EVENTO ON-LINE
ConBRepro
XVI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
02 a 04 de dezembro de 2026
Inovação e Transformação Digital como Estratégia Competitiva nas Engenharias

APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO NO MONITORAMENTO DE CALDEIRAS INDUSTRIAIS: UMA ANÁLISE POR CARTAS I-MR COM SUPORTE DA LINGUAGEM R

Lucas Azevedo dos Santos

Gestão da Produção Industrial – FATEC Sertãozinho

Adrian Sidnei Santos Pereira

Gestão da Produção Industrial – FATEC Sertãozinho

Juliano Endrigo Sordan

Gestão da Produção Industrial – FATEC Sertãozinho

Resumo: A busca por eficiência energética e estabilidade operacional é importante em processos industriais que dependem da geração contínua de vapor, pois variações no consumo de combustível e na produção podem elevar custos e reduzir o desempenho do sistema. O estudo analisou a aplicação do Controle Estatístico de Processo (CEP) para monitorar a eficiência operacional de uma caldeira industrial em uma fábrica de ração animal no interior de São Paulo. A pesquisa, seguiu a abordagem Design Science Research (DSR), empregando dados operacionais coletados em abril de 2026, incluindo o consumo de gás e a produção de vapor, além de um indicador de eficiência calculado pela razão entre o vapor produzido e o gás consumido. Para a análise, foram construídas cartas de controle do tipo I-MR com apoio da linguagem R. Os resultados mostraram que o processo permaneceu estável na maior parte do período, com poucas ocorrências fora dos limites de controle. As principais variações foram associadas a paradas programadas, à redução de carga e a mudanças na rotina operacional da planta. Conclui-se que o CEP é uma ferramenta eficaz para acompanhar a variabilidade dos parâmetros da caldeira, identificar desvios e apoiar decisões voltadas à melhoria da eficiência energética e do controle operacional.

Palavras-chave: Caldeira industrial, cartas I-MR, Controle Estatístico de Processo, Eficiência energética, Monitoramento de processo.

Abstract: The pursuit of energy efficiency and operational stability is important in industrial processes that depend on continuous steam generation, as variations in fuel consumption and production can increase costs and reduce system performance. This study analyzed the application of Statistical Process Control (SPC) to monitor the operational efficiency of an industrial boiler at an animal feed factory in the interior of São Paulo. The research followed the Design Science Research (DSR) approach, using operational data collected in April 2026, including gas consumption and steam production, and an efficiency indicator calculated as the ratio of steam produced to gas consumed. For the analysis, I-MR control charts were constructed using the R programming language. The results showed that the process remained stable for most of the period, with few occurrences outside the control limits. The main variations were associated with scheduled shutdowns, load reductions, and changes in the plant's operational routine. The results suggest that SPC is an effective tool for monitoring boiler parameter variability, identifying deviations, and supporting decisions to improve energy efficiency and operational control.

Keywords: Boiler, Energy efficiency, I-MR charts, Process monitoring, Statistical Process Control.

1. Introdução

A busca por eficiência energética na indústria tem se tornado cada vez mais relevante, especialmente em processos que dependem de sistemas de utilidades para sustentar a produção. No segmento de alimentos balanceados para cães e gatos, esse desafio é agravado pela necessidade de manter elevada capacidade produtiva com uso eficiente dos recursos. Nesse contexto, as caldeiras geradoras de vapor desempenham papel central, pois seu desempenho está diretamente relacionado ao consumo de combustível e à disponibilidade de vapor para o processo produtivo.

O presente estudo foi realizado em uma indústria de ração animal localizada no interior do estado de São Paulo, na região metropolitana de Ribeirão Preto. O Controle Estatístico de Processo (CEP) é empregado como ferramenta para monitorar a estabilidade das variáveis operacionais, identificar causas assinaláveis de desvios, reduzir desperdícios e apoiar decisões baseadas em dados. A eficiência da caldeira é influenciada pela qualidade da combustão, pelas condições da superfície de troca térmica e pelo isolamento do sistema; incrustações e falhas operacionais podem elevar o consumo de combustível e reduzir o rendimento global do equipamento.

O CEP permite acompanhar a variabilidade dos parâmetros operacionais e identificar desvios que possam comprometer o desempenho energético. A literatura sobre a eficiência de caldeiras concentra-se principalmente em métodos de balanço energético diretos e indiretos e em abordagens estatísticas multivariadas e preditivas aplicadas a grandes plantas. Paralelamente, trabalhos sobre CEP em R demonstram sua viabilidade em outros contextos industriais, mas sem aplicação direta ao monitoramento de caldeiras.

Na literatura consultada, não foi encontrada aplicação conjunta de cartas de controle I-MR, construídas em linguagem R, especificamente para acompanhar a eficiência operacional de caldeiras no setor alimentício. Essa lacuna caracteriza o diferencial do presente estudo, que propõe uma alternativa acessível e reproduzível em comparação a abordagens mais complexas ou dependentes de softwares comerciais. A questão de pesquisa é: *como a aplicação do CEP pode contribuir para avaliar a eficiência da caldeira, apoiar o monitoramento da variabilidade dos parâmetros operacionais e controlar o desempenho energético do sistema?*

Para responder à questão, desenvolveu-se e avaliou-se, sob a perspectiva da Design Science Research, um artefato em linguagem R capaz de monitorar a variabilidade das principais variáveis da caldeira, gerar cartas I-MR e apoiar a identificação de causas especiais de desvio. A utilização do R também se justifica pela acessibilidade, pela capacidade de automatização e pela possibilidade de reprodução das análises, o que favorece o acompanhamento sistemático do desempenho energético.

2. Fundamentação Teórica

As caldeiras industriais são equipamentos utilizados para gerar vapor a partir da transferência de calor do combustível para a água. A eficiência energética desses sistemas depende da qualidade da combustão, das condições das superfícies de troca térmica, do isolamento térmico e do controle das perdas de calor. Portanto, o acompanhamento do consumo de combustível e da produção de vapor é importante para avaliar o rendimento da caldeira e identificar oportunidades de redução de desperdícios (Beccalli, 2024).

A escolha da tecnologia de geração de vapor deve considerar não apenas a eficiência energética, mas também fatores como o custo de investimento, a manutenção, a disponibilidade de combustível, a segurança e o impacto ambiental. A aplicação do método

multicritério TODIM em uma fábrica de celulose demonstrou que a análise conjunta desses critérios pode apoiar decisões mais adequadas na seleção de caldeiras e sistemas de geração de vapor (Sales, 2025). A análise de dados operacionais também permite prever o comportamento da geração de vapor.

A utilização de redes neurais artificiais em caldeiras de recuperação química demonstrou que variáveis operacionais podem ser relacionadas à geração específica de vapor, contribuindo para a predição do desempenho e para a identificação de condições que podem afetar a eficiência do processo (Costa, 2024).

O CEP é uma metodologia utilizada para acompanhar a variabilidade e a estabilidade dos processos produtivos. Por meio das cartas de controle, é possível diferenciar variações normais de causas especiais, identificar não conformidades e apoiar ações corretivas (Montgomery, 2000). A aplicação do CEP em uma fábrica de chapas de gesso permitiu identificar causas assinaláveis e propor melhorias para manter os requisitos de qualidade do processo (Oliveira; Silva; Santos, 2023).

As cartas de controle para valores individuais e amplitude móvel são adequadas para o monitoramento de dados coletados individualmente ao longo do tempo, como consumo diário de gás, produção de vapor e eficiência operacional. Em uma indústria têxtil, a utilização da carta I-AM permitiu acompanhar a eficiência produtiva e identificar variações que exigiam análise e intervenção no processo (Carmo, 2025).

A aplicação do CEP também é importante em processos alimentícios, pois permite verificar se as características dos produtos permanecem dentro dos padrões estabelecidos. Em uma indústria de alimentos, as cartas de controle indicaram instabilidade no peso dos produtos, o que demonstra que valores acima da especificação podem gerar desperdícios e custos adicionais para a empresa (Lira, 2023). O uso de ferramentas computacionais facilita a aplicação do CEP, pois possibilita automatizar cálculos, elaborar gráficos e analisar a capacidade dos processos.

A linguagem R, por meio do pacote qcc, permite construir diversos tipos de cartas de controle, incluindo gráficos para medidas individuais e amplitude móvel, favorecendo a aplicação do CEP em empresas e ambientes acadêmicos (Walter; Henning; Zvirtes, 2024). O armazenamento e a visualização dos dados produtivos contribuem para uma gestão mais eficiente. A utilização de gráficos de controle, de dispersão e de correlação permite interpretar tendências e relações entre variáveis, gerando informações úteis para tomadas de decisão mais rápidas e assertivas (Felippe, 2024).

A integração entre CEP e inteligência artificial amplia as possibilidades de monitoramento industrial. Técnicas de aprendizado de máquina podem reconhecer padrões, apoiar a classificação de comportamentos e realizar previsões, tornando os gráficos de controle mais flexíveis para processos com alto volume de dados e características operacionais diversas (Ferreira; Boaventura; Fiaccone, 2022).

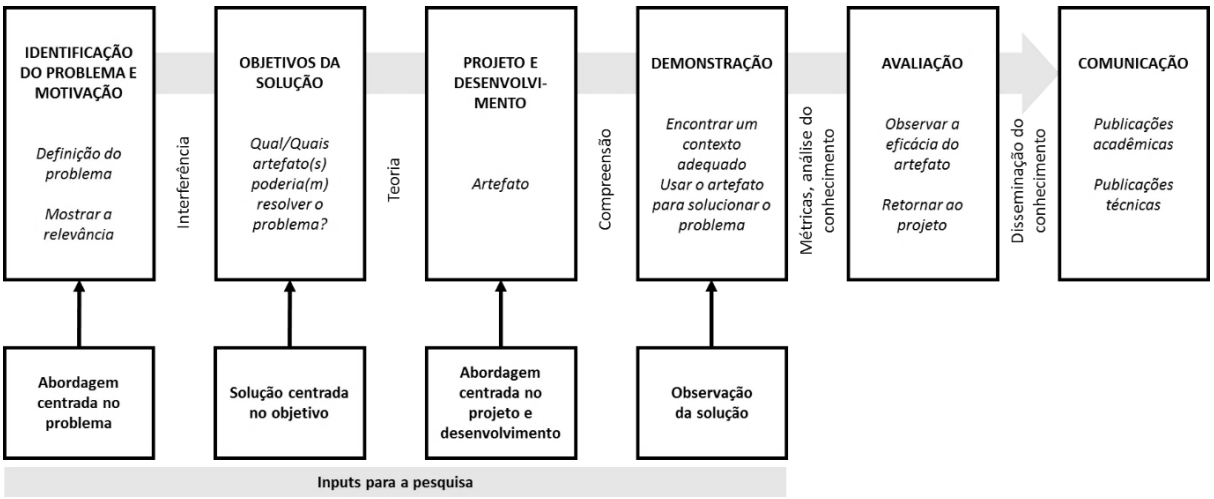
Dessa forma, a integração entre eficiência energética, geração de vapor, análise de dados e CEP oferece uma base adequada para o monitoramento de caldeiras industriais. Essa combinação permite acompanhar o consumo de combustível, a produção de vapor e a eficiência operacional, identificar desvios, reduzir desperdícios e apoiar ações de melhoria contínua.

3. Método de pesquisa

O estudo foi conduzido sob a perspectiva da Design Science Research (DSR), uma abordagem voltada à concepção e à avaliação de artefatos para resolver problemas concretos das organizações (Lacerda et al., 2013). O artefato desenvolvido consiste em

uma rotina de monitoramento estatístico da caldeira, desenvolvida em linguagem R, capaz de calcular um indicador de eficiência e gerar cartas de controle I-MR. As etapas de concepção, teste e avaliação seguiram como referência uma adaptação da Design Science Research (DSR), conforme proposto por Sordan et al. (2024).

Figura 1 – Modelo processual da Design Science Research



Fonte: Adaptado de Sordan et al. (2024).

A pesquisa foi realizada em uma fábrica de ração animal situada na região metropolitana de Ribeirão Preto (SP), com dados extraídos do sistema de supervisão da planta ao longo de abril de 2026. As variáveis acompanhadas foram o consumo de gás (Sm^3) e produção de vapor (Kg), totalizando 27 observações diárias válidas, após a exclusão dos dias sem operação efetiva (04 e 05 de abril, referentes a uma parada programada).

O problema que originou o artefato foi a ausência de um mecanismo sistemático para distinguir, no dia a dia, variações normais de causas específicas no consumo de gás e na produção de vapor. Esperava-se que a rotina calculasse automaticamente a linha central e os limites de controle, apontasse os dias fora do padrão esperado e traduzisse a relação entre o gás consumido e o vapor produzido em um único indicador de eficiência.

Para a construção do artefato, adotou-se o CEP por meio de cartas de controle do tipo I-MR, apropriadas quando cada variável é medida uma única vez por período, sem formação de subgrupos. A Carta de Indivíduos acompanha o nível da variável ao longo do tempo, enquanto a Carta de Amplitude Móvel mede a variação entre observações consecutivas. Essa técnica tem origem nos trabalhos de Shewhart, na década de 1920, sobre controle estatístico da qualidade, consolidados posteriormente na obra de referência sobre métodos estatísticos aplicados ao controle de qualidade (Shewhart, 1986). As constantes utilizadas no cálculo dos limites de controle para dados individuais decorrem da amplitude móvel entre pares de observações consecutivas (n = 2), conforme estabelecido por Montgomery (2000). A rotina foi escrita em R e executada no RStudio, versão 4.5.3.

Ferramentas de inteligência artificial foram utilizadas como apoio à elaboração e depuração do código, permanecendo sob responsabilidade dos autores as decisões metodológicas, estatísticas e interpretativas. As planilhas foram organizadas no Microsoft Excel antes da entrada no R. O cálculo dos limites seguiu as equações clássicas do CEP para cartas de indivíduos e amplitude móvel (I-MR), conforme apresentado por Montgomery (2000):

Equação 1, correspondente à média aritmética das observações individuais:

$$X = \frac{\Sigma Xi}{n} \quad (1)$$

Equação 2, correspondente à amplitude móvel entre observações consecutivas:

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}| \quad (2)$$

Equação 3, correspondente à amplitude móvel média:

$$MR = \frac{\Sigma MRi}{n-1} \quad (3)$$

Equação 4, correspondente ao limite superior de controle da Carta de Indivíduos:

$$LSC = X + 2{,}66 \cdot MR \quad (4)$$

Equação 5, correspondente ao limite inferior de controle da Carta de Indivíduos:

$$LIC = X - 2{,}66 \cdot MR \quad (5)$$

Equação 6, correspondente à linha central da Carta de Indivíduos:

$$LC = X \quad (6)$$

Equação 7, correspondente ao limite superior de controle da Carta de Amplitude Móvel:

$$LSC_{MR} = D_4 \cdot MR \quad (7)$$

(sendo D4 = 3,267 para n = 2)

Equação 8, correspondente à linha central da Carta de Amplitude Móvel:

$$LC_{MR} = MR \quad (8)$$

Equação 9, correspondente ao indicador operacional de eficiência relativa vapor/gás:

$$\eta_{proxy} = \frac{Produção\ de\ Vapor}{Consumo\ de\ Gás} \times 1 \quad (9)$$

A avaliação do artefato considerou a correspondência entre pontos fora de controle e eventos operacionais reais e documentados. Essa correspondência foi adotada como critério de validação da rotina como ferramenta de apoio ao monitoramento contínuo da caldeira.

4. Resultados e Discussão

A aplicação do CEP permitiu avaliar o comportamento operacional da caldeira em abril de 2026. As cartas I-MR evidenciaram variações pontuais no consumo de gás, na produção de vapor e na eficiência operacional, permitindo relacioná-las a paradas programadas e a reduções de carga. De modo geral, o processo permaneceu estável durante a maior parte do período, com poucas ocorrências fora dos limites de controle.

Os dados mostram que, na maior parte dos dias úteis, o consumo de gás permaneceu entre 7.800 e 9.200 m³ e a produção de vapor, entre 98.000 e 118.000 kg. Os dias 04 e 05 apresentaram valores iguais a zero por não haver operação, sendo excluídos do CEP. O terceiro dia apresentou consumo de 717,50 m³ e produção de 8.818 kg, caracterizando uma operação bastante reduzida devido a uma parada antecipada programada. Também ocorreram reduções parciais nos dias 12 e 19, relacionadas à escala de trabalho e à necessidade de redução da carga operacional.

Tabela 1 – Dados de consumo de gás e produção de vapor em abril de 2026

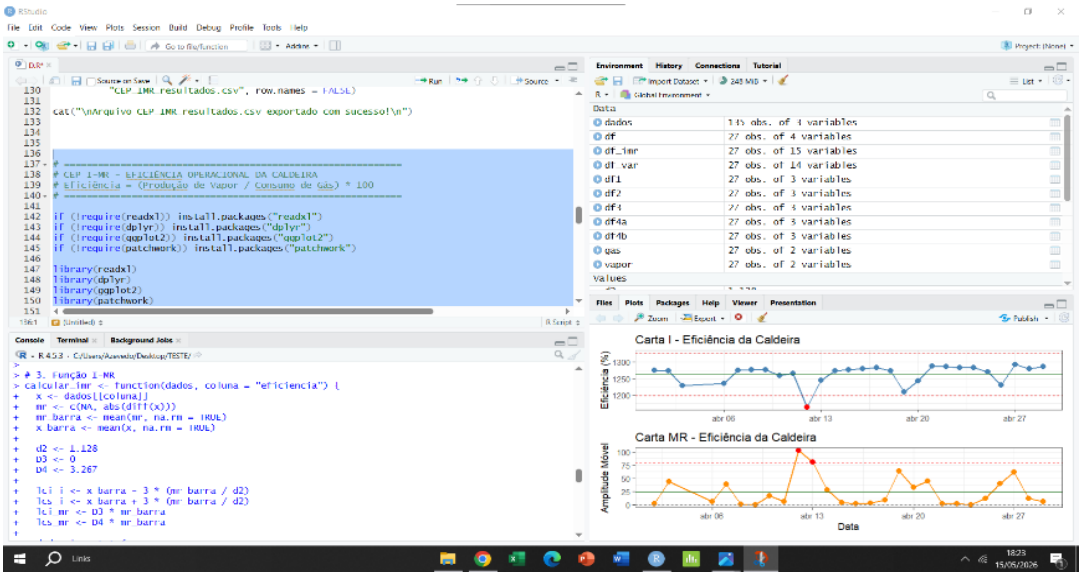
Resultados Análise Consumo de gás VS Produção de vapor das caldeiras		
Data	**CONSUMO DE GÁS (m³)**	**PRODUÇÃO DE VAPOR (kg)**
01/04/2026	8.496,13	108.312
02/04/2026	7.844,50	99.841
03/04/2026	717,50	8.818
04/04/2026	0	0
05/04/2026	0	0
06/04/2026	4.943,63	61.087
07/04/2026	8.899,76	113.476
08/04/2026	9.003,45	114.947
09/04/2026	8.520,51	108.762
10/04/2026	7.819,00	98.482
11/04/2026	8.396,50	106.252
12/04/2026	4.978,75	57.902
13/04/2026	6.848,00	85.199
14/04/2026	8.135,13	103.525
15/04/2026	8.339,25	106.472
16/04/2026	8.722,00	111.565
17/04/2026	8.873,50	113.772
18/04/2026	5.711,88	72.717
19/04/2026	2.635,38	31.870
20/04/2026	5.989,38	74.404
21/04/2026	9.025,25	116.191
22/04/2026	8.439,25	108.473
23/04/2026	7.935,50	101.790
24/04/2026	8.551,13	109.651
25/04/2026	7.995,25	101.531
26/04/2026	5.227,50	64.316
27/04/2026	9.190,50	118.738
28/04/2026	9.084,75	116.246
29/04/2026	8.727,25	112.189

Fonte: Dados da pesquisa

A necessidade de estruturar um código que contemplasse todas as etapas da análise, desde a leitura dos dados até a geração dos gráficos e exportação dos resultados, recorreu-se ao suporte da ferramenta de inteligência artificial Perplexity AI, modelo Sonnet 4.6. A utilização da IA teve como objetivo apoiar a construção do script, garantindo a correta aplicação das fórmulas estatísticas do CEP e a automatização das etapas de processamento dos dados.

O desenvolvimento do script ocorreu de forma iterativa, em que os dados operacionais das caldeiras foram descritos ao modelo, que retornou códigos progressivamente refinados conforme as necessidades do estudo. O script final contemplou os dados coletados, desenvolvendo o cálculo da linha central, dos limites de controle superior e inferior para as cartas I e MR, a geração dos gráficos e a exportação dos resultados em formato de imagem. A Figura 2 registra o ambiente RStudio durante o desenvolvimento das cartas.

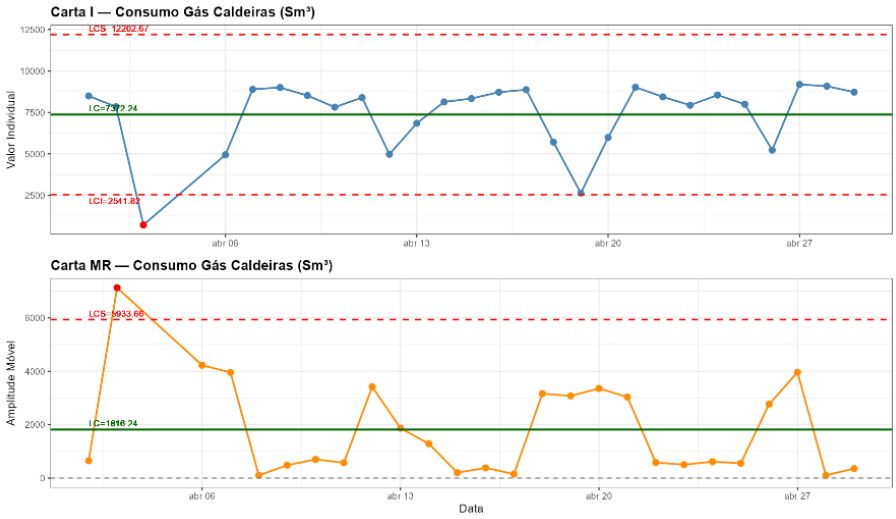
Figura 2 – Interface do R/RStudio durante o desenvolvimento das cartas de controle I-MR



Fonte: Dados da pesquisa.

Para o consumo de gás, a Carta I apresentou linha central de 7.372,24 Sm³, limite superior de 12.202,67 Sm³ e limite inferior de 2.541,82 Sm³. A maior parte das observações permaneceu dentro dos limites, indicando estabilidade nos dias de operação normal. O único ponto fora do limite inferior ocorreu em 03 de abril, com 717,50 Sm³, associado à operação significativamente reduzida. Na Carta MR, a linha central foi de 1.816,24 Sm³ e o limite superior, de 5.933,66 Sm³; a amplitude elevada entre os dias 02 e 03 confirmou a mudança brusca no consumo. Nos demais dias, a variabilidade permaneceu controlada.

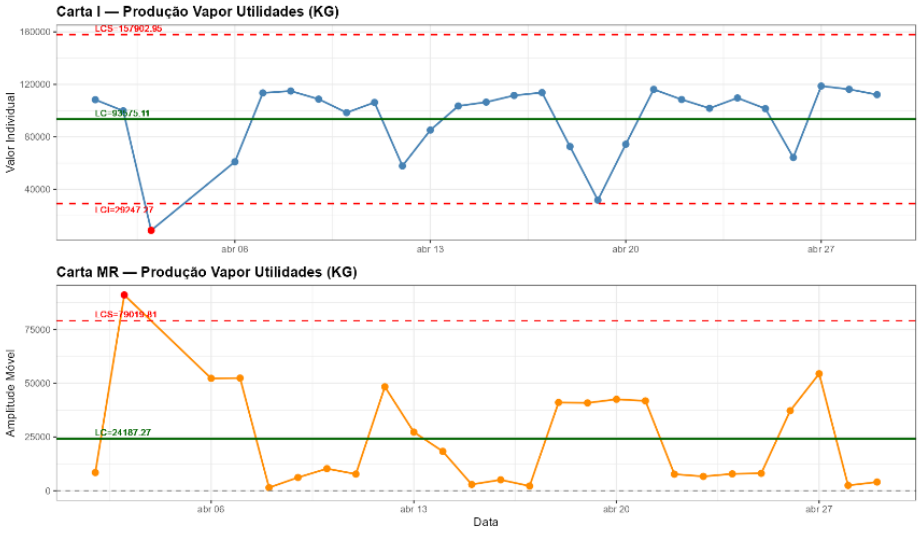
Figura 3 – Cartas de controle I-MR para o consumo de gás das caldeiras (Sm³), abril de 2026



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A produção de vapor apresentou linha central de 93.575,11 kg, limite superior de 157.902,95 kg e limite inferior de 29.247,27 kg na Carta I. A maioria dos pontos permaneceu dentro dos limites, e os valores de plena operação concentraram-se entre 100.000 e 120.000 kg. O dia 03, com 8.818 kg, foi o único ponto abaixo do limite inferior, o que confirma a parada quase total da caldeira. As quedas dos dias 12 e 19 permaneceram dentro dos limites. Na Carta MR, a linha central foi de 24.187,27 kg e o limite superior foi de 79.019,81 kg; todos os pontos permaneceram dentro desse limite.

Figura 4 – Cartas de controle I-MR para a produção de vapor (kg), abril de 2026



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

O indicador operacional de eficiência relativa vapor/gás foi calculado como a razão entre a produção diária de vapor e o consumo diário de gás, multiplicada por 100. A Carta I apresentou linha central de 1.263, limite superior de 1.340 e limite inferior de 1.200, indicando uma faixa relativamente estreita e um comportamento consistente durante a operação normal. Foi identificado um ponto abaixo do limite inferior por volta de 12 de abril, associado a uma queda na produção de vapor em relação ao consumo de gás. Entre as possibilidades operacionais discutidas estão perdas por purgas, alterações na transferência de calor, qualidade da água de alimentação ou redução da demanda de vapor.

Na Carta MR da eficiência, a linha central foi de 24 e o limite superior de 79. Foram observados dois pontos acima do limite superior concentrados na região de 12 de abril, representando a queda brusca e a recuperação no dia seguinte. A ocorrência caracteriza uma mudança rápida e pronunciada na variabilidade do indicador. Assim, embora o rendimento tenha se mostrado consistente na maior parte do período, o episódio reforça a necessidade de monitoramento especialmente em transições e alterações de carga.

Figura 5 – Cartas de controle I-MR para o indicador operacional de eficiência relativa vapor/gás



Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

A correspondência entre os pontos fora de controle e os eventos operacionais conhecidos confirma a validade do artefato desenvolvido. Esse resultado é coerente com aplicações anteriores do CEP, nas quais cartas de controle foram capazes de identificar causas especiais e apoiar ações de melhoria em diferentes setores. A utilização do R reforça a possibilidade de automatizar e reproduzir a análise, aproximando a ferramenta de uma rotina prática de acompanhamento.

Os achados da pesquisa reforçam, portanto, que o CEP não substitui a avaliação técnica do equipamento, mas fornece uma base estatística para orientar a investigação. A associação entre os sinais estatísticos e as informações da operação permite priorizar os eventos que exigem análise, evitando que toda variação seja tratada como falha. Como consequência, a abordagem pode contribuir para uma rotina de monitoramento mais estruturada, apoiando ações de melhoria contínua e decisões relacionadas ao desempenho energético da unidade.

A utilização da linguagem R contribuiu para tornar a análise reproduzível, pois a mesma rotina pode ser aplicada a novos conjuntos de dados sem a necessidade de reconstrução manual das cartas. A automatização também favorece a padronização dos cálculos e da apresentação dos resultados. Nesse sentido, o artefato desenvolvido pode ser utilizado como instrumento de apoio ao acompanhamento periódico da caldeira, permitindo a incorporação de novos dados e a avaliação de ocorrências.

Quanto à eficiência operacional, a análise apresentou um comportamento complementar. Embora o indicador tenha permanecido dentro da faixa de controle na maior parte do período, foi identificada uma ocorrência associada ao dia 12 de abril, quando a produção de vapor apresentou redução proporcionalmente maior do que o consumo de gás. A variação foi acompanhada de alterações na amplitude móvel, indicando uma mudança rápida no comportamento do indicador. Esse resultado demonstra que o acompanhamento da eficiência relativa pode revelar situações que não são necessariamente evidentes quando o consumo de combustível e a produção de vapor são avaliados separadamente.

No consumo de gás, o ponto identificado em 03 de abril apresentou comportamento significativamente inferior ao padrão do processo, o que coincide com uma operação reduzida. A mesma ocorrência foi observada na produção de vapor, reforçando a correspondência entre os dois indicadores. A Carta MR também registrou um aumento da amplitude móvel nessa transição, evidenciando que a mudança entre os dias 02 e 03 foi abrupta. A identificação desse evento demonstra a utilidade do CEP para diferenciar uma alteração pontual de um comportamento persistente do processo.

A análise conjunta das cartas de controle permite observar que o comportamento da caldeira esteve diretamente relacionado às condições de operação da unidade. Os resultados de consumo de gás e produção de vapor apresentaram estabilidade durante a maior parte dos dias de operação efetiva, enquanto as principais alterações ocorreram em períodos de redução de carga, paradas programadas e retomada das atividades. Dessa forma, os sinais identificados pelas cartas não devem ser interpretados isoladamente, mas sim em relação ao contexto operacional em que cada observação foi registrada.

5. Conclusões

A aplicação do CEP mostrou-se eficiente para avaliar o comportamento operacional da caldeira, permitindo analisar o consumo de gás, a produção de vapor e a eficiência operacional por meio de cartas I-MR. O processo apresentou poucas ocorrências fora dos limites estatísticos, e os principais desvios foram relacionados a condições operacionais conhecidas, como paradas programadas e redução de carga.

Os resultados demonstram que o CEP não apenas identifica pontos de variação, mas também contribui para a interpretação das condições associadas a esses eventos, favorecendo uma visão mais estruturada do desempenho energético. O monitoramento contínuo é particularmente relevante em sistemas sujeitos a variações na demanda, nas escalas de operação e nos períodos de parada.

A utilização da linguagem R tornou a análise mais ágil, padronizada e reproduzível, possibilitando a automação do tratamento de dados, dos cálculos e da geração de gráficos. Dessa forma, o artefato desenvolvido atende ao propósito da pesquisa ao demonstrar a aplicabilidade do CEP no monitoramento de caldeiras e seu potencial para apoiar a tomada de decisão. Como limitação, o estudo considera dados de um único mês e de uma única unidade industrial; portanto, estudos futuros podem ampliar o período analisado, incorporar outras variáveis operacionais e avaliar o comportamento do processo sob diferentes condições de carga.

Referências

BECCALLI, Marcelo. Melhoria da eficiência energética de caldeira flamotubular a gás de uso hoteleiro. 2024.

COSTA, Daniel Silva da. Predição da eficiência de geração de vapor em caldeiras de recuperação química. 2024.

DE OLIVEIRA, Thamires Camila Tavares; SILVA, Ana Cristina Gonçalves Castro; SANTOS, PEDRO VIEIRA SOUZA. Aplicação do Controle Estatístico de Processo: estudo aplicado em fabricante de chapas de gesso Drywall. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, v. 8, n. 1, p. 59-66, 2023.

DO CARMO, Brendeson Carvalho et al. Aplicação do controle estatístico e ferramentas da qualidade em uma indústria têxtil do Brasil. **Aracê**, v. 7, n. 1, p. 4325-4336, 2025.

FELIPPE, Gabriel Guitarrari. Desenvolvimento de uma aplicação para armazenamento e gestão dos dados de produção utilizando Dataviz e CEP. 2024.

FERREIRA, Paulo Henrique; BOAVENTURA, Laion Lima; FIACCONE, Rosemeire Leovigildo. Gráficos de controle de aprendizagem dos processos: uma flexibilização de controle estatístico de processos (CEP) com inteligência artificial (IA). 2022.

LACERDA, Daniel Pacheco et al. Design Science Research: método de pesquisa para a engenharia de produção. **Gestão & produção**, v. 20, n. 4, p. 741-761, 2013.

LIRA, Ailton dos Santos. Controle estatístico de processo da indústria alimentícia de Arapiraca-AL: uma abordagem prática para garantir a qualidade. 2023.

MICROSOFT CORPORATION. **Microsoft Excel**: software de planilha eletrônica. Versão 2026. Redmond, WA: Microsoft Corporation, 2026. Disponível em: https://www.microsoft.com/microsoft-365/excel. Acesso em: 02 set. 2026.

MONTGOMERY, Douglas C. Introdução ao Controle Estatístico da Qualidade . Grupo Gen-LTC, 2000.

PERPLEXITY AI. **Perplexity**: ferramenta de inteligência artificial para busca e assistência à pesquisa. [S. l.], 2026. Disponível em: https://www.perplexity.ai/. Acesso em: 4 jun. 2026.

POSIT TEAM. **RStudio**: Integrated Development Environment for R. Posit Software, PBC, Boston, MA, 2026. Disponível em: https://posit.co/. Acesso em: 02 set. 2026.

R CORE TEAM. **R**: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2026. Disponível em: https://www.R-project.org/. Acesso em: 02 set. 2026.

SALES, João Gabriel de Souza Pinto. Análise de seleção de caldeiras da fábrica de papel com emprego do método multicritério TODIM. 2025.

SHEWHART, Walter Andrew; **Statistical method from the viewpoint of quality control**. Courier Corporation, 1986.

SORDAN, Juliano Endrigo; MARINHO, Clésio Aparecido; FERREIRA, José Leonardo; ZANQUETA, Gabriel Roberto. Lean Plant Design: aplicação em um setor de modelação de peças fundidas. In: **ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**, 44., 2024.

WALTER, Olga Maria Formigoni Carvalho; HENNING, Elisa; ZVIRTES, Leandro. Controle Estatístico do Processo em R: análise exploratória do pacote qcc. 2024.