

# AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA EM CALDEIRAS: COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS OPERACIONAIS - CONSERVADOR, BASE E OTIMISTA

BOILER EFFICIENCY EVALUATION: COMPARISON BETWEEN  
OPERATIONAL SCENARIOS — CONSERVATIVE, BASELINE, AND  
OPTIMISTIC

Ciências Exatas e da Terra, Engenharias • 18/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/781748721](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/781748721)

Marcelo Dos Santos Oliveira<sup>1</sup>

## RESUMO

O propósito do presente estudo é apresentar uma avaliação objetiva da eficiência térmica de uma caldeira a GLP instalada em ambiente hoteleiro, utilizando exclusivamente o método direto, conforme diretrizes do ASME PTC-4. A análise baseou-se em dados documentais da caldeira, informações operacionais declaradas e inferências termodinâmicas consistentes com o processo real de geração de vapor. Para representar a variabilidade operacional, foram estruturados três cenários — Conservador, Base e Otimista — considerando variações plausíveis de entalpia, vazão de vapor e consumo específico de combustível. A eficiência térmica foi determinada pelo balanço energético entre a energia útil do vapor produzido e o poder calorífico inferior do GLP (Gás Liquefeito de Petróleo), resultando em valores entre 52,3% e 83,7%, conforme as premissas adotadas. Para fins comparativos, a literatura técnica em eficiência de caldeiras reporta valores típicos entre 85% e 88% para equipamentos de características similares operando em condições ideais. O estudo demonstra que a aplicação do método direto, mesmo com restrições de instrumentação, permite obter diagnóstico consistente do desempenho energético da caldeira, oferecendo subsídios relevantes para ações futuras de otimização, manutenção e racionalização do consumo de GLP.

**Palavras-chave:** eficiência energética; caldeiras; ASME PTC-4; GLP; método direto.

## ABSTRACT

The purpose of the present study is to present an objective assessment of the thermal efficiency of an LPG-fired boiler installed in a hotel environment, using exclusively the direct method, in accordance with the guidelines of ASME PTC-4. The analysis was based on boiler documentation, declared operational information,

and thermodynamic inferences consistent with the real steam generation process. To represent operational variability, three scenarios — Conservative, Base, and Optimistic — were structured, considering plausible variations in enthalpy, steam flow rate, and specific fuel consumption. Thermal efficiency was determined through the energy balance between the useful energy of the produced steam and the lower heating value of LPG, resulting in values between 52.3% and 83.7%, depending on the adopted assumptions. For comparative purposes, technical literature on boiler energy performance typically reports values between 85% and 88% for similar equipment operating under ideal conditions. The study demonstrates that the application of the direct method, even under instrumentation constraints, allows for a consistent diagnosis of the boiler's energy performance, providing relevant insights for future actions in optimization, maintenance, and rational use of LPG.

**Keywords:** energy efficiency; boilers; ASME PTC-4; LPG; direct method.

## 1. INTRODUÇÃO

A eficiência energética em sistemas de geração de vapor constitui um dos principais vetores de desempenho operacional em instalações industriais e de serviços, impactando diretamente o consumo de combustível, os custos operacionais e as emissões associadas. Em particular, caldeiras flamotubulares alimentadas a GLP, amplamente utilizadas em ambientes de médio porte, como hotéis e lavanderias, apresentam potencial significativo de otimização por meio de ajustes operacionais e intervenções de engenharia relativamente simples.

Apesar da relevância do tema, a avaliação da eficiência térmica desses equipamentos, em condições reais de operação, frequentemente enfrenta limitações práticas relacionadas à ausência de instrumentação dedicada, indisponibilidade de medições contínuas e restrições operacionais que inviabilizam a aplicação integral de métodos normativos de ensaio. Nesse contexto, abordagens baseadas em modelagem termodinâmica e uso de dados operacionais disponíveis tornam-se alternativas viáveis para estimativas técnicas consistentes.

O presente trabalho tem como objetivo estimar a eficiência térmica de uma caldeira flamotubular operando a GLP, instalada em ambiente hoteleiro com uso predominante em lavanderia, por meio da aplicação do método direto, fundamentado em balanço energético, utilizando dados nominais de equipamento, informações operacionais fornecidas pelo operador e parâmetros termodinâmicos obtidos da literatura técnica.

A análise é conduzida sob a forma de cenários (conservador, base e otimista), com o intuito de incorporar as incertezas inerentes à ausência de medições diretas, mantendo coerência física e termodinâmica nas estimativas realizadas. Ressalta-se que o estudo não se configura como ensaio instrumental conforme códigos normativos, mas como uma avaliação inferencial estruturada, orientada por princípios consagrados de engenharia térmica.

Como referencial teórico, são utilizados conceitos de combustão, transferência de calor e desempenho de caldeiras, bem como diretrizes presentes em normas e documentos técnicos reconhecidos, como o ASME PTC 4, empregadas aqui como base

conceitual para a estruturação do raciocínio de cálculo, e não como procedimento integralmente executado.

Dessa forma, busca-se não apenas estimar uma faixa plausível de eficiência térmica para o equipamento analisado, mas também demonstrar a aplicabilidade de métodos simplificados, quando devidamente estruturados e criticamente avaliados, como ferramenta de diagnóstico energético em contextos com restrições de medição.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1. Combustão e Excesso de Ar em Caldeiras a GLP**

A combustão do GLP em caldeiras flamotubulares é um processo essencialmente de oxidação completa dos hidrocarbonetos (propano e butano) em dióxido de carbono e vapor d'água, liberando calor que é transferido aos feixes tubulares. O balanço estequiométrico pode ser exemplificado pela equação do propano:



Sabendo que o ar contém aproximadamente 21% de O<sub>2</sub> e 79% de N<sub>2</sub>, a reação demanda cerca de 23,8 volumes de ar por volume de propano em CNTP. Para o butano, a relação é ligeiramente maior, em torno de 30 volumes de ar por volume de combustível. Por imperfeições na mistura e variações de escoamento, admite-se sempre um excesso de ar para garantir a oxidação completa.

Esse excesso de ar é medido pelo percentual de oxigênio residual nos gases de chaminé. O ASME PTC 4-2013 recomenda valores de O<sub>2</sub> entre 2% e 4%, equivalentes a um excesso de ar de 10–20%.

Quando os valores de O<sub>2</sub> residuais ultrapassam 5%, há desperdício térmico: o ar extra não reage, mas é aquecido e expelido, aumentando a perda de calor pelos gases.

Do ponto de vista energético, a perda associada ao excesso de ar pode ser estimada pela equação de perdas nos gases secos:

$$q_{\text{ar}} = [(EA - 1) \cdot m_{\text{gas}} \cdot c_p \cdot (T_g - T_a)] \cdot PCI^{-1}$$

Adimensional ou;

$$q_{\text{ar}} = \{[(EA - 1)\dot{m}_g \cdot c_p \cdot (T_g - T_a) \cdot \dot{m}_{\text{comb}}^{-1}] \cdot PCI^{-1}$$

Vazão mássica.

Onde:

- EA = excesso de ar (adimensional),
- $m_{\text{gas}}$  = massa de gases secos,
- $c_p$  = calor específico dos gases,
- $T_g$  = temperatura dos gases de chaminé,  $T_a$  = temperatura ambiente,
- $PCI$  = poder calorífico inferior do combustível.

Essa equação mostra que a perda é diretamente proporcional ao excesso de ar. Estudos do DOE (2019) demonstram que reduzir o O<sub>2</sub> de 7% para 3% pode aumentar a eficiência em 2–4 pontos percentuais, dependendo da temperatura dos gases.

Além da eficiência, o excesso de ar influencia as emissões atmosféricas. Em excesso insuficiente, há risco de formação de CO, fuligem e hidrocarbonetos incombustos, comprometendo a segurança e a conformidade ambiental. Já em excesso excessivo, embora as emissões de CO caiam, a maior diluição e o resfriamento da chama favorecem a formação de NO<sub>x</sub> térmico.

No Brasil, a Resolução CONAMA 382/2006 estabelece limites de emissão para caldeiras a gás, exigindo controle periódico de O<sub>2</sub> e CO. Em paralelo, a NR-13 reforça a necessidade de inspeções regulares de caldeiras, incluindo condições de combustão.

O monitoramento pode ser feito de duas formas:

- Periódico – analisador portátil de combustão em campanhas de inspeção.
- Contínuo – sonda de O<sub>2</sub> (e em alguns casos CO) na chaminé, com laço de controle automático de ar/combustível.
- Estudos técnicos e diretrizes internacionais reforçam essa prática.

Documentos do U.S. Department of Energy indicam que a redução do excesso de ar, por meio do controle da concentração de oxigênio nos gases de combustão, pode elevar a eficiência térmica de caldeiras em até 3 pontos percentuais, com reduções típicas de consumo de combustível da ordem de 2% a 5%, dependendo do regime operacional e do combustível utilizado (DOE, 2012; DOE, 2019).

O ASME PTC-4 estabelece que concentrações elevadas de O<sub>2</sub> nos gases de exaustão estão diretamente associadas a maiores perdas térmicas pela chaminé, sendo o ajuste fino do excesso de ar uma das principais variáveis operacionais para melhoria do desempenho energético em caldeiras industriais (ASME, 2013).

Adicionalmente, estudos aplicados em sistemas de vapor indicam que a correta regulagem de queimadores, associada ao controle contínuo de parâmetros de combustão, contribui não apenas para a redução do consumo específico de combustível, mas também para a preservação de componentes internos, como refratários e superfícies de troca térmica, ao evitar regimes de combustão instáveis (DOE, 2002; PRADO et al., 2012).

Economicamente, uma caldeira de 1.000 kg/h de vapor consumindo ~70 kg/h de GLP pode ter despesa anual superior a R\$ 1 milhão. Uma melhoria de apenas 3% na eficiência representa economia de R\$ 30 mil/ano, suficiente para justificar a instrumentação avançada.

Portanto, o controle do excesso de ar em caldeiras a GLP é um ponto crítico de ajuste, tanto termodinâmico quanto ambiental e econômico. Em plantas de serviços — hospitais, hotéis, lavanderias e cozinhas industriais — trata-se de uma medida de baixo custo, alto impacto e rápido retorno, consolidada por normas (ASME, CONAMA, NR-13) e corroborada por literatura nacional e internacional.

## **2.2. Recuperação de Calor dos Gases de Chaminé**

Os gases de combustão são a principal fonte de perdas térmicas em caldeiras flamotubulares. Em operação típica, a temperatura dos gases de saída pode variar entre 180 °C e 250 °C, dependendo da carga e do ajuste de combustão. Como o poder calorífico inferior

(PCI) do GLP já considera que o vapor d'água formado não é condensado, todo o calor sensível acima da temperatura de alimentação de ar/água é contabilizado como perda.

O ASME PTC 4-2013 define a perda pelos gases como a soma do calor contido no  $N_2$ ,  $O_2$  e  $CO_2$  residuais, além do vapor d'água formado. Em termos práticos, cada redução de 20–25 °C na temperatura de chaminé implica em ganho de ~1 ponto percentual na eficiência térmica, desde que não se atinja o ponto de orvalho dos gases.

A literatura técnica (DOE, 2019; IEA, 2021) aponta os economizadores como a solução clássica para recuperar esse calor. São trocadores de calor instalados no duto de gases, antes da chaminé, que transferem energia para a água de alimentação da caldeira. Essa medida proporciona:

Aumento da eficiência em 5–10%, dependendo da vazão de água e da diferença térmica; Redução no consumo de combustível proporcional ao ganho de eficiência;

Diminuição do choque térmico no corpo da caldeira, aumentando sua vida útil.

Em sistemas que operam com retorno de condensado a temperaturas relativamente baixas (40–60

°C), pode-se adotar economizadores condensantes, capazes de resfriar os gases abaixo do ponto de orvalho (~55–60 °C para o GLP). Nesse regime, além do calor sensível, recupera-se também o calor latente de condensação do vapor d'água. Ganhos adicionais de até 10% na eficiência podem ser obtidos, mas há riscos de corrosão ácida

( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HNO}_3$ ) e necessidade de materiais resistentes ou neutralização dos condensados.

Estudos técnicos e diretrizes internacionais reforçam o potencial dessa tecnologia. O U.S. Department of Energy indica que a instalação de economizadores em caldeiras convencionais permite a recuperação de calor sensível dos gases de exaustão, resultando em reduções típicas do consumo de combustível entre 5% e 10%, a depender da temperatura dos gases, do regime de operação e do combustível utilizado (DOE, 2019).

Avaliações técnicas também apontam que economizadores condensantes, quando aplicáveis, podem proporcionar ganhos adicionais de eficiência ao recuperar calor latente dos gases de combustão, reduzindo o consumo anual de combustível em valores superiores a 10%, com tempos de retorno do investimento frequentemente inferiores a dois anos em sistemas com elevada carga térmica e operação contínua (DOE, 2019; IEA-ETSAP, 2010).

DOE (2019) reporta reduções médias de 5–15% em consumo de combustível em plantas de serviços que adotaram recuperação de calor de chaminé.

O tempo de retorno do investimento (payback) associado à instalação de economizadores em caldeiras industriais é amplamente reportado na literatura técnica como variando entre 6 e 24 meses, em função da carga térmica, do preço do combustível e do regime de operação do sistema. Diretrizes do U.S. Department of Energy indicam que, em sistemas de vapor com operação contínua e elevadas temperaturas de gases de exaustão, os economizadores figuram entre as medidas de eficiência energética de menor tempo

de retorno, frequentemente com paybacks inferiores a dois anos (DOE, 2019).

Em instalações com perfis de consumo contínuo, como hospitais, hotéis e lavanderias industriais, relatórios técnicos do DOE e análises do IEA-ETSAP apontam que o elevado fator de utilização da caldeira potencializa a recuperação de calor sensível dos gases de combustão, reduzindo o tempo de retorno do investimento e, em muitos casos, conduzindo a paybacks inferiores a 12 meses (DOE, 2019; IEA-ETSAP, 2010).

Do ponto de vista normativo, a ASME Boiler and Pressure Vessel Code – Section I estabelece os requisitos para projeto, fabricação, inspeção e certificação de caldeiras de potência, sendo aplicável às caldeiras industriais empregadas na geração de vapor sob pressão. Diferentemente da Section VIII, voltada a vasos de pressão em geral, a Section I trata especificamente de equipamentos destinados à produção de vapor, incluindo critérios construtivos e de segurança associados à operação contínua.

No contexto nacional, a NR-13 exige que caldeiras e demais equipamentos pressurizados sejam registrados, inspecionados e operados conforme planos formais de inspeção, garantindo a integridade estrutural e a segurança operacional ao longo da vida útil. De forma complementar, a ISO 16528-1 estabelece requisitos gerais de desempenho e segurança para caldeiras e vasos de pressão, podendo ser utilizada como referência adicional para harmonização de critérios técnicos e normativos.

Portanto, a recuperação de calor dos gases de chaminé é uma medida consolidada, com forte embasamento técnico, normativo e

econômico. Seu impacto direto é a redução de consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub>, em linha com os compromissos de descarbonização e eficiência energética estabelecidos por organismos internacionais (IEA, 2021).

### **2.3. Retorno de Condensado e Gestão de Purgas (Blowdown)**

O ciclo de vapor ideal pressupõe que toda a água condensada seja retornada à caldeira, minimizando perdas energéticas e de massa. Na prática, parte do condensado se perde por drenagens, vazamentos ou pela ausência de sistema de retorno, obrigando à reposição com água fria. Esse fator impacta diretamente na eficiência, pois a água de reposição precisa ser aquecida desde a temperatura ambiente até a de operação.

O retorno de condensado é reconhecido como uma das medidas mais eficazes e de menor custo para a redução do consumo de combustível em sistemas de geração de vapor. Diretrizes técnicas do U.S. Department of Energy indicam que o aumento da temperatura da água de alimentação da caldeira, proporcionado pelo retorno de condensado quente, reduz diretamente a demanda energética para geração de vapor, sendo comum a adoção da regra prática segundo a qual incrementos da ordem de 10 °C na temperatura da água de alimentação resultam em reduções aproximadas de 1% no consumo específico de combustível, a depender das condições operacionais do sistema (DOE, 2002; DOE/NREL, 2019).

Em sistemas industriais, o retorno de 80% a 90% do condensado é amplamente adotado como meta operacional, contribuindo não apenas para a economia de energia, mas também para a redução do consumo de água de reposição e de produtos químicos de

tratamento, uma vez que o condensado apresenta elevada pureza e baixa concentração de sólidos dissolvidos (DOE/NREL, 2019; PRADO et al., 2012).

Além disso, a recuperação de condensado reduz a necessidade de purgas frequentes, atenuando perdas térmicas associadas à descarga de água quente e tratada. A gestão adequada das purgas (blowdown) é apontada na literatura técnica como fator crítico para o desempenho energético global de caldeiras, visto que cada evento de purga representa perda simultânea de energia e insumos químicos, devendo ser minimizado por meio do controle da qualidade da água e do retorno de condensado sempre que possível (DOE, 2002; DOE/NREL, 2019).

Boas práticas recomendadas pelo ASME Boiler and Pressure Vessel Code e pela NR-13 incluem:

Uso de purga contínua controlada por condutividade, em vez de purgas manuais periódicas;

Monitoramento regular da qualidade da água (SDT, alcalinidade, dureza);

Adoção de sistemas de recuperação de calor do blowdown, como trocadores de calor ou flash tanks.

Segundo diretrizes técnicas do U.S. Department of Energy, a recuperação de calor associada às purgas de caldeiras (blowdown) pode reduzir o consumo específico de combustível em valores da ordem de 2% a 4%, a depender da taxa de purga, da pressão de operação e da estratégia de recuperação adotada (DOE, 2002; DOE, 2019).

Em sistemas de vapor com operação contínua e elevadas cargas térmicas, como hospitais, lavanderias industriais e instalações hoteleiras, a literatura técnica aponta que a implementação de sistemas de recuperação de calor do blowdown apresenta tempos de retorno tipicamente inferiores a dois anos, em função da redução simultânea de perdas energéticas e do consumo de água e produtos químicos de tratamento (DOE, 2019; IEA-ETSAP, 2010).

Do ponto de vista econômico, a combinação de alto retorno de condensado (>80%) e purga otimizada (<5% da produção de vapor) pode representar economia global de 5–10% em combustível e água, além de ganhos ambientais pela redução do consumo hídrico e de efluentes.

Portanto, o retorno de condensado e a gestão inteligente das purgas são medidas complementares e sinérgicas na busca pela eficiência energética de caldeiras flamotubulares. Juntas, permitem reduzir significativamente as perdas térmicas, o consumo de GLP e os custos operacionais, mantendo a integridade e a confiabilidade do sistema.

#### **2.4. Isolamento Térmico e Perdas Periféricas**

Embora a maior parte das perdas de eficiência em caldeiras esteja associada à combustão e aos gases de chaminé, as perdas periféricas também representam parcela significativa em instalações reais. Essas perdas incluem a dissipação de calor por radiação e convecção a partir das superfícies quentes da caldeira, tubulações de vapor, válvulas, flanges, tanques de condensado e acessórios.

O ASME PTC 4-2013 considera essas perdas relativamente pequenas em caldeiras de grande porte (tipicamente inferiores a 2% da energia do combustível). No entanto, em caldeiras de menor capacidade e em instalações com extensas redes de distribuição de vapor, a ausência de isolamento adequado pode elevar esse valor para 5–10% do consumo de combustível (DOE, 2019).

Estudos nacionais confirmam o impacto dessa medida:

Avaliações técnicas conduzidas pelo U.S. Department of Energy indicam que perdas térmicas em redes de distribuição de vapor estão fortemente associadas à degradação ou ausência de isolamento térmico. A recomposição parcial do isolamento em trechos críticos da rede pode reduzir significativamente essas perdas, refletindo-se em reduções globais do consumo de combustível da caldeira da ordem de 5% a 10%, a depender da extensão recuperada e das condições operacionais do sistema (DOE, 2002; DOE, 2019).

Relatórios técnicos internacionais também destacam que esse tipo de intervenção apresenta elevada relação custo-benefício em instalações industriais com redes extensas de vapor, como a indústria têxtil, sendo considerada uma das medidas de eficiência energética de menor investimento e rápido retorno (IEA-ETSAP, 2010).

Diretrizes técnicas do U.S. Department of Energy indicam que a degradação do isolamento térmico em linhas de vapor e de retorno de condensado pode resultar em perdas significativas de energia, reduzindo a temperatura do condensado que retorna à caldeira e aumentando as perdas térmicas globais do sistema. A substituição

ou recuperação do isolamento é apontada como medida de baixo custo e alto impacto, contribuindo para a elevação da temperatura do condensado de retorno e para a redução indireta da taxa de purga, ao melhorar o balanço térmico e a estabilidade operacional do sistema (DOE, 2002; DOE, 2019).

Avaliações técnicas internacionais também destacam que, em instalações com operação contínua, como hospitais, a recuperação do isolamento térmico pode produzir reduções relevantes nas perdas de calor ao longo do circuito de vapor e condensado, refletindo-se em ganhos globais de eficiência energética e menor desgaste operacional do sistema (IEA-ETSAP, 2010).

Além das linhas de vapor, deve-se considerar o isolamento de válvulas, flanges e conexões, que representam pontos críticos de dissipação. O uso de “capas isolantes removíveis” é prática recomendada pela ABNT NBR 15220 (Eficiência energética em edificações, aplicável como referência a isolamento térmico), permitindo manutenção sem perda da barreira térmica.

Do ponto de vista econômico, a recuperação do isolamento pode apresentar payback inferior a 1 ano, especialmente em sistemas hospitalares e hoteleiros com operação contínua. Além disso, melhora a segurança ocupacional, reduzindo a exposição dos trabalhadores a superfícies de alta temperatura.

Portanto, o isolamento térmico adequado de caldeiras, tubulações e acessórios deve ser entendido não apenas como medida de eficiência energética, mas também de segurança e confiabilidade operacional. Somado às práticas de controle de combustão, recuperação de calor e gestão de condensado, compõe o conjunto

de intervenções de baixo custo relativo e alto impacto, recomendadas por organismos internacionais (DOE, IEA) e corroboradas pela experiência prática no Brasil.

## **2.5. Referenciais Normativos e Padrões Técnicos**

A eficiência energética em caldeiras não pode ser tratada apenas sob a ótica operacional; ela deve estar alinhada a referenciais normativos nacionais e internacionais, que asseguram tanto a confiabilidade metrológica das medições quanto a integridade estrutural e operacional do equipamento.

No âmbito internacional, o principal documento é o ASME PTC 4 – Fired Steam Generators (atualizado em 2013 e revisado em 2023). Este código estabelece metodologias de ensaio para determinação da eficiência de geradores de vapor por meio do método direto (entrada-saída) e do método indireto (perdas). Define parâmetros como instrumentação mínima, critérios de estabilidade operacional, correções de condições ambientais e métodos de cálculo das perdas por gases, radiação e blowdown. O PTC 4 é amplamente utilizado como padrão de referência em auditorias energéticas e estudos comparativos de eficiência.

Complementarmente, a ASME Section VIII fornece requisitos de projeto e construção de vasos de pressão, aplicáveis a economizadores, trocadores de calor e outros acessórios sob pressão. Embora não trate diretamente da eficiência, garante a segurança mecânica dos equipamentos integrados à caldeira.

Outro referencial relevante é a ISO 16528-1 – Boilers and Pressure Vessels – Performance Requirements, que estabelece princípios gerais de projeto, fabricação e inspeção de caldeiras e vasos de

pressão, aplicáveis em escala global. Embora a norma tenha foco estrutural, sua adoção reforça padrões de confiabilidade e intercambialidade de componentes.

No contexto brasileiro, três normativos são particularmente importantes:

NR-13 (Segurança em Caldeiras e Vasos de Pressão) – Estabelece requisitos obrigatórios para instalação, operação, inspeção e manutenção de caldeiras. Exige prontuário, inspeções periódicas e treinamento de operadores, incluindo a verificação das condições de combustão como item de segurança.

Resolução CONAMA 382/2006 – Define limites de emissão de poluentes atmosféricos para fontes fixas, incluindo caldeiras a gás. Impõe o monitoramento de parâmetros como O<sub>2</sub> e CO, vinculando eficiência energética à conformidade ambiental.

Embora direcionadas ao desempenho térmico de edificações, as normas ABNT NBR 13532 e ABNT NBR 15220 são frequentemente utilizadas como referência complementar para a especificação e avaliação de materiais de isolamento térmico aplicados em sistemas auxiliares, incluindo redes de vapor, retorno de condensado e equipamentos associados.

Esses documentos estabelecem critérios mínimos de desempenho térmico, propriedades de materiais e parâmetros de avaliação, que podem ser adotados como base técnica para assegurar níveis adequados de isolamento, redução de perdas térmicas e eficiência energética global em instalações industriais e de serviços, desde que respeitados os limites de aplicação de cada norma.

Adicionalmente, documentos técnicos do U.S. Department of Energy (DOE/AMO) e da International Energy Agency (IEA) consolidam diretrizes de boas práticas operacionais. Ambos recomendam auditorias energéticas periódicas, controle de combustão por analisadores de O<sub>2</sub>, recuperação de calor de chaminé, otimização de blowdown e retorno de condensado como medidas prioritárias de eficiência.

Portanto, a aplicação desses referenciais técnicos garante que a avaliação de eficiência energética de caldeiras flamotubulares não se restrinja a cálculos isolados, mas se insira em um quadro de conformidade normativa, segurança operacional e comparabilidade internacional. Essa amarração normativa fortalece a credibilidade dos resultados e permite que os ganhos de eficiência sejam reconhecidos tanto em relatórios corporativos de sustentabilidade quanto em auditorias de conformidade regulatória.

### **3. METODOLOGIA**

A metodologia adotada tem como objetivo estimar a eficiência térmica de uma caldeira flamotubular a GLP em operação real, sob condição de ausência de instrumentação dedicada para medição direta das variáveis de processo.

A abordagem baseia-se no balanço energético do sistema de geração de vapor, utilizando como referência conceitual o método direto descrito no ASME PTC-4, porém aplicado de forma adaptada, por meio de inferência estruturada das variáveis operacionais.

Diferentemente da aplicação clássica do método direto, que exige medições contínuas de vazão de vapor e consumo de combustível, o presente estudo reconstrói essas variáveis a partir de dados

documentais, informações operacionais e limites físicos do equipamento, garantindo coerência termodinâmica e plausibilidade operacional.

### 3.1. Modelo de Cálculo da Eficiência Térmica

A eficiência térmica da caldeira foi estimada a partir da relação entre a energia útil transferida ao vapor gerado e a energia química fornecida pelo combustível, conforme a expressão:

onde:

$$\eta = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_g - h_f)}{\dot{m}_{GLP} \cdot PCI}$$

- $\dot{m}_v$ : vazão mássica de vapor (kg/h)
- $h_g$ : entalpia do vapor saturado (kcal/kg)
- $h_f$ : entalpia da água de alimentação (kcal/kg)
- $\dot{m}_{GLP}$ : vazão mássica de combustível (kg/h)
- $PCI$ : poder calorífico inferior do GLP (kcal/kg)

Essa equação representa o modelo físico central do estudo, sendo todas as variáveis tratadas como grandezas estimadas a partir de fontes indiretas.

### 3.2. Regime de Operação e Fator de Utilização (Duty Cycle)

Como não há medição contínua de vazão de vapor ou consumo instantâneo de combustível, o regime de operação da caldeira foi

representado por um fator de utilização, ou duty cycle, definido como a fração do tempo em que o equipamento opera efetivamente sob carga térmica em relação ao período total considerado.

Esse fator é incorporado implicitamente nas estimativas de vazão de vapor e consumo de GLP, a partir de:

- horas diárias de operação
- frequência semanal
- padrão de utilização da lavanderia
- capacidade nominal do equipamento

Dessa forma, evita-se superestimação da produção de vapor e do consumo energético, mantendo coerência com o regime real de operação.

### **3.3. Estratégia de Inferência e Fontes de Dados**

Diante da ausência de medições diretas, as variáveis do modelo foram estimadas por meio de uma hierarquia de fontes, organizada conforme o nível de confiabilidade:

#### **(a) Dados documentais**

- placa do equipamento
- capacidade nominal de vapor

consumo nominal do queimador

- especificações do fabricante

### **(b) Dados operacionais**

- horas de operação
- regime de utilização
- temperatura da água de alimentação
- retorno de condensado

### **(c) Literatura técnica e normas**

- tabelas de vapor saturado
- PCI do GLP
- faixas típicas de eficiência
- parâmetros termodinâmicos

Essa estrutura garante que cada variável seja limitada por valores fisicamente plausíveis e compatíveis com o comportamento esperado do sistema.

## **3.4. Definição das Variáveis e Hipóteses Adotadas**

Todas as variáveis utilizadas no modelo são estimadas, conforme descrito a seguir:

### **Vazão de vapor ( $m_v$ )**

Estimada a partir da capacidade nominal da caldeira e do regime de operação, ajustada pelo duty cycle e pela demanda térmica do processo (lavanderia).

### **Entalpias ( $h_g$ e $h_f$ )**

Obtidas a partir de tabelas de vapor saturado, considerando pressão de operação típica e temperatura estimada da água de alimentação.

### **Consumo de GLP ( $\dot{m}_{GLP}$ )**

Estimado com base em:

- consumo nominal do queimador
- fator de utilização
- dados operacionais informados

### **PCI do GLP**

Adotado como 11.000 kcal/kg, valor típico de referência.

## **3.5. Construção dos Cenários Operacionais**

Para tratar a incerteza associada às variáveis inferidas, foram definidos três cenários:

- **Conservador:** condições menos favoráveis (baixa carga, maior consumo relativo)
- **Base:** condição mais representativa da operação real

- **Otimista:** operação próxima ao desempenho ideal

Os cenários não possuem caráter estatístico, sendo utilizados como ferramenta de análise de sensibilidade, permitindo delimitar a faixa de variação plausível da eficiência térmica.

### **3.6. Procedimento de Cálculo**

Para cada cenário, o cálculo da eficiência seguiu as etapas:

1. Definição da pressão de operação
2. Determinação de  $h_{ge}$  e  $h_f$
3. Estimativa da vazão de vapor
4. Estimativa do consumo de GLP
5. Aplicação da equação de eficiência
6. Verificação de coerência física dos resultados

### **3.7. Tratamento das Incertezas**

As incertezas decorrem da natureza inferencial das variáveis. Para sua avaliação, foram adotados:

- intervalos de plausibilidade técnica
- análise por cenários
- verificação de limites físicos

A abordagem segue os princípios do GUM, sem caracterizar um tratamento metrológico completo, uma vez que não há medições diretas.

### **3.8. Critérios de Consistência e Validação**

Os resultados foram validados com base em:

- compatibilidade com faixas típicas de eficiência (flamotubulares a GLP)
- coerência com dados de fabricante
- compatibilidade com consumo energético observado
- respeito aos limites termodinâmicos

### **3.9. Limitações do Estudo**

Devido à ausência de instrumentação, não foram avaliados:

- perdas por gases de combustão
- excesso de ar
- eficiência de combustão
- vazão real de vapor
- medições diretas de consumo

Dessa forma, os resultados representam estimativas técnicas do desempenho energético, adequadas para diagnóstico e tomada de

decisão, mas não para certificação metrológica

#### **4. ANÁLISE DOS RESULTADOS**

*Baseada nos cenários inferidos com dados reais da caldeira VS.VG-330, queimador Riello GAS 4 e informações operacionais coletadas junto ao responsável operacional.*

A análise dos resultados foi conduzida exclusivamente com base no método direto (entrada-saída), seguindo o ASME PTC-4, considerando as condições reais de operação do sistema de vapor do hotel. Diante da impossibilidade de instrumentação no período definido pelo orientador, foram utilizados três cenários inferidos (Conservador, Base e Otimista) construídos a partir de:

- Dados fornecidos pelo operador (horas de operação, pressão, retorno de condensado, temperatura da água)
- Informações de placa do fabricante (capacidade de vapor, consumo nominal, potência térmica)
- Tabela de vapor para a pressão de trabalho real (8–10 kgf/cm<sup>2</sup>)
- PCI típico do GLP (11.000 kcal/kg)
- Faixas de operação usuais para caldeiras flamotubulares a GLP
- Temperaturas realistas de água de alimentação (70–90 °C)

Essa abordagem garante coerência termodinâmica, aderência normativa e transparência metodológica, preservando a confiabilidade da avaliação mesmo sem medição direta.

## 4.1. Parâmetros Operacionais dos Cenários

A Tabela 1 apresenta os valores consolidados utilizados para avaliar o desempenho da caldeira VS.VG-330.

**Tabela 1** – Parâmetros adotados para os três cenários (Conservador, Base e Otimista)

Parâmetro	Conservador	Base	Otimista	Fonte
Vazão de vapor (kg/h)	350	430	514	Placa e regime real de operação
Temp. da água de alimentação (°C)	70	80	90	Operador / retorno de condensado
Entalpia do vapor (kcal/kg)	662	662	662	Tabela de vapor (8–10 kgf/cm <sup>2</sup> )
Entalpia da água (kcal/kg)	70	80	90	Tabela / temperatura declarada
Consumo de GLP (kg/h)	36	34,5	32	Placa e variação típica
PCI do GLP (kcal/kg)	11.000	11.000	11.000	Valor de projeto
Horas/dia	8	8	8	Operador
Dias/semana	5	5	5	Operador

## 4.2. Energia Útil do Vapor

$$Q_{vapor} = \dot{m}_v (h_g - h_f)$$

**Tabela 2** – Energia útil produzida nos três cenários

Cenário	Q_v (kcal/h)
Conservador	207.200
Base	250.260
Otimista	294.408

**Interpretação Técnica:**

A energia útil cresce proporcionalmente à carga de vapor e à temperatura da água de alimentação. O cenário Base representa a condição mais provável de operação contínua da lavanderia do hotel.

**4.3. Energia Química do Combustível**

$$Q_{comb} = \dot{m}_{GLP} \cdot PCI$$

**Tabela 3** – Energia química disponível (GLP)

Cenário	Q_comb (kcal/h)
Conservador	396.000
Base	379.500
Otimista	352.000

**Interpretação Técnica:**

O consumo de GLP varia conforme o ajuste do queimador e o fator de utilização. A condição Otimista considera combustão mais afinada (menor excesso de ar), reduzindo o consumo.

#### 4.4. Eficiência Térmica da Caldeira (Método Direto)

$$\eta_d = 100 \times \frac{Q_{vapor}}{Q_{combustível}}$$

**Tabela 4** – Eficiência térmica calculada

Cenário	Eficiência (%)	Interpretação
<b>Conservador</b>	<b>52,3%</b>	Desempenho insatisfatório; indica combustão ruim, chaminé quente, excesso de ar elevado ou isolamento deficiente
<b>Base</b>	<b>65,9%</b>	Faixa realista para flamatubular a GLP sem economizador e com retorno de condensado
<b>Otimista</b>	<b>83,7%</b>	Eficiência elevada, compatível com operação próxima de nominal e água de alimentação quente

**Nota:** Apesar de o fabricante declarar eficiência na faixa de 85%, o percentual tratado como otimista reflete condições reais de operação em carga, o que pode diferir de testes de fábrica, por vezes realizados em circuito reduzido, não espelhando a condição real de instalação e operação.

#### 4.5. Discussão dos Resultados

a) Eficiência Base — 65,9%

É a condição que melhor representa o regime do hotel:

- 8 h/dia de operação → regime estável
- Pressão de 8–10 kgf/cm<sup>2</sup> → vapor saturado com boa disponibilidade térmica
- Água de alimentação quente (80 °C) → retorno total do condensado
- Consumo nominal (34,5 kg/h) → condizente com a placa

Este resultado é coerente com literatura e fabricantes para caldeiras flamotubulares a GLP sem economizador, que operam tipicamente entre 65% e 78%.

b) eficiência conservadora — 52,3%

Representa operação degradada, normalmente associada a:

- excesso de ar alto
- ajuste inadequado do queimador
- hot spots na chaminé
- isolamento ineficiente
- água de alimentação relativamente fria
- baixa carga relativa (ciclagem excessiva)

É um alerta, mas realista para equipamentos sem manutenção ajustada.

c) eficiência otimista — 83,7%

Tecnicamente possível sob condições:

- água de alimentação extremamente quente
- operação próxima da capacidade ( $\pm 90\%$  da nominal)
- combustão afinada com analisador ( $O_2 \sim 4-6\%$ )
- perda por radiação baixa
- chaminé com  $\Delta T$  adequado

Este cenário serve como benchmark, não como valor típico de operação do hotel.

#### **4.6. Consistência Termodinâmica**

Nenhum dos valores ultrapassa limites físicos conhecidos:

- Vapor saturado a 8–10 bar  $\rightarrow h_g \approx 662$  kcal/kg
- GLP com PCI = 11.000 kcal/kg
- Capacidade nominal = 514 kg/h (placa)
- Eficiência máxima teórica sem economizador  $\approx 86-88\%$  Assim, os cenários respeitam:
- Física do processo
- Parâmetros do fabricante

- ASME PTC-4 (método direto)
- Normas nacionais (NR-13)
- Comportamento real de caldeiras industriais

#### **4.7. Conclusão Parcial da Análise**

A caldeira VS.VG-330 apresenta desempenho condizente com seu porte e tecnologia quando operada nas condições reais do hotel.

O valor mais representativo e tecnicamente defensável para o presente artigo é:

**Eficiência térmica real estimada (método direto): 65–70%**

### **5. CONCLUSÕES**

O presente estudo avaliou o desempenho energético da caldeira flamotubular VS.VG-330, alimentada por gás GLP, em operação no setor de lavanderia de um hotel. Em alinhamento à orientação metodológica e às limitações instrumentais existentes no período da pesquisa, a análise foi conduzida exclusivamente por meio do método direto do ASME PTC-4, utilizando uma abordagem de cenários inferidos baseada em dados reais de operação, informações do operador, placa do fabricante, tabelas de vapor e parâmetros termodinâmicos consolidados na literatura.

A aplicação do método direto permitiu estimar a eficiência térmica em condições representativas de operação, mesmo sem medições contínuas de combustão ou perdas individuais. Os cenários estabelecidos — Conservador, Base e Otimista — forneceram uma

faixa tecnicamente consistente de desempenho, dentro dos limites físicos esperados para caldeiras flamotubulares a GLP.

O cenário Base, considerado o mais representativo da realidade operacional do hotel, resultou em uma eficiência térmica de 65,9%, valor plenamente coerente com equipamentos do mesmo porte e tecnologia, operando sem economizador e sob regime de carga típico de lavanderias industriais. Os cenários Conservador (52,3%) e Otimista (83,7%) reforçaram o intervalo operacional possível e contribuíram para a análise de sensibilidade, evidenciando como fatores como temperatura d'água de alimentação, ajuste do queimador e carga térmica influenciam diretamente o desempenho global.

Os resultados confirmam que a caldeira opera dentro da faixa esperada para seu arranjo construtivo, mas também revelam potencial de ganho energético relevante caso modificações simples sejam implementadas, como otimização da combustão, melhoria do isolamento térmico, ajustes operacionais e eventual instalação de economizador. Essas ações, quando aplicadas a equipamentos deste porte, podem elevar a eficiência para valores superiores a 75–80%, com impacto direto na redução do consumo de GLP e do custo operacional.

Em síntese, o estudo demonstrou que o uso do método direto, associado à construção de cenários fundamentados, é uma estratégia viável para avaliar a eficiência de geradores de vapor quando medições completas não estão disponíveis. A metodologia adotada produziu resultados consistentes, tecnicamente defensáveis e úteis para orientar decisões futuras de manutenção, operação e investimentos em eficiência energética.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a incorporação de uma análise econômica estruturada, incluindo **EVTE (Estudo de Viabilidade Técnico-Econômica)** e **análises de sensibilidade** aplicadas às variáveis críticas do processo, como custo do GLP, rendimento da caldeira, potencial de recuperação de calor e vida útil dos equipamentos. A utilização dessas ferramentas permitirá avaliar **payback, VPL e TIR** dos cenários propostos, além de quantificar o impacto econômico de intervenções como economizadores, automação e melhorias operacionais. Essa etapa ampliaria significativamente a capacidade de tomada de decisão, permitindo **dimensionar o CAPEX necessário** e estudar a **modularidade do sistema térmico**, resultando em um modelo mais robusto e alinhado às práticas de engenharia energética avançada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 13532: Elaboração de projetos de edificações – Arquitetura**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220: Desempenho térmico de edificações**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. PTC 4 – Fired Steam **Generators**. New York: ASME, 2013 (R2023).

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). Boiler and Pressure **Vessel Code: Section I – Rules for Construction of Power Boilers**. New York: ASME, 2021. Disponível em: <https://www.asme.org/codes-standards/bpvc-standards>. Acesso em: 22 dez. 2025.

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **Fired steam generators (PTC 4)**. New York: ASME, 2013. Disponível em: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/fired-steam-generators>. Acesso em: 22 dez. 2025.

ALVES, Rogério Caetano. **Avaliação da eficiência energética em sistemas de geração de vapor com aplicação de economizador**. São Paulo: PGS Scogna, [s.d.]. Disponível em: [https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/37490/1/ROG%C3%89RIO\\_%2BCA ETANO\\_%2BALVES.pdf](https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/37490/1/ROG%C3%89RIO_%2BCA%20ETANO_%2BALVES.pdf). Acesso em: 22 dez. 2025.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **Norma Regulamentadora NR-13 – Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulações**. Portaria SEPRT/ME nº 1.084, de 22 de dezembro de 2020. Disponível em: . [Norma Regulamentadora No. 13 \(NR-13\) — Ministério do Trabalho e Emprego](#). Acesso em: 30 ago. 2025.

BRASIL. **Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 382**, de 26 de dezembro de 2006. Dispõe sobre limites máximos de emissão de poluentes atmosféricos por fontes fixas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2 jan. 2007.

DOE – U.S. Department of Energy. **Improving Steam System Performance: A Sourcebook for Industry**. 2. ed. Washington: DOE, 2019.

DOE – U.S. DEPARTMENT OF ENERGY; NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **Return Condensate to the Boiler**. Energy Tipsheet. Washington, DC: DOE, 2019. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy12osti/52769.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2025.

ENHANCING energy efficiency through condensate recovery. **Scientific Research Publishing (SCIRP)**, [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=145961>. Acesso em: 22 dez. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – ENERGY TECHNOLOGY SYSTEMS ANALYSIS PROGRAMME (IEA-ETSAP). **Industrial combustion boilers**. Paris: IEA-ETSAP, 2010. Disponível em: [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/I01-ind\\_boilers-GS-AD-gct.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/I01-ind_boilers-GS-AD-gct.pdf). Acesso em: 22 dez. 2025.

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE PERNAMBUCO (IFPE). **Projeto térmico-mecânico de uma caldeira flamotubular aplicada à indústria têxtil do interior de Pernambuco**. Recife: IFPE, [s.d.]. Disponível em: <https://repositorio.ifpe.edu.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/1590/Projeto%20t%C3%A9rmicomec%C3%A2nico%20de%20uma%20caldeira%20flamotubular%20aplicada%20%C3%A0%20ind%C3%BAria%20t%C3%AAtil%20do%20interior%20de%20Pernambuco.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2025

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Energy Efficiency 2021: Analysis and Outlook to 2025**. Paris: IEA, 2021.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 16528-1 – Boilers and Pressure Vessels – Part 1: Performance Requirements**. Geneva: ISO, 2007.

JCGM. **Evaluation of measurement data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM:1995)**. Joint Committee for Guides in Metrology. Geneva: ISO/IEC, 2008.

PRADO, Eduardo Rasi Almeida; LEMOS, Flavio Luis; TROMBETA, Alessandro; ALMEIDA, Bruno Raphael Ferraz de. **Aproveitamento de condensado e utilização de vapor flash no expander.** *Engevista*, Niterói, v. 14, n. 3, 2012. DOI: 10.22409/engevista.v14i3.368. ISSN 2317-6717.

RETORNO de condensado – projeto de sistemas de vapor. **Scribd**, [s.l.], [s.d.]. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/43932084/retorno-condensado>. Acesso em: 22 dez. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA (UFV). **Estudo de eficiência térmica de caldeira flamotubular.** Viçosa, MG: UFV, [s.d.]. Disponível em: <https://locus.ufv.br/bitstreams/49ef28ce-696f-4948-b7be-b1859ab44e8c/download>. Acesso em: 22 dez. 2025.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO (UFRJ). Escola Politécnica. **Análise térmica e energética de caldeira flamotubular aplicada à geração de vapor.** Rio de Janeiro: UFRJ, [s.d.]. Disponível em: <https://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/projpoli10040821.pdf>. Acesso em: 22 dez. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **Steam system survey guide.** Washington, DC: DOE, 2002. Disponível em: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/steam\\_survey\\_guide.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/04/f15/steam_survey_guide.pdf). Acesso em: 22 dez. 2025.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY (DOE). **Improve your boiler's combustion efficiency.** Energy Tips. Washington, DC: DOE, 2012. Disponível em: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1053481>. Acesso em: 22 dez. 2025.

---

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico, Engenheiro Eletricista, Especialista em energia, utilidades industriais e eficiência energética.