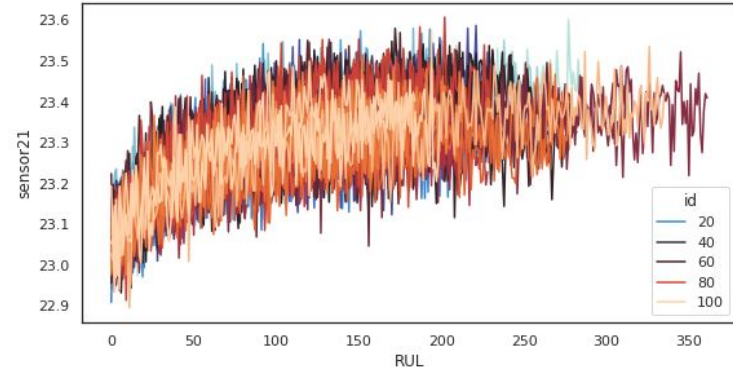
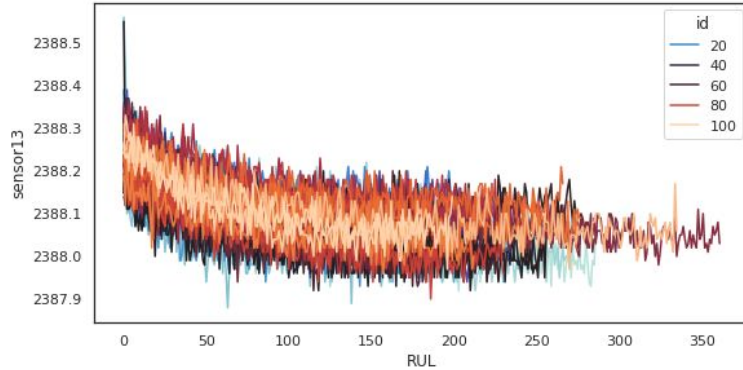
	sensor11	sensor12	sensor13	sensor14	sensor15	sensor16	sensor17	sensor18	sensor19	sensor20	sensor21	RUL
0	47.47	521.66	2388.02	8138.62	8.4195	0.03	392	2388	100.0	39.06	23.4190	191
1	47.49	522.28	2388.07	8131.49	8.4318	0.03	392	2388	100.0	39.00	23.4236	190
2	47.27	522.42	2388.03	8133.23	8.4178	0.03	390	2388	100.0	38.95	23.3442	189
3	47.13	522.86	2388.08	8133.83	8.3682	0.03	392	2388	100.0	38.88	23.3739	188



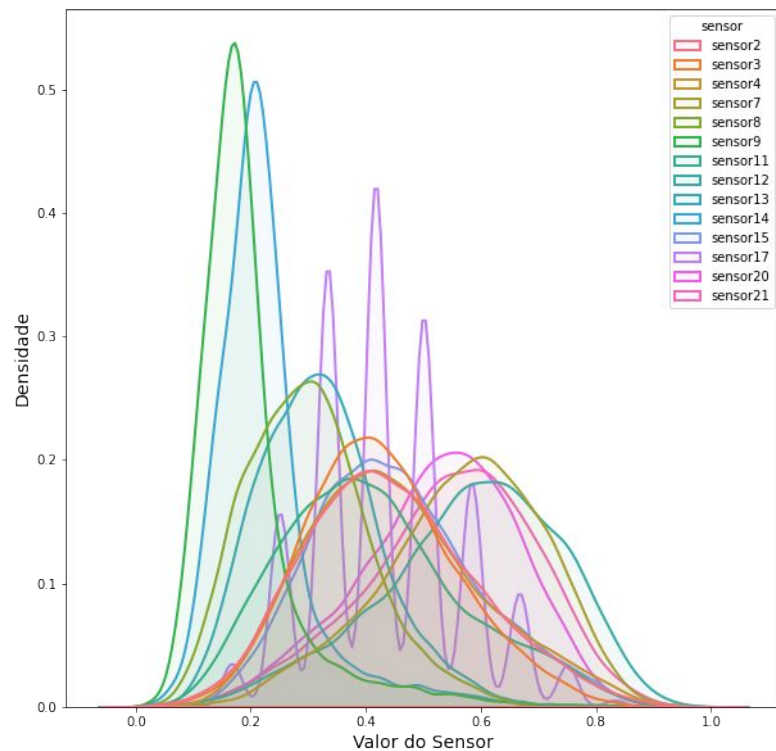
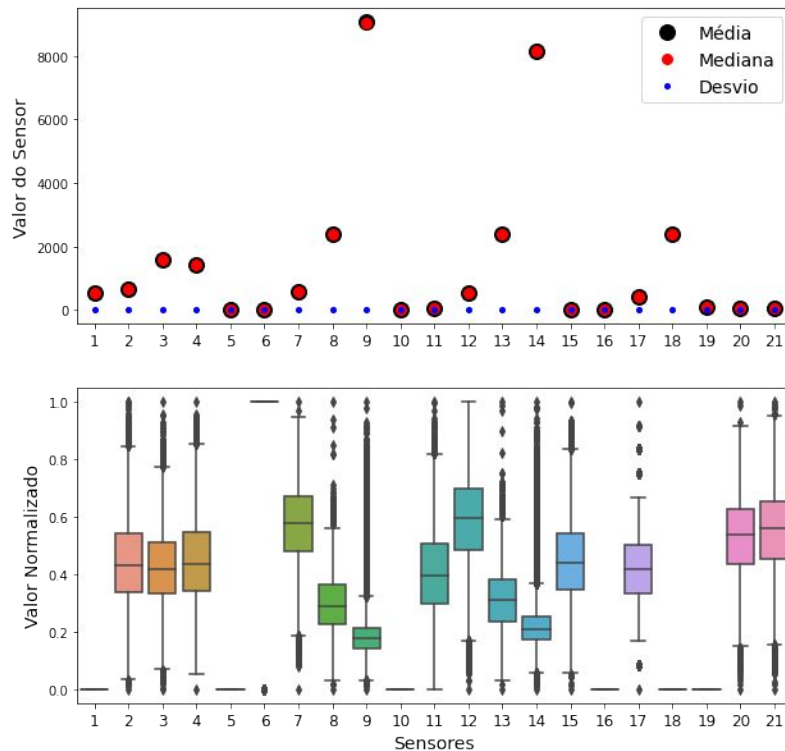
02 EDA

Análise Exploratória dos Dados

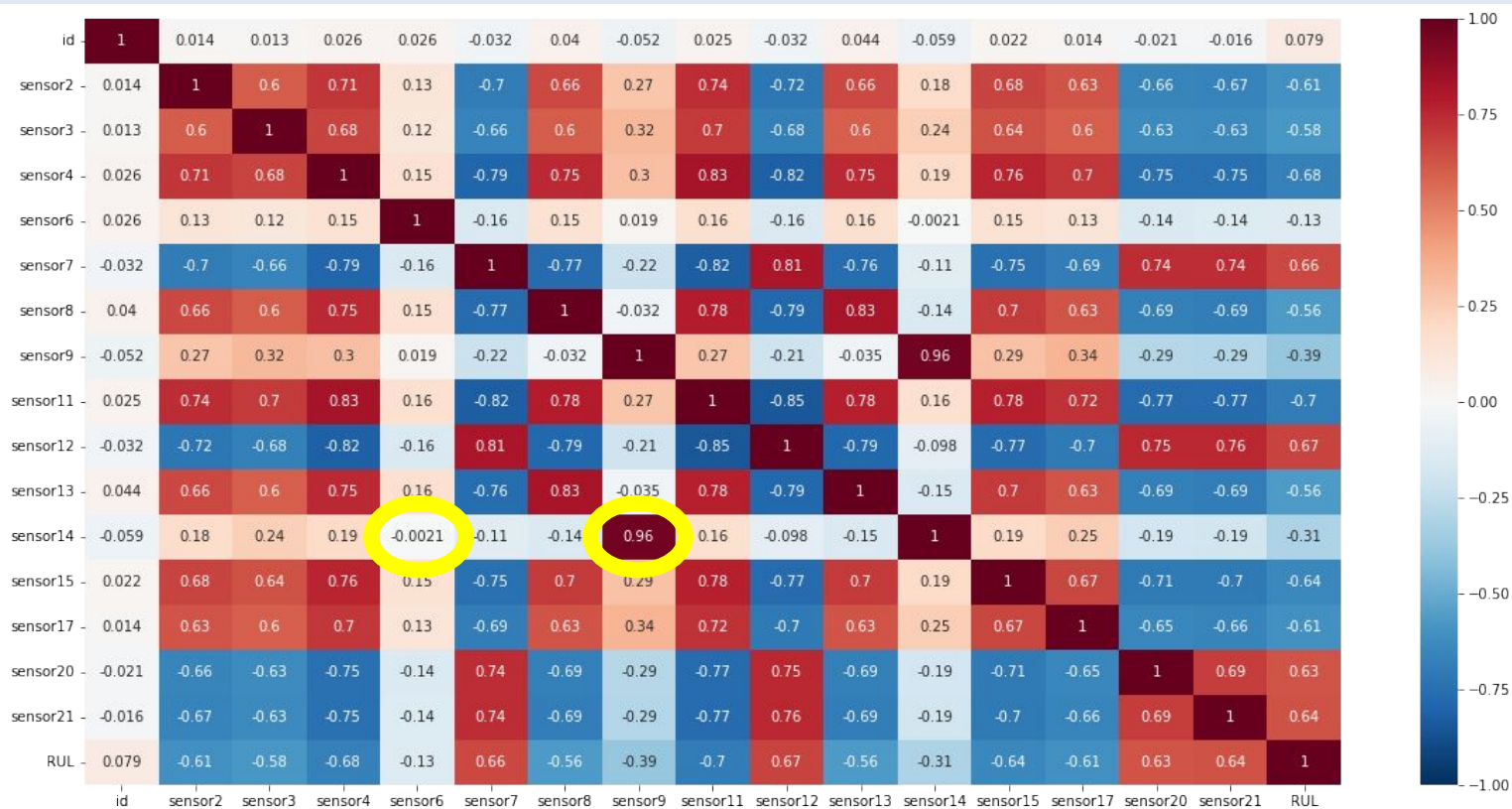
Comportamento sensores



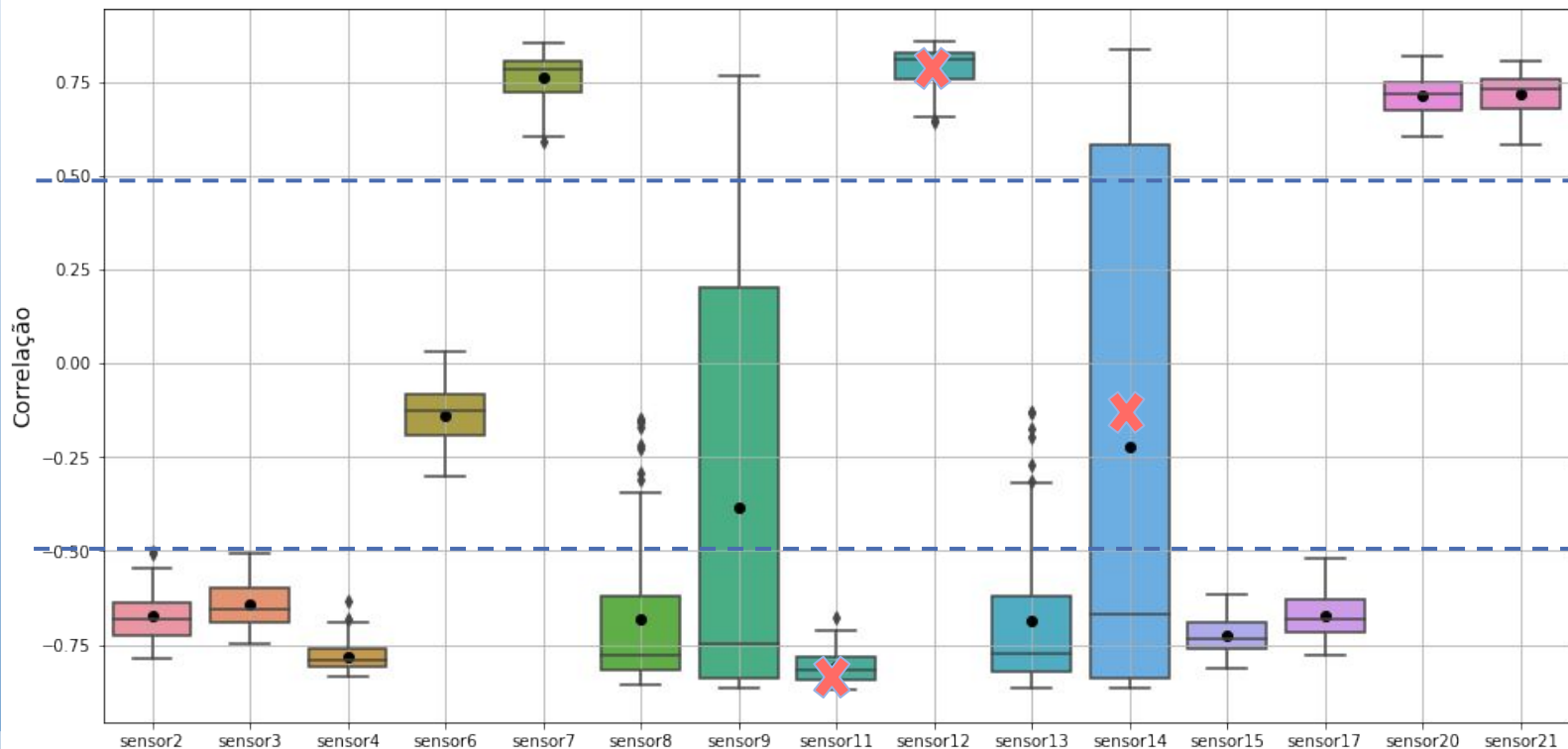
Valor, Distribuição e Densidade



Correlação dos Dados



Correlação dos Sensores x RUL (id)



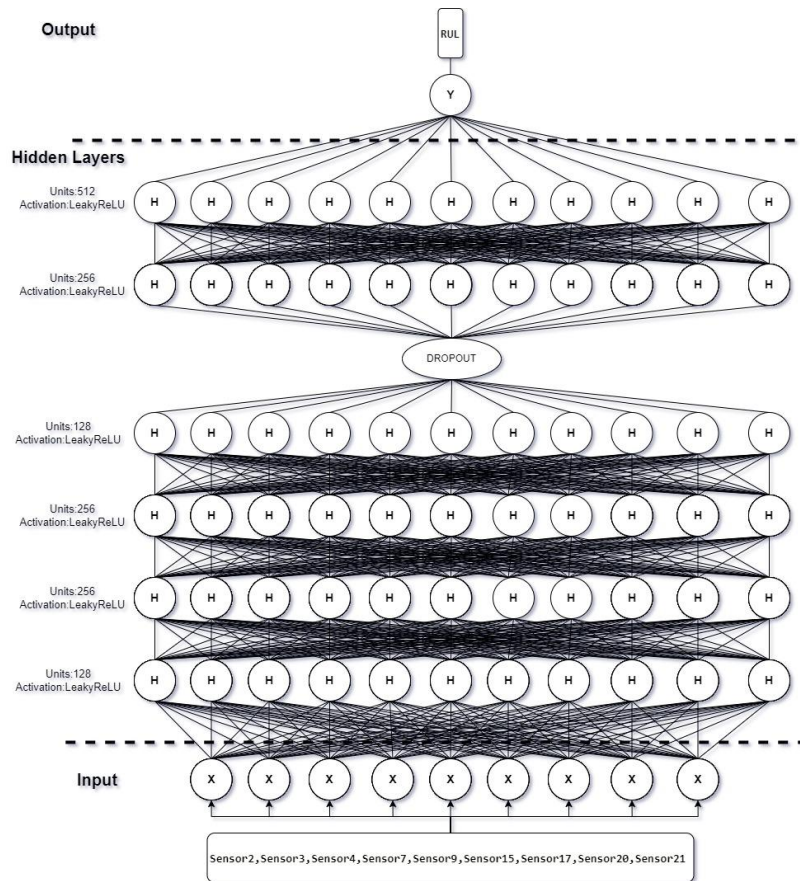


03

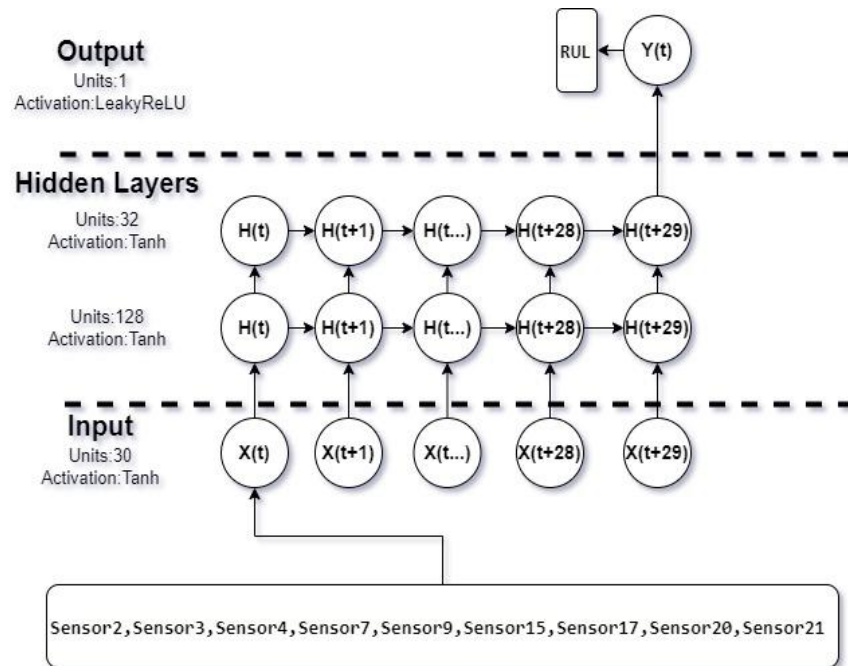
Previsão RUL

Modelos e resultados

MLP



LSTM



Tempo de processamento

100X

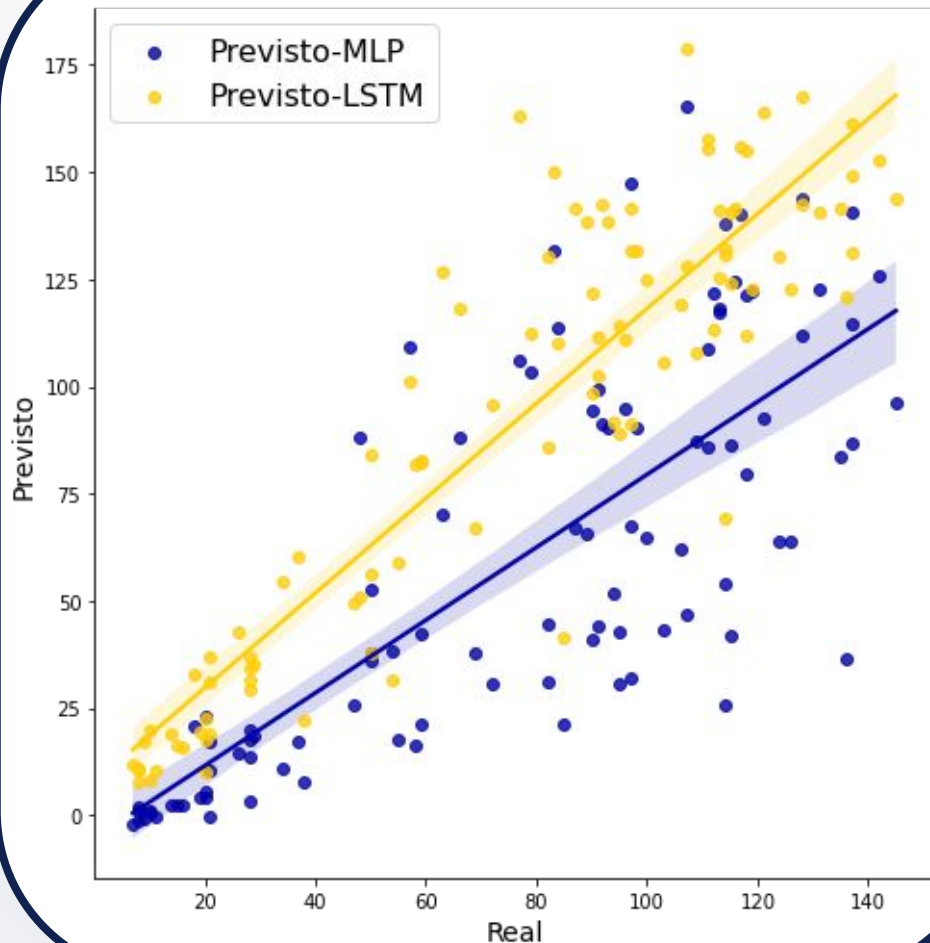
Ativação do modelo

Tempo Médio
[id(1)...id(100)]

Id (1)...Id (100)

Tempo [id (1), id (2)... id(100)] (s)

Real vs Previsto



Erro médio absoluto

MLP: 28.65

LSTM: 19.9

**Tempo de
processamento**

MLP: 0.040214 (s)

LSTM: 0.043076 (s)



04

MLP vs LSTM

Comparação do erro e do tempo de processamento

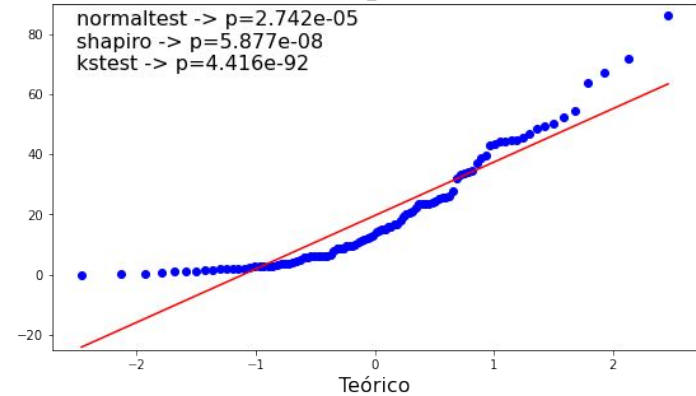
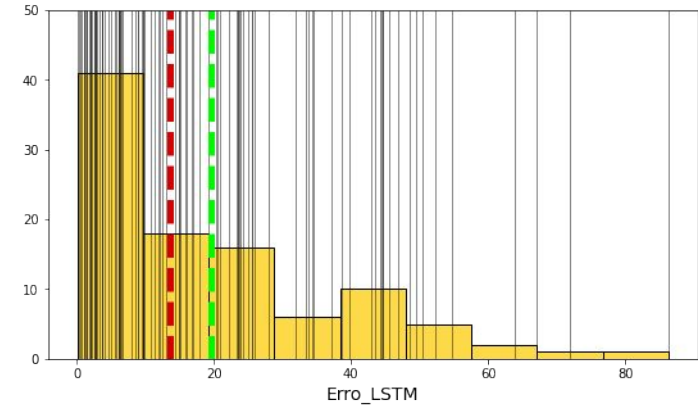
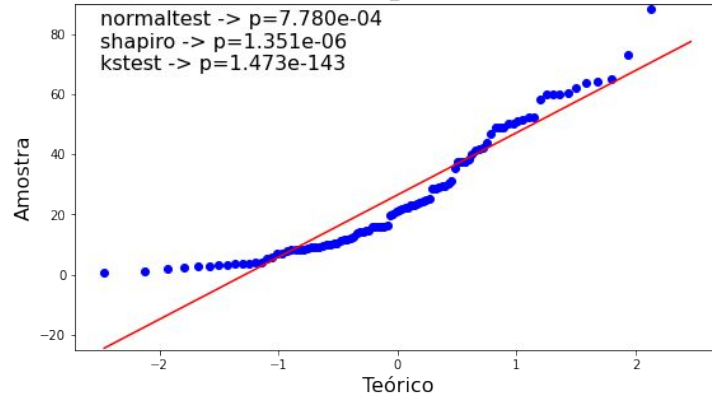
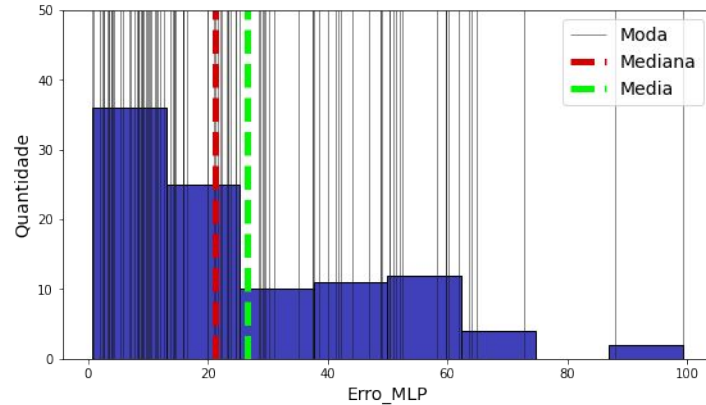


Erro Absoluto Médio

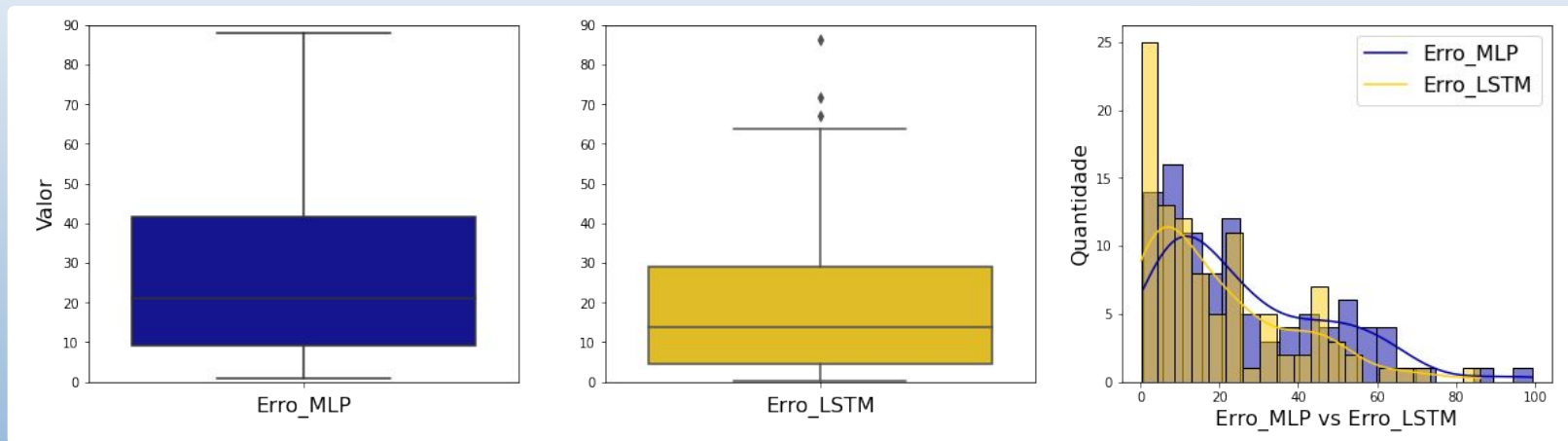
H₀: O erro médio da LSTM é **igual** ao erro médio da MLP

H_a: O erro médio da LSTM é **menor** que o erro médio da MLP

Normalidade dos Erros



Comparação dos Erros



Amostras não normais
Pareadas
Teste de Wilcoxon

Erro LSTM < Erro MLP
($p=0.0071$)

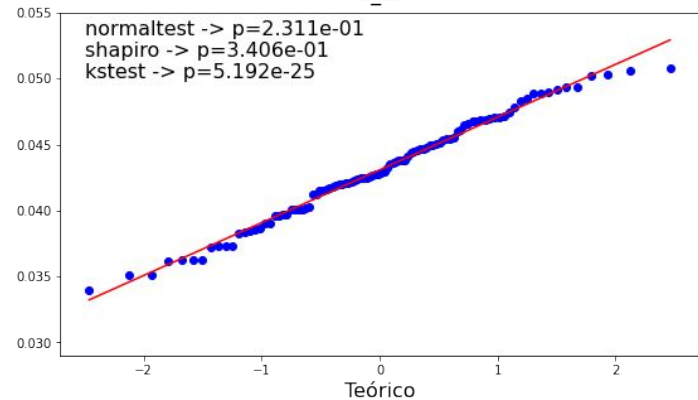
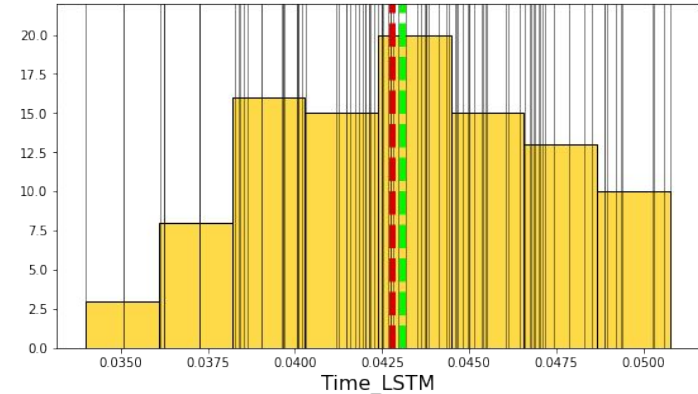
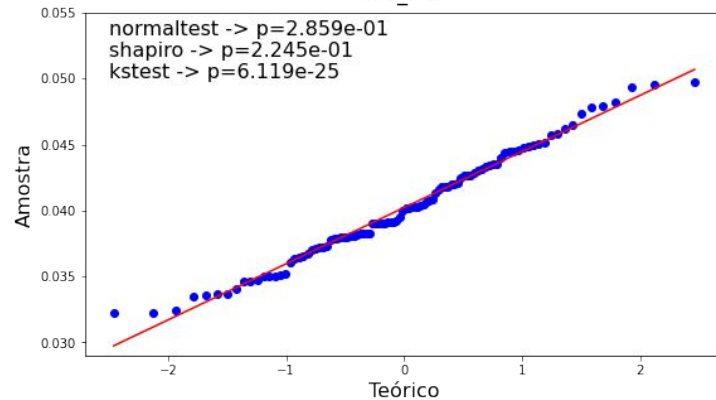
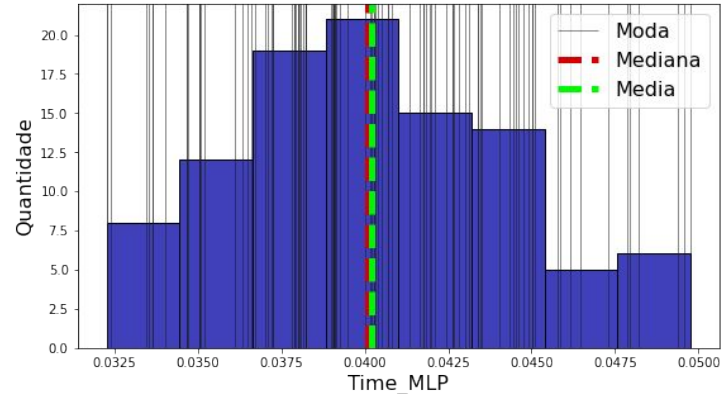


Tempo médio de processamento

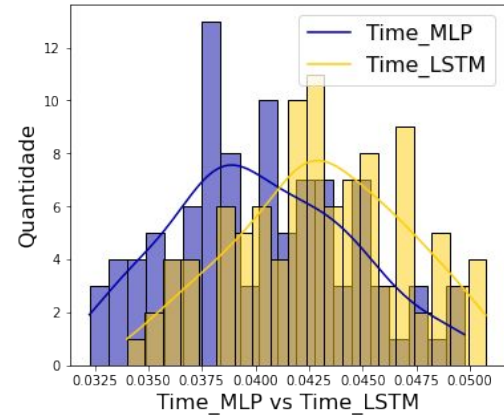
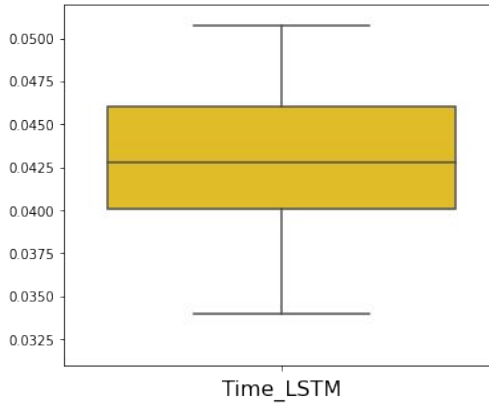
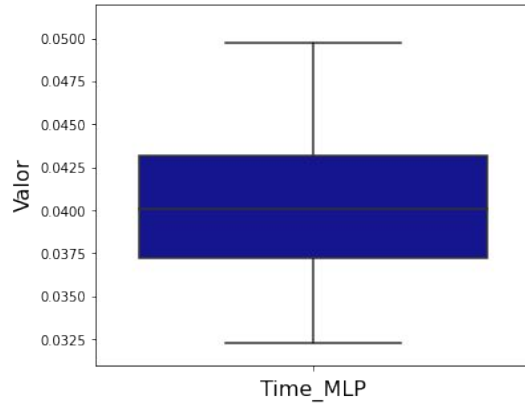
Ho: O tempo médio da LSTM é **igual** ao tempo médio MLP

Ha: O tempo médio da LSTM é **maior** que o tempo médio da MLP

Normalidade dos Tempos



Comparação dos Tempos



Normalidade?
Pareadas
Teste de Wilcoxon
Teste t pareado

Tempo LSTM > Tempo MLP
(pw=9.26e-7 | pt=2.99-7)



05

Sensores

Análise dos sensores mais relevantes
para previsão da falha

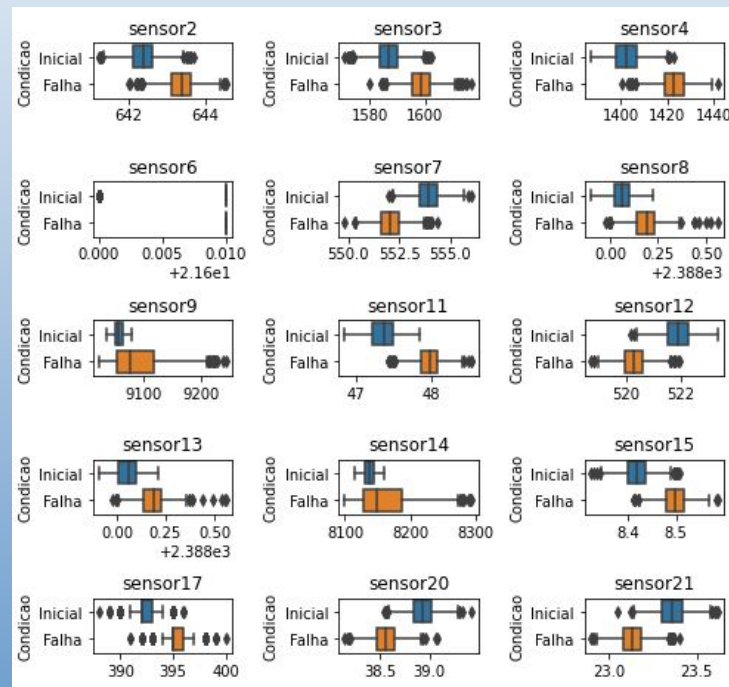
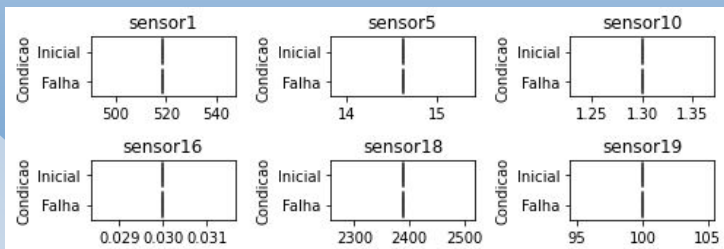
Importância dos Sensores

- Objetivo: Utilizar o teste de Kolmogorov-Smirnov de duas amostras para identificar os sensores que variam significativamente ao longo dos ciclos do motor
 - Comparar uma amostra de referência (10 ciclos iniciais) com a amostra a ser analisada.



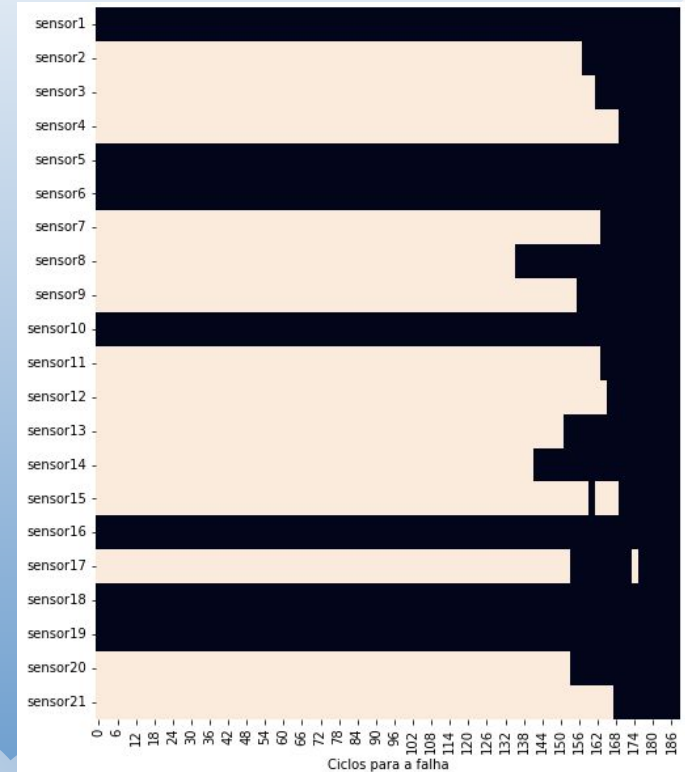
Importância dos Sensores - Teste 1

- Amostra 1:
 - 10 primeiros ciclos de todos os motores
- Amostra 2:
 - 10 últimos ciclos de cada motor antes da falha
- Resultado pouco conclusivo



Importância dos Sensores - Teste 2

- Amostra 1 (referência):
 - 10 primeiros ciclos de todos os motores
- Amostra 2 (a testar):
 - Sequência de 10 ciclos consecutivos dos motores
 - Iniciando em RUL=0, e variando com passo de 2 ciclos
- Legenda:
 - Preto: $p\text{-valor} > 0.05$
 - Branco: $p\text{-valor} \leq 0.05$





06 Conclusão



Menor erro com LSTM

Menor tempo computacional com MLP

**Propomos um método baseado em estatística
para selecionar sensores mais importantes**

DÚVIDAS?

Ficou com alguma dúvida?
paiva.1996.lucas@gmail.com,
leandro.simoaes@embraer.com.br
renatomaximiano@icloud.com,
allan_mattos01@hotmail.com

CREDITS: This presentation template was created by **Slidesgo**,
including icons by **Flaticon**, infographics & images by **Freepik**

Códigos: https://github.com/lucas-fpaiva/estatistica_pes