REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

PREDIÇÃO DE AUTONOMIA EM SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE GÁS A PARTIR DE SÉRIES TEMPORAIS DE PRESSÃO: ESTUDO COMPUTACIONAL CONTROLADO COM UMA PLATAFORMA IOT

PREDICTING AUTONOMY IN GAS STORAGE SYSTEMS USING PRESSURE TIME SERIES: A CONTROLLED COMPUTATIONAL STUDY WITH AN IoT PLATFORM

PREDICCIÓN DE LA AUTONOMÍA EN SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE GAS A PARTIR DE SERIES TEMPORALES DE PRESIÓN: ESTUDIO COMPUTACIONAL CONTROLADO CON UNA PLATAFORMA IoT

Daniel Alencar Barros Tavares
Instituto Federal do Ceará – Campus Maracanaú
email: joao.carvalho@ifce.edu.br

João Cláudio Nunes Carvalho
Instituto Federal do Ceará – Campus Maracanaú
email: daniel.alencar@ifce.edu.br

Ronaldo Tadeu Pontes Milfont
Instituto Federal do Ceará – Campus Canindé
email: ronaldo.milfont@ifce.edu.br

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

Resumo

Este estudo busca identificar quais parâmetros ajudam a prever, com maior precisão, quanto tempo falta para a pressão de um cilindro atingir o limiar de 30 bar, usando séries sintéticas no contexto do GasTrack, plataforma de telemetria que integra sensor, ESP32, MQTT e processamento, adotada aqui apenas como referência arquitetural, sem uso de suas medições. Em cada uma das dez repetições, foram gerados 320 ciclos de consumo, distribuídos entre quatro regimes e divididos, por ciclo, em conjuntos de treino e teste. Com esses dados, comparamos métodos de extrapolação, Random Forest (RF), regressão Ridge e referências históricas, avaliando previsões sem truncamento, a cobertura e os erros calculados por instante e por ciclo, enquanto os parâmetros dos novos comparadores foram escolhidos em ciclos de validação. Para entender o que realmente contribui para o desempenho, as ablações com reajuste separaram os efeitos da pressão, das tendências, da variabilidade e do horário, e testes adicionais avaliaram janelas de 15 a 240 minutos, a ausência de um regime no treino e alterações isoladas de fatores em um novo painel sintético, sempre com intervalos pareados que preservaram a estrutura hierárquica de sementes e ciclos. O RF apresentou o melhor resultado, com MAE de 7,82 h, contra 10,64 h da pressão isolada e 8,92 h da regressão Ridge. A combinação de pressão e tendências já alcançou 7,97 h, e a inclusão posterior da variabilidade alterou esse valor apenas de forma discreta, o que indica que as tendências respondem pela maior parte do ganho. O ruído e as mudanças de consumo afetaram os erros, e o sentido desse efeito variou conforme a ponderação pela duração dos ciclos. As referências físicas ajudam a situar a escala dos sinais, mas não calibram o gerador. Por fim, como o alvo é o cruzamento de 30 bar em dados sintéticos, os resultados não demonstram precisão em campo.

Palavras-chave: Séries temporais; Tempo até limiar; Gás comprimido; Random Forest; Dados sintéticos.

Abstract

This study aims to identify which parameters best predict the time remaining until a cylinder's pressure reaches the 30 bar threshold, using synthetic series in the context of GasTrack, a telemetry platform that integrates sensor, ESP32, MQTT, and processing, adopted here only as an architectural reference, without using its measurements. In each of the ten repetitions, 320 consumption cycles were generated, distributed across four regimes and split, by cycle, into training and test sets. Using these data, we compared extrapolation methods, Random Forest (RF), Ridge regression, and historical baselines, evaluating untruncated predictions, coverage, and errors computed per time step and per cycle, while the parameters of the new comparators were chosen on validation cycles. To understand what actually drives performance, refitted ablations separated the effects of pressure, trends, variability, and time of day, and additional tests evaluated windows from 15 to 240 minutes, the absence of one regime in training, and isolated changes in individual factors on a new synthetic panel, always with paired intervals that preserved the hierarchical structure of seeds and cycles. RF achieved the best result, with an MAE of 7.82 h, compared with 10.64 h for pressure alone and 8.92 h for Ridge regression. The combination of pressure and trends already reached 7.97 h, and the later inclusion of variability changed this value only slightly, which indicates that trends account for most of the gain. Noise and consumption shifts affected the errors, and the direction of this effect varied depending on how cycles were weighted by duration. The physical baselines help situate the scale of the signals but do not calibrate the generator. Finally, because the target is the crossing of 30 bar in synthetic data, the results do not demonstrate field accuracy.

Keywords: Time series; Time to threshold; Compressed gas; Random Forest; Synthetic data.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

Resumen

Este estudio busca identificar qué parámetros ayudan a predecir con mayor precisión cuánto tiempo falta para que la presión de un cilindro alcance el umbral de 30 bar, utilizando series sintéticas en el contexto de GasTrack, plataforma de telemetría que integra sensor, ESP32, MQTT y procesamiento, adoptada aquí solo como referencia arquitectónica, sin uso de sus mediciones. En cada una de las diez repeticiones se generaron 320 ciclos de consumo, distribuidos entre cuatro regímenes y divididos, por ciclo, en conjuntos de entrenamiento y prueba. Con estos datos, comparamos métodos de extrapolación, Random Forest (RF), regresión Ridge y referencias históricas, evaluando predicciones sin truncamiento, la cobertura y los errores calculados por instante y por ciclo, mientras que los parámetros de los nuevos comparadores se eligieron en ciclos de validación. Para entender qué contribuye realmente al desempeño, las ablaciones con reajuste separaron los efectos de la presión, las tendencias, la variabilidad y el horario, y pruebas adicionales evaluaron ventanas de 15 a 240 minutos, la ausencia de un régimen en el entrenamiento y cambios aislados de factores en un nuevo panel sintético, siempre con intervalos pareados que preservaron la estructura jerárquica de semillas y ciclos. El RF presentó el mejor resultado, con un MAE de 7,82 h, frente a 10,64 h de la presión aislada y 8,92 h de la regresión Ridge. La combinación de presión y tendencias ya alcanzó 7,97 h, y la inclusión posterior de la variabilidad modificó ese valor solo de forma discreta, lo que indica que las tendencias explican la mayor parte de la mejora. El ruido y los cambios de consumo afectaron los errores, y el sentido de este efecto varió según la ponderación por la duración de los ciclos. Las referencias físicas ayudan a situar la escala de las señales, pero no calibran el generador. Por último, como el objetivo es el cruce de 30 bar en datos sintéticos, los resultados no demuestran precisión en campo.

Palabras clave: Series temporales; Tiempo hasta umbral; Gas comprimido; Random Forest; Datos sintéticos.

1. Introdução

Uma leitura de pressão informa a condição presente, enquanto uma decisão de reposição requer estimar quando um limite será atingido. A mesma pressão pode corresponder a tempos restantes diferentes sob demanda contínua, diurna ou intermitente. Arquiteturas de Internet das Coisas permitem registrar séries de sensores e integrar seu processamento (Atzori; Iera; Morabito, 2010; Gubbi et al., 2013), mas a disponibilidade da telemetria não assegura que o sinal represente estoque ou sustente uma decisão operacional.

Aplicações próximas usam outras variáveis. Balogun et al. (2024) monitoram cilindros de GLP com célula de carga e sensores de concentração e temperatura; Kozielski et al. (2021) empregam dados sensoriais no apoio a fornecedores. Esses estudos contextualizam o abastecimento, sem estabelecer proporcionalidade entre pressão e massa em recipientes com coexistência líquido–vapor. O GasTrack fornece aqui o contexto de integração entre sensor, ESP32, MQTT e processamento; não foram utilizadas medições dessa plataforma.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

A previsão de tempo até um evento se aproxima da vida útil remanescente estudada em prognóstico industrial (Taşcı; Omar; Ayvaz, 2023; Li et al., 2024), embora atingir um limiar de pressão não corresponda a uma falha mecânica. Neste trabalho, um gerador controlado permite examinar quais características do sinal contribuem para a previsão e quando essa contribuição se mantém. A contribuição pretendida é uma comparação reproduzível das informações disponíveis aos estimadores, com limites físicos e estatísticos explícitos.

A pergunta de pesquisa é: quanto do desempenho pode ser obtido com a pressão corrente e quanto depende de tendências, variabilidade, horário e escala do histórico? O objetivo é responder a essa pergunta por ablações reajustadas, comparadores supervisionados e de tendência, sensibilidade à janela e testes de transferência. Alterações de um fator por vez distinguem perturbações de medição de mudanças de consumo, e a análise por ciclo verifica se a ponderação por duração muda a interpretação.

2. Delimitação física e alvo

A relação p_abs V = Z n R T expressa a dependência entre pressão absoluta, volume, temperatura e quantidade de matéria, com fator de compressibilidade Z. Sob volume, temperatura e Z aproximadamente constantes, uma queda de pressão pode acompanhar a retirada de gás. Em alta pressão, Z = 1 requer avaliação da composição e da faixa de operação. Modelos de propriedades de fluidos reais, como REFPROP (Huber et al., 2022), oferecem uma base para calibração futura; não foram executados neste estudo.

A posição do sensor também importa: uma leitura a jusante de regulador pode permanecer aproximadamente constante durante a retirada do reservatório. Em GLP com duas fases, pressão depende do equilíbrio de fases e da temperatura e não fornece uma relação linear geral com massa. O benchmark utiliza trajetórias decrescentes fenomenológicas, sem composição específica, modelagem térmica ou equivalência validada com vazão mássica. Sua arquitetura de referência permanece uma possibilidade de integração.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

O alvo é o tempo até o primeiro cruzamento de 30 bar pela trajetória latente, sem ruído, interpolado entre as amostras que delimitam o evento. O valor é um parâmetro experimental, sem significado normativo ou de reserva segura. A previsão local divide a diferença entre pressão e limiar por uma taxa estimada de queda. Sua hipótese é que a tendência recente continue representativa até o evento; taxas próximas de zero tornam o horizonte sensível a pequenas perturbações.

3. Metodologia

3.1 Ciclos, parâmetros e observações

Em cada uma das dez sementes, de 0 a 9, são gerados 320 ciclos, 80 por regime. Sorteiam-se pressão inicial de U(145; 155) bar, taxa básica de U(1,2; 6,0) bar/h e horário inicial de U(0; 24) h. Com passo de cinco minutos, a trajetória latente subtrai a taxa básica multiplicada pelo fator de consumo e pela duração do passo. O regime estacionário tem fator 1; o diurno, $1 + 0{,}65\ \mathrm{sen}[2\pi(t + h0)/24]$; o regime por trechos sorteia fatores de U(0,25; 1,8) por blocos de três horas. O intermitente alterna fatores 1,6 e 0,08, com durações de U(0,5; 4,0) h e estado inicial equiprovável.

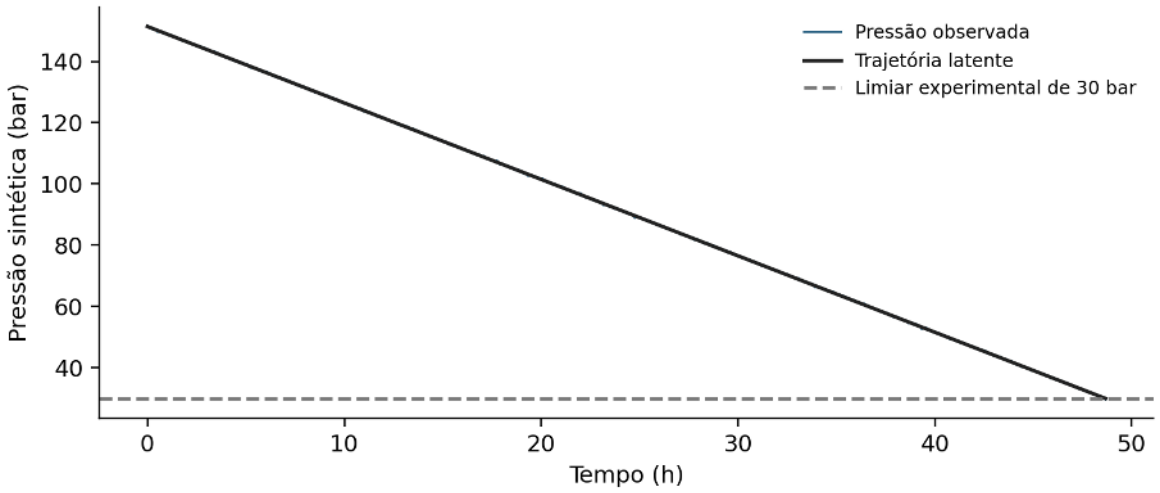
O sinal observado soma à trajetória uma oscilação de 24 h, amplitude de U(0; 1,8) bar e fase uniforme, além de ruído gaussiano independente com desvio-padrão de U(0,15; 0,80) bar, fixo por ciclo. Durações intermitentes são discretizadas em passos inteiros. O horizonte máximo é 240 h; ciclos sem evento são catalogados como censurados e não produzem alvos. Não houve censura nos 3200 ciclos principais ou nos 1200 do teste com distribuição alterada. A Figura 1 mostra um exemplo; não são simulados recargas, vazamentos, outliers ou falhas de comunicação.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

Figura 1 – Trajetória latente e pressão observada em um ciclo sintético, com limiar de 30 bar.



Fonte: elaboração dos autores (2026).

A pressão nominal de 150 bar encontra referência em produtos industriais documentados pela Air Liquide ([s.d.]); a faixa de ±5 bar é uma escolha experimental. A ficha WIKA A-10 especifica ruído de sinal de até 0,2% da amplitude da faixa (WIKA, 2026, p. 2–3), equivalente a 0,5 bar numa faixa hipotética de 0–250 bar. Esse limite não é desvio-padrão gaussiano nem calibra o ruído adotado. As fontes sustentam ordens de grandeza, sem identificar o gás ou o sensor real do GasTrack.

As taxas estacionárias nominalmente produzem horizontes de 20–100 h entre 150 e 30 bar e quedas de 0,10–0,50 bar por amostra, comparáveis ao ruído simulado. Essas relações fundamentam o desenho do teste, mas não constituem consumo medido. Períodos, durações e amplitudes introduzem escalas temporais controladas; não foram estimados em instalações. A tabela completa de parâmetros, sua justificativa e o gerador executável estão no suplemento.

3.2 Partições e características disponíveis

Os ciclos são permutados com semente 10000 + s e separados em 224 de treino e 96 de teste; a partição não é estratificada. Todas as janelas de um ciclo permanecem no mesmo conjunto. As previsões começam após uma hora e são emitidas a cada 30 minutos, inclusive perto do evento. Cada janela de uma hora contém 13 observações. A avaliação é retrospectiva; o evento futuro define apenas o alvo e não entra nos atributos.

Os dez atributos são pressão corrente; taxa líquida; taxa por mínimos quadrados; mediana das inclinações dos 78 pares da janela; taxa nos últimos 15 minutos; desvio-

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

padrão da pressão; desvio-padrão das primeiras diferenças; média das variações absolutas; seno e cosseno do horário com período de 24 h. Os desvios-padrão usam divisor n. Identificador, regime, pressão inicial, taxa latente e tempo final não são fornecidos ao modelo.

Para selecionar os novos comparadores, somente os 224 ciclos de treino são permutados novamente, com semente 310000 + s: 168 são usados no ajuste inicial e 56 na validação. Escolhido o parâmetro, Ridge é reajustado nos 224 ciclos; a meia-vida da tendência suavizada permanece fixa na aplicação a novas janelas. O teste original, a distribuição alterada e o novo painel não participam dessa seleção. Como a extensão sucede a análise do benchmark original, seus testes originais são retrospectivos; o controle do novo painel oferece uma avaliação adicional em ciclos ainda não usados na comparação.

3.3 Estimadores e ablações reajustadas

As extrapolações originais usam as duas últimas leituras, a queda líquida da janela, mínimos quadrados ou mediana das inclinações. Elas se abstêm se a taxa de queda for menor ou igual a 0,05 bar/h ou a pressão observada for menor ou igual a 30 bar. As referências constantes usam média ou mediana dos alvos do treino. Outra referência divide a diferença positiva entre pressão e limiar pela taxa média estimada exclusivamente nos ciclos de treino. Suas definições e resultados completos foram preservados no suplemento.

Random Forest (RF; Breiman, 2001) prevê diretamente o tempo restante, com 300 árvores, mínimo de cinco amostras por folha, 80% dos atributos por divisão, critério squared_error, bootstrap, profundidade sem limite e semente s. Os outros parâmetros seguem o scikit-learn 1.8.0. Essa configuração é fixa, sem busca de hiperparâmetros do RF. Os modelos reajustados recebem: pressão; pressão e tendências; pressão e variabilidade; pressão, tendências e variabilidade; ou todos os atributos, incluindo horário. O modelo de pressão usa seu único atributo em todas as divisões. A ablação compara desempenho após reajuste, sem identificar contribuição causal individual.

Ridge combina os mesmos dez atributos, padronizados com estatísticas do ajuste, e penaliza quadraticamente os coeficientes (Hoerl; Kennard, 1970). O parâmetro

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

α é escolhido pelo menor MAE na validação entre 0,1; 1; 10; 100; 1000. Após a escolha, padronização e regressão são reajustadas somente no treino completo. As previsões brutas são preservadas, inclusive negativas; cobertura finita não implica admissibilidade física.

A tendência suavizada ajusta uma reta aos 13 pontos da janela com pesos exponenciais maiores para observações recentes. A previsão usa a pressão ajustada no instante corrente e a taxa de queda dessa reta; aplica a mesma taxa mínima, com abstenção também se a pressão ajustada não exceder 30 bar. Comparam-se meias-vidas de 5, 15, 30 e 60 minutos e pesos uniformes. A escolha minimiza o MAE na interseção fixa de instantes válidos dos cinco candidatos na validação. Essa regra evita escolher um candidato apenas porque omite instantes difíceis; a cobertura no teste é reportada separadamente.

3.4 Perturbações, janelas e regime ausente

O teste conjunto com distribuição alterada, denominado OOD, gera 120 ciclos por repetição, com taxa de U(0,6; 8,0) bar/h, ruído de U(0,5; 1,5) bar, amplitude aditiva de U(0; 4,0) bar, período diurno de consumo de 12 h e duração intermitente máxima de 8 h. A oscilação aditiva mantém 24 h. Modelos e referências são aplicados sem reajuste. OOD designa esse deslocamento da mesma família sintética, não uma fonte externa de dados.

O novo painel gera 120 ciclos por semente, 30 por regime, com parâmetros marginais do cenário principal. Fluxos aleatórios específicos de semente e ciclo compartilham pressão inicial, parâmetros e inovações entre condições. A partir do controle, altera-se um único fator: dobra-se o desvio-padrão do ruído, a amplitude aditiva ou a taxa básica; reduz-se apenas o período de consumo diurno para 12 h; ou dobram-se apenas as durações intermitentes para U(1; 8) h antes da discretização. Alterações de período e duração são avaliadas no regime afetado. O gerador desse painel possui nova organização aleatória, documentada no código, e não reproduz os bytes dos ciclos originais.

Ruído e amplitude preservam tempos, alvos e instantes entre cenários. Mudanças de consumo podem alterar a duração e os instantes disponíveis; a comparação pareia

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

ciclos e apresenta MAE e macro-MAE para explicitar essa diferença. Os modelos permanecem ajustados no treino original. Não houve censura nas seis condições do novo painel. Ele permite atribuir diferenças ao fator manipulado dentro do simulador, sem estabelecer efeito causal em campo ou independência física em relação à família de geração.

A sensibilidade ao histórico compara janelas de 15, 30, 60, 120 e 240 minutos, com 4, 7, 13, 25 e 49 observações. Treino e teste começam após quatro horas em todas as condições, nos mesmos instantes e alvos. RF é reajustado por janela; pressão, taxa dos últimos 15 minutos e horário preservam suas definições. Para a regressão linear, também se calcula uma interseção fixa de instantes válidos nas cinco janelas. A análise caracteriza sensibilidade; não seleciona uma janela ótima para aplicação posterior.

No teste de regime ausente, retira-se cada regime dos ciclos originais de treino. Avaliam-se somente seus ciclos originais de teste, com janela de uma hora; os ciclos retirados não migram para o teste. RF controle usa uma subamostra do treino original com a mesma quantidade de ciclos e os quatro regimes presentes. O controle reduz a explicação por quantidade de ciclos, mas não iguala duração, número de linhas ou composição. As partições e sementes específicas estão no suplemento.

3.5 Métricas, incerteza e reprodução

As métricas principais usam previsões sem truncamento. Define-se erro como previsão menos alvo; MAE é a média do erro absoluto, RMSE a raiz do erro quadrático médio e cobertura a proporção de instantes com previsão finita. O macro-MAE atribui peso igual aos ciclos com ao menos uma previsão válida. Média e desvio-padrão amostral são calculados entre as dez sementes. Suporte próprio, interseção comum dos métodos e interseção pareada de cada contraste são distinguidos; não se atribui custo à abstenção. MAPE é secundário pela sensibilidade a alvos próximos de zero (Hyndman; Athanasopoulos, 2021).

Para diferenças pareadas, executam-se 10000 reamostragens hierárquicas: primeiro sementes e depois ciclos completos dentro de cada semente sorteada. Os dois métodos ou condições recebem os mesmos ciclos, preservando todas as suas janelas. Calcula-se a diferença de MAE ou macro-MAE por semente e sua média; os percentis

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

2,5 e 97,5 definem IC de 95%. A abordagem preserva agrupamentos em vez de tratar medidas repetidas como independentes (Saravanan; Berman; Sober, 2020). Nos contrastes entre métodos, o suporte é a interseção de previsões válidas do par; nos fatores, são os mesmos ciclos com instantes próprios.

Os intervalos são descritivos, sem ajuste por multiplicidade ou testes de equivalência. Usam apenas dez unidades externas e previsões já ajustadas; não reamostram o treino nem executam um novo ajuste em cada bootstrap. São estimativas condicionadas ao desenho sintético e aos modelos disponíveis, não intervalos preditivos nem garantias de cobertura em campo. Viés, proporções de erros acima de seis horas e caudas são analisados separadamente, com patamar descritivo e sem custos operacionais presumidos.

O suplemento preserva os experimentos originais e acrescenta os códigos da extensão, todas as predições, parâmetros selecionados, perdas por ciclo, intervalos e auditorias. A execução utilizou Python 3.12.14, NumPy 2.3.5, pandas 2.2.3 e scikit-learn 1.8.0. Métricas e escolhas de validação foram recalculadas; a tendência suavizada foi conferida por uma implementação alternativa de mínimos quadrados ponderados. O limite de 168 h permanece uma análise secundária, com alvos inalterados. Não se declara depósito público ou DOI inexistente.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

4. Resultados e discussão

4.1 Comparadores e suporte de avaliação

Tabela 1 – Comparação sem truncamento nos suportes próprios.

Método	MAE ID ± DP (h)	MAE OOD ± DP (h)	Cob. ID (%)	Cob. OOD (%)
RF	7,82 ± 0,82	18,06 ± 2,14	100,00	100,00
Ridge	8,92 ± 0,73	19,43 ± 2,19	100,00	100,00
Tendência suavizada	28,40 ± 2,29	35,98 ± 2,27	94,47	84,74
Linear	28,75 ± 3,25	36,14 ± 2,44	95,40	87,00
RF pressão isolada	10,64 ± 0,90	22,01 ± 2,29	100,00	100,00
Mediana histórica	15,59 ± 1,46	26,56 ± 2,40	100,00	100,00

Fonte: elaboração dos autores (2026). DP entre dez sementes. ID: distribuição principal; OOD: alteração conjunta. Cob.: cobertura. Métodos com abstenção usam instantes próprios; os contrastes pareados controlam esse suporte.

Ridge apresentou MAE de 8,92 ± 0,73 h na distribuição principal, reduzindo a distância entre o RF e um comparador supervisionado que recebe os mesmos atributos. A diferença Ridge − RF foi 1,10 [0,93; 1,27] h, no mesmo conjunto de instantes. Na distribuição alterada, foi 1,37 [1,19; 1,59] h. O contraste caracteriza essa grade de regularização e esse desenho; não demonstra superioridade do RF sobre toda configuração linear ou outra família de modelo.

A tendência suavizada selecionou meia-vida de 15 minutos nas dez validações. Seu MAE principal foi 28,40 h, com cobertura de 94,47%. Nos instantes válidos para o par, a diferença suavizada − RF foi 20,71 [18,81; 22,53] h. Suavizar a reta local não resolve, por si só, mudanças futuras de consumo. Os valores de Ridge incluem 4,70% de previsões negativas na distribuição principal e 6,06% na alterada; essas frequências médias foram calculadas por semente e não foram ocultadas por limitação a zero.

O macro-MAE principal foi 7,22 h para RF, 8,69 h para Ridge e 10,49 h com pressão isolada. Na interseção original das quatro extrapolações, RF e linear apresentaram MAEs de 7,37 e 20,48 h. Esse recorte e os contrastes pareados são suportes distintos. As extrapolações instantânea, por queda líquida e mediana, as referências completas e os resultados por horizonte permanecem no suplemento.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

No controle independente do novo painel, o RF apresentou MAE de 7,80 ± 0,79 h. Ridge apresentou 8,90 h, com diferença pareada de 1,11 [0,96; 1,26] h. A diferença pressão isolada − RF foi 2,83 [2,54; 3,12] h. Esses ciclos confirmam a direção dos contrastes principais dentro da mesma família sintética, sem substituir uma avaliação externa.

4.2 Informação das tendências, variabilidade e horário

Tabela 2 – Ablações com reajuste nos mesmos ciclos de treino.

Atributos disponíveis	Nº	MAE ID ± DP (h)	MAE OOD ± DP (h)
Pressão	1	10,64 ± 0,90	22,01 ± 2,29
Pressão + tendências	5	7,97 ± 0,71	18,01 ± 2,09
Pressão + variabilidade	4	8,01 ± 0,76	18,81 ± 2,43
Pressão + tendências + variabilidade	8	7,96 ± 0,75	18,03 ± 2,19
Todos, incluindo horário	10	7,82 ± 0,82	18,06 ± 2,14

Fonte: elaboração dos autores (2026). Nº: quantidade de atributos. Cobertura integral em todos os modelos. Variabilidade inclui o desvio-padrão da pressão, que também depende da magnitude de sua tendência.

Tabela 3 – Diferenças pareadas de MAE com IC de 95%.

Contraste (primeiro modelo − referência)	Δ ID [IC 95%] (h)	Δ OOD [IC 95%] (h)
Tendências após pressão	-2,67 [-2,95; -2,37]	-4,00 [-4,31; -3,67]
Variabilidade após tendências	-0,01 [-0,09; 0,08]	0,02 [-0,19; 0,26]
Horário após janela	-0,15 [-0,23; -0,06]	0,02 [-0,04; 0,09]
Ridge − RF	1,10 [0,93; 1,27]	1,37 [1,19; 1,59]

Fonte: elaboração dos autores (2026). Valores negativos favorecem o primeiro modelo. Bootstrap hierárquico pareado, 10000 reamostragens; intervalos descritivos, sem correção por multiplicidade.

Acrescentar tendências à pressão reduziu o MAE de 10,64 para 7,97 h. A diferença de macro-MAE foi -3,09 [-3,40; -2,78] h. A redução também se manteve no teste alterado. Isso sustenta contribuição preditiva do histórico em relação à pressão corrente nesse benchmark, com coerência entre ponderação por instante e por ciclo.

A inclusão posterior de variabilidade teve diferença média de MAE de -0,01 [-0,09; 0,08] h na principal e 0,02 [-0,19; 0,26] h na alterada. Os intervalos atravessam zero e não demonstram equivalência. Pressão e variabilidade, sem as quatro taxas explícitas,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

também reduziram o erro frente à pressão isolada: -2,62 [-2,93; -2,32] h. Esses atributos carregam informação sobre a magnitude da queda, além da irregularidade; os dois grupos podem fornecer informações parcialmente redundantes.

O horário acrescentou uma redução pequena na distribuição principal, mas não apresentou vantagem de direção definida no intervalo do teste alterado (Tabela 3). O período de consumo principal coincide com a codificação de 24 h, enquanto o alterado usa 12 h. As ablações não isolam causalidade de cada atributo: seu número e a seleção de atributos por divisão mudam com o reajuste. A conclusão específica é que grupos derivados da janela melhoram a previsão frente à pressão isolada, com benefício adicional de variabilidade e horário dependente do contraste.

4.3 Alterações de um fator por vez

Tabela 4 – RF no painel novo: efeito isolado com peso igual por ciclo.

Fator alterado / regime avaliado	Macro-MAE controle (h)	Macro-MAE alterado (h)	Δ macro [IC 95%] (h)
Ruído ×2 / todos	7,14	7,57	0,43 [0,28; 0,58]
Oscilação ×2 / todos	7,14	7,24	0,10 [0,07; 0,13]
Taxa ×2 / todos	7,14	7,82	0,68 [0,33; 1,01]
Período diurno 12 h / diurno	6,58	7,52	0,94 [0,45; 1,40]
Duração intermitente ×2 / intermitente	9,68	10,42	0,73 [0,33; 1,18]

Fonte: elaboração dos autores (2026). Cada cenário compartilha os parâmetros e inovações do controle. Ruído e amplitude preservam os mesmos instantes; consumo pode alterar duração. IC pareia sementes e ciclos; nenhum cenário foi usado no ajuste.

Dobrar o ruído aumentou o macro-MAE em 0,43 [0,28; 0,58] h; dobrar a oscilação aditiva aumentou-o em 0,10 [0,07; 0,13] h. As respostas são diferentes em magnitude e não podem ser deduzidas da mudança conjunta do teste OOD. Reduzir o período de consumo diurno e prolongar os estados intermitentes também elevaram o erro médio por ciclo no regime correspondente, mantendo as outras condições do gerador.

Com taxa dobrada, o MAE global do RF passou de 7,80 para 7,58 h; a diferença foi -0,21 [-0,87; 0,40] h. O macro-MAE, porém, aumentou de 7,14 para 7,82 h. Consumo mais rápido altera o horizonte e o número de instantes por ciclo, modificando a

CC BY

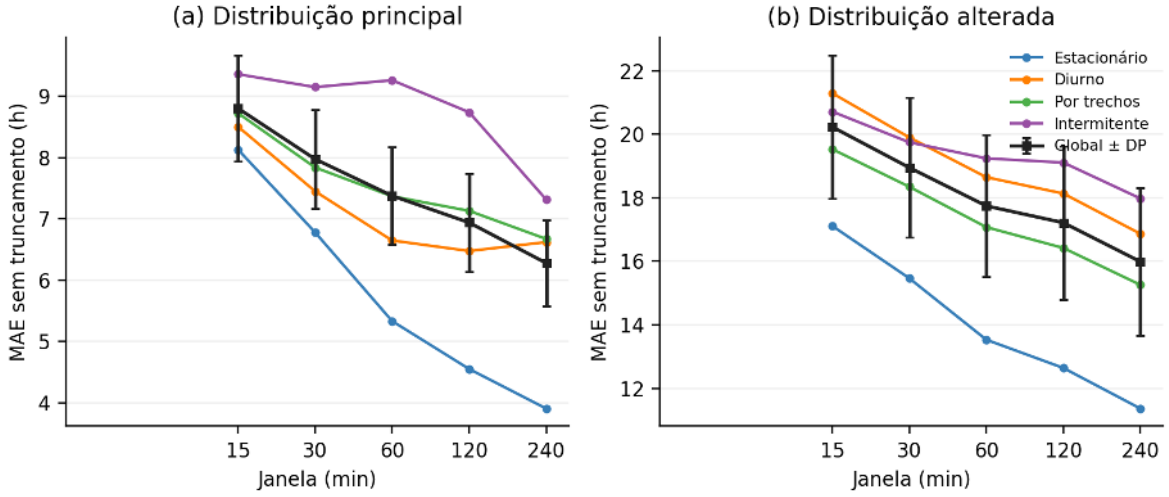
REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

ponderação do erro agregado. O teste não sustenta uma conclusão de robustez baseada apenas no MAE global.

4.4 Escala do histórico e transferência de regime

Figura 2 – MAE do RF por janela e regime nos mesmos instantes após quatro horas. Barras na curva global: um desvio-padrão entre dez sementes.



Fonte: elaboração dos autores (2026). Dados sintéticos do benchmark revisado.

O MAE global do RF caiu de 8,80 para 6,28 h entre 15 e 240 minutos na distribuição principal e de 20,23 para 15,99 h na alterada. Frente à janela de uma hora, a diferença de quatro horas foi -1,10 [-1,27; -0,93] h na principal e -1,76 [-2,03; -1,47] h na alterada. Esses testes não avaliam previsões antes das quatro horas nem validam um tamanho escolhido como ótimo.

No diurno principal, o MAE do RF passou de 6,48 para 6,62 h entre duas e quatro horas, apesar da melhora global. No intermitente alterado, o MAE da regressão linear subiu de 28,45 para 33,64 h entre 30 e 240 minutos, nos mesmos 45,79% dos instantes válidos. Janelas longas podem reduzir ruído e agregar estados anteriores; o teste não decompõe esses mecanismos.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

Tabela 5 – Regime ausente do treino: comparação com controle de igual quantidade de ciclos.

Regime retirado	MAE sem regime ± DP (h)	MAE controle ± DP (h)	Δ MAE [IC 95%] (h)
Estacionário	6,82 ± 0,86	5,66 ± 0,96	1,16 [0,95; 1,39]
Diurno	8,08 ± 0,44	7,15 ± 0,62	0,93 [0,69; 1,20]
Por trechos	8,09 ± 1,41	7,87 ± 1,38	0,23 [-0,02; 0,52]
Intermitente	11,02 ± 1,24	9,98 ± 1,54	1,04 [0,66; 1,41]

Fonte: elaboração dos autores (2026). Mesmos instantes no teste original de cada regime; janela de uma hora. O controle contém os quatro regimes e iguala ciclos, sem igualar linhas. Valores positivos indicam erro maior após retirada.

A retirada aumentou o MAE médio nos quatro regimes, mas o intervalo por instante do regime por trechos incluiu zero (Tabela 5). Nesse regime, a diferença de macro-MAE foi 0,41 [0,18; 0,66] h. A dependência da ponderação impede apresentar todas as retiradas como uma deterioração estatisticamente uniforme. Os demais intervalos de MAE ficaram acima de zero no desenho avaliado.

No estacionário ausente do treinamento, o RF teve MAE de 6,82 h, ante 6,28 h da extrapolação linear, cuja cobertura foi 99,55%. Os suportes próprios diferem ligeiramente. Esse resultado impede afirmar superioridade incondicional do modelo aprendido; representar o regime no ajuste importa mesmo quando o modelo retorna previsões finitas.

4.5 Caudas de erro e validade das conclusões

Na distribuição principal, 20,81% das previsões do RF superestimaram o alvo em mais de seis horas; o percentil 95 de max(erro; 0), incluindo zeros, foi 17,97 h. No teste alterado, esses valores foram 19,38% e 19,23 h. Não são taxas de falha de abastecimento: nenhuma política de reposição ou antecedência aceitável foi simulada. O papel da interpretação sensorial, discutido também por Viegas Junior (2026) em manutenção hidráulica, exige aqui distinguir erro de previsão de consequência operacional.

O limite secundário de 168 h reduziu o MAE da regressão linear de 28,75 para 18,24 h na principal. Essa redução decorre do pós-processamento das previsões extremas, com alvos inalterados. O resultado limitado não substitui o estimador bruto;

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

métricas completas de truncamento, RMSE, MAPE, viés e horizontes próximos do evento estão no suplemento.

A limitação central permanece a origem sintética e a ausência de calibração física. O novo painel isola fatores e usa ciclos independentes, mas conserva a mesma família fenomenológica, ruído gaussiano e oscilações regulares. Não foram avaliados censura com evento desconhecido, reposição antecipada, falhas de sensor, recargas ou um segundo simulador termodinâmico. Os intervalos condicionais e a grade limitada dos comparadores também restringem o alcance da comparação; não constituem uma classificação universal de algoritmos.

Uma avaliação externa requer dados prospectivos ou um simulador de outra família, com composição do gás, temperatura, volume, pressão absoluta ou manométrica e posição do sensor documentados. Modelos e parâmetros precisam ser congelados antes dessa avaliação. Também será necessário registrar o evento operacional e os ciclos interrompidos por reposição. Sem essa base, não se pode afirmar previsão de massa remanescente, autonomia segura ou benefício econômico em instalações reais.

5. Conclusão

No benchmark avaliado, acrescentar tendências à pressão reduziu o MAE de 10,64 para 7,97 h, com redução também no erro por ciclo e no teste de distribuição alterada. A variabilidade forneceu informação útil quando combinada apenas com a pressão, mas acrescentá-la depois das tendências trouxe pequena diferença média, com intervalos atravessando zero. O horário teve benefício pequeno na distribuição principal e não mostrou vantagem de direção definida no teste alterado. A contribuição do estudo é identificar esses contrastes e seus limites, além do desempenho global de 7,82 h do RF.

Os novos comparadores, os fatores isolados e os intervalos pareados tornam a comparação mais informativa. Ruído, escalas de consumo e disponibilidade de regimes no ajuste alteram os erros; o histórico mais longo melhora a média global do RF, mas pode prejudicar extrapolações locais. A taxa dobrada mostrou que MAE por instante e

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

erro por ciclo podem mudar em direções diferentes. Esses resultados justificam explicitar suporte, duração e informação disponível antes de escolher um estimador.

As conclusões permanecem computacionais. Referências comerciais e instrumentais situam a escala dos parâmetros, sem substituir medições ou simulação termodinâmica calibrada. A próxima etapa é uma avaliação externa com alvo e condições físicas documentados, modelos congelados e custos de decisão observados. O código e as saídas disponibilizados permitem reproduzir as comparações atuais sem atribuir ao GasTrack desempenho de campo que não foi medido.

Declarações

Disponibilidade de dados e código

O arquivo GasTrack_Autonomia_Material_Suplementar.zip acompanha o manuscrito com código, sementes, partições, parâmetros, predições, métricas, figuras adicionais, auditorias e instruções de reprodução. Os dados são inteiramente sintéticos. O pacote conserva as versões anteriores e acrescenta a extensão 4.0; não há repositório público ou DOI de depósito declarado.

Financiamento

A pesquisa não recebeu financiamento específico de agências de fomento públicas, comerciais ou sem fins lucrativos.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses. A plataforma GasTrack é utilizada como referência arquitetural, e o estudo não apresenta desempenho operacional do sistema.

Referências

AIR LIQUIDE. Oxygen. [s.d.]. Disponível em: https://in.airliquide.com/products-services/our-gases/oxygen. Acesso em: 10 out. 2026.

ATZORI, Luigi; IERA, Antonio; MORABITO, Giacomo. The Internet of Things: a survey. Computer Networks, v. 54, n. 15, p. 2787–2805, 2010. DOI: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010.

BALOGUN, Dennis et al. LPG Smart Guard: an IoT-based solution for real-time gas cylinder monitoring and safety in smart homes. Engineering Proceedings, v. 82, n. 1, art. 9, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/ecsa-11-20471.

BREIMAN, Leo. Random forests. Machine Learning, v. 45, p. 5–32, 2001. DOI: https://doi.org/10.1023/A:1010933404324.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 21/08/2026 - **Accepted:** 14/10/2026
Vol: 13.22
DOI: 10.66104/253dp814
Pages: 1-18

GUBBI, Jayavardhana et al. Internet of Things (IoT): a vision, architectural elements, and future directions. Future Generation Computer Systems, v. 29, n. 7, p. 1645–1660, 2013. DOI: https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010.

HOERL, Arthur E.; KENNARD, Robert W. Ridge regression: biased estimation for nonorthogonal problems. Technometrics, v. 12, n. 1, p. 55–67, 1970. DOI: https://doi.org/10.1080/00401706.1970.10488634.

HUBER, Marcia L.; LEMMON, Eric W.; BELL, Ian; McLINDEN, Mark O. The NIST REFPROP database for highly accurate properties of industrially important fluids. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2022. DOI: https://doi.org/10.1021/acs.iecr.2c01427.

HYNDMAN, Rob J.; ATHANASOPOULOS, George. Forecasting: principles and practice. 3. ed. Melbourne: OTexts, 2021. Disponível em: https://otexts.com/fpp3/accuracy.html. Acesso em: 10 out. 2026.

KOZIELSKI, Michał et al. A sensor data-driven decision support system for liquefied petroleum gas suppliers. Applied Sciences, v. 11, n. 8, art. 3474, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/app11083474.

LI, Junhuai et al. A dual-scale transformer-based remaining useful life prediction model in industrial Internet of Things. IEEE Internet of Things Journal, v. 11, n. 16, p. 26656–26667, 2024. DOI: https://doi.org/10.1109/JIOT.2024.3376706.

SARAVANAN, Varun; BERMAN, Gordon J.; SOBER, Samuel J. Application of the hierarchical bootstrap to multi-level data in neuroscience. arXiv:2007.07797, 2020. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2007.07797. Acesso em: 10 out. 2026.

TAŞCI, Bernar; OMAR, Ammar; AYVAZ, Serkan. Remaining useful lifetime prediction for predictive maintenance in manufacturing. Computers & Industrial Engineering, v. 184, art. 109566, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109566.

VIEGAS JUNIOR, Daniel Magalhães. Arquiteturas sensoriais para manutenção preditiva baseada em IoT: uma revisão dos métodos de monitoramento de condição em sistemas hidráulicos industriais. Revista Tópicos, v. 4, n. 33, p. 1–22, 2026. DOI: https://doi.org/10.70773/revistatopicos/778380239.

WIKA. Pressure transmitter for general industrial applications: model A-10. Data sheet PE 81.60, fev. 2026, p. 2–3. Disponível em: https://shop.wika.com/media/Data-sheets/Pressure/Pressure-sensors/ds_pe8160_en_co.pdf. Acesso em: 10 out. 2026.

CC BY