

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA

ISADORA ZANQUETA COUTO

**CALDEIRAS INDUSTRIAIS: UMA DESCRIÇÃO SOBRE COMPONENTES E
DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA**

UBERLÂNDIA

2026

ISADORA ZANQUETA COUTO

**CALDEIRAS INDUSTRIAIS: UMA DESCRIÇÃO SOBRE COMPONENTES E
DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA**

**Trabalho de Conclusão de Curso da
Universidade Federal de Uberlândia como
requisito parcial para obtenção do título
de bacharel em Engenharia Química**

**Orientador: Prof. Dr. Danylo de Oliveira
Silva.**

UBERLÂNDIA

2026



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso				
Data:	03/08/2026	Hora de início:	10h00	Hora de encerramento:	11h00
Matrícula do Discente:	11821EQU046				
Nome do Discente:	Isadora Zanqueta Couto				
Título do Trabalho:	Caldeiras industriais: uma descrição sobre componentes e dispositivos de segurança				

A defesa do Trabalho de Conclusão de Curso remotamente, utilizando a plataforma ConferênciaWeb, e a Banca Examinadora foi composta por: **Prof.^a Dr.^a Sarah Arvelos Altino - FEQUI/UFU**, **Eng. M.e. Diogo Pimentel de Sá da Silva - PPGEQ/UFU** e **Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva - FEQUI/UFU**, orientador da discente.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, **Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva - FEQUI/UFU**, apresentou a Comissão Examinadora e a discente, e concedeu a esta a palavra para a exposição de seu trabalho. A duração da apresentação e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, em ordem e sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir a discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, em sessão secreta a Banca atribuiu o resultado, considerando a discente:

Aprovada. Nota: 75 (setenta e cinco).

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que, após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Sarah Arvelos Altino, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/08/2026, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Danylo de Oliveira Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/08/2026, às 11:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Diogo Pimentel de Sá da Silva, Usuário Externo**, em 03/08/2026, às 11:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7551524** e o código CRC **110CE815**.

Às horas em que o futuro parecia distante,
mas que, sem que eu percebesse, moldavam
quem eu estava me tornando.

AGRADECIMENTOS

Início esta seção agradecendo a Deus; sem Ele, nada disso teria sido possível durante esse período.

Agradeço aos meus pais, Adelmo e Angela, por me apoiarem em todas as decisões que tomei e por terem sido meus primeiros exemplos profissionais e de caráter.

Ao meu irmão Gustavo, agradeço por me ensinar a ser mais resiliente e por estar sempre ao meu lado, como um amigo.

À minha avó Sirlem, por todas as orações dedicadas a mim.

Agradeço aos amigos que fiz e ao meu namorado por todos os conselhos, pela parceria e por tornarem essa etapa da minha vida ainda mais especial.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Danylo de Oliveira Silva, pela disponibilidade, pela condução e pela dedicação na supervisão deste trabalho.

RESUMO

As caldeiras a vapor desempenham em diversos segmentos industriais, por fornecerem energia térmica para processos produtivos, aquecimento, cogeração de energia e acionamento de equipamentos. Em função das elevadas pressões e temperaturas envolvidas, sua operação requer o monitoramento contínuo das principais variáveis operacionais e a utilização de dispositivos de segurança capazes de prevenir falhas e acidentes. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo apresentar, por meio de revisão bibliográfica, os principais componentes de uma caldeira e os dispositivos de segurança aplicados a caldeiras industriais, destacando suas funções, importância operacional e contribuição para a diminuição de falhas e acidentes. Para isso, realizou-se uma revisão da literatura baseada em artigos científicos, livros técnicos, normas regulamentadoras, códigos internacionais e documentos institucionais, complementada por observações em campo realizadas em uma indústria do agronegócio. Inicialmente foram abordados os principais componentes constituintes das caldeiras, bem como as variáveis operacionais críticas, especialmente pressão e nível de água. Em seguida, foram discutidos dispositivos destinados ao monitoramento, controle e proteção desses equipamentos. A análise demonstrou que esses dispositivos atuam de forma complementar, formando sucessivas camadas de proteção capazes de detectar desvios operacionais, acionar alarmes, promover o desligamento automático da caldeira e aliviar condições de sobrepressão, contribuindo para a integridade dos equipamentos e para a segurança operacional. Conclui-se que o adequado dimensionamento, instalação, operação e manutenção desses dispositivos, aliados ao atendimento às exigências da NR-13 e do código ASME, são fundamentais para reduzir a probabilidade de falhas, aumentar a confiabilidade operacional e prevenir acidentes em sistemas de geração de vapor.

Palavras-chave: geração de vapor; pressão; nível; segurança de processos; NR-13; segurança operacional.

ABSTRACT

Steam boilers play a fundamental role in several industrial sectors by providing thermal energy for process heating, cogeneration, and equipment operation. Due to the high operating pressures and temperatures involved, their safe operation requires continuous monitoring of critical process variables and the use of safety devices capable of preventing failures and accidents. In this context, this study aims to provide a comprehensive understanding of the role of steam boilers in industrial applications through a literature review of their main components and safety devices, highlighting their functions, operational importance, and contribution to failure and accident prevention. To achieve this objective, a literature review was conducted based on scientific articles, technical books, regulatory standards, international codes, and institutional publications, complemented by field observations carried out at an agribusiness industrial facility. Initially, the main boiler components and the most critical operating variables, particularly steam pressure and drum water level, were discussed. Subsequently, the study addressed the devices responsible for monitoring, controlling, and protecting boiler systems. The analysis demonstrated that these devices operate in a complementary manner, forming successive layers of protection capable of detecting abnormal operating conditions, activating alarms, initiating automatic boiler shutdown (trip), and relieving overpressure conditions, thereby contributing to equipment integrity and operational safety. It is concluded that the proper design, installation, operation, and maintenance of these safety devices, combined with compliance with the requirements of NR-13 and the ASME Boiler and Pressure Vessel Code, are essential to reduce the likelihood of failures, improve operational reliability, and prevent accidents in steam generation systems.

Keywords: steam generation; pressure; level; safety devices; process safety; NR-13; operational safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema simplificado de componentes de caldeira aquatubular	14
Figura 2 – Limite de segurança da caldeira de acordo com a PMTA	17
Figura 3 – Garrafa de nível.....	19
Figura 4 – Desenho esquemático de eletrodo de nível	20
Figura 5 – Visor de nível	21
Figura 6 – Instalação do transmissor de pressão	23
Figura 7 – Instalação de manômetro.....	24
Figura 8 – Representação dos componentes de válvula de segurança	25
Figura 9 – Válvula PSV instalada em campo	26
Figura 10 – Válvula de partida instalada em campo	27

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Objetivos.....	11
2	METODOLOGIA.....	12
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
3.1	Definição de caldeiras e utilização	13
3.2	Principais constituintes dos sistemas de geração de vapor.....	14
3.3	Variáveis operacionais de caldeiras.....	15
3.3.1	Variáveis do processo	15
3.3.2	Pressão do vapor e Pressão Máxima de Trabalho Admissível	15
3.3.3	Nível de água no tubulão de vapor	16
3.4	Dispositivos de segurança aplicados às caldeiras.....	17
3.4.1	Dispositivos de Monitoramento e Controle de Nível de Água.....	18
3.4.2	Outros dispositivos de monitoramento e controle de nível de água	21
3.4.3	Dispositivos de Monitoramento, Controle e Alívio de Pressão	22
4	CONCLUSÃO	28
	REFERÊNCIAS.....	29

1 INTRODUÇÃO

O vapor foi a base que sustentou a Revolução Industrial. Na década de 1770, James Watt desenvolveu o motor a vapor a partir de melhorias em sistemas motrizes que já existiam há quase cem anos. A utilização do vapor facilitou o fornecimento de força motriz para os diversos processos industriais, permitindo que a indústria se expandisse em um ritmo tão acelerado que mudou de forma radical o estilo de vida da humanidade. Já no início do século XIX, o vapor permitiu a motorização de navios e o surgimento das ferrovias com locomotivas a vapor (FILLIPO FILHO, 2014)

O motor a vapor revolucionou a indústria e os sistemas de transportes, embora não seja mais empregado na atualidade. Em seu lugar, são utilizados os motores de combustão interna, onde há a obtenção de trabalho mecânico a partir do vapor, é feito o uso de turbinas. Uma das principais aplicações das turbinas a vapor é o acionamento de geradores elétricos em centrais termelétricas. Outras aplicações podem ser encontradas no acionamento de grandes bombas, ventiladores e compressores (FILLIPO FILHO, 2014).

São consideradas máquinas térmicas os dispositivos que convertem energia térmica em energia mecânica, como máquinas e turbinas a vapor. As máquinas térmicas operam segundo processo termodinâmico cíclico, transformando calor em trabalho (CAVAGNOLI *et al.*, 2025).

As caldeiras a vapor são equipamentos que desempenham papel fundamental nas linhas de produção e utilizam como máxima os processos de transferência de calor. Apesar dos avanços tecnológicos observados desde a Revolução Industrial, o vapor permanece como uma das principais utilidades empregadas nos processos produtivos modernos, sendo amplamente utilizado para geração de energia, aquecimento e acionamento de equipamentos como bombas (ICATERM, 2024).

As caldeiras são projetadas para gerar vapor a partir do aquecimento da água, através da combustão de combustíveis (carvão, gás natural, biomassas alternativas). Essa queima gera uma grande quantidade de calor, que, através de trocadores de calor, é transferida para o fluido térmico, usualmente água que absorve calor aumentando sua temperatura. De modo geral, água se encontra em um sistema fechado e é aquecida até seu ponto de ebulição. O confinamento do vapor gera aumento na pressão interna e eleva ainda mais o ponto de ebulição da água, originando o vapor que será distribuído para todo o processo produtivo. Devido a esse processo, esse equipamento requer controle das variáveis para que a operação seja segura, haja vista que as falhas operacionais podem causar graves acidentes (ROCHA,

2026).

O vapor gerado pode ser utilizado nos processos por meio de cogeração de energia, em trocadores de calor e acionamento de equipamentos em pontos de consumo da empresa (BAZZO, 1995). As caldeiras são equipamentos fundamentais em setores da indústria química, alimentícia, sucoenergética e petroquímica, e representam na atualidade um papel importante em metas de sustentabilidade, eficiência energética e térmica. Para compreender o funcionamento de caldeiras, é fundamental entender seus principais componentes, fenômenos físicos envolvidos e principais variáveis de processo. Além da eficiência térmica, a segurança operacional é essencial para a garantia de redução de acidentes.

Nesse sentido, a operação segura das caldeiras depende do monitoramento das variáveis críticas, como pressão, temperatura e nível de água, e da utilização de dispositivos capazes de prevenir condições operacionais inadequadas. Dispositivos como válvulas de segurança, indicadores de nível, e sopradores de fuligem desempenham papel fundamental na mitigação de riscos (BAZZO, 1995). Dessa forma, o estudo dos dispositivos de segurança torna-se essencial para a compreensão das práticas de operação segura aplicadas aos sistemas de geração de vapor.

1.1 Objetivos

Este trabalho objetiva apresentar, por meio de revisão bibliográfica, os principais componentes de uma caldeira e dispositivos de segurança aplicados a caldeiras industriais, destacando suas funções, importância operacional e contribuição para a redução de falhas e acidentes. Como objetivos específicos listam-se: revisar detalhadamente a literatura de normas regulamentadoras e livros de referência sobre segurança de processo e geração de vapor no ambiente industrial. Além disso, para identificação dos principais dispositivos de segurança de caldeiras, com enfoque em controle de pressão e controle de nível de água, foi feita observação em campo em uma indústria do agronegócio no Triângulo Mineiro no ano de 2026.

2 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi realizada uma revisão bibliográfica por meio da consulta a bases de dados científicas e literatura técnica, com o objetivo de reunir informações acerca dos dispositivos de segurança aplicados a caldeiras e dos principais aspectos relacionados à sua operação segura. Foram utilizadas bases de dados como ScienceDirect, Google Scholar, além de normas técnicas, livros de referência e documentos oficiais, incluindo a Norma Regulamentadora NR-13 e o *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), que estabelecem os requisitos de segurança para caldeiras e vasos de pressão. Além disso, destaca-se que também foram feitas pesquisas de campo em uma indústria do agronegócio situada na região de Uberlândia-MG no ano de 2026, com o objetivo de entender como esses dispositivos são utilizados no ambiente fabril.

Foram selecionados artigos científicos, livros, normas técnicas e documentos institucionais que abordassem a geração de vapor, os principais componentes constituintes das caldeiras, bem como as variáveis operacionais críticas, especialmente pressão e nível de água. Em seguida, foram discutidos os dispositivos de segurança empregados em caldeiras e a prevenção de acidentes, para garantir que as referências estivessem alinhadas aos objetivos propostos.

Como estratégia de busca, foram empregados descritores em português e inglês, dentre os quais: caldeiras, geração de vapor, dispositivos de segurança, instrumentação, NR-13, *boiler safety*, *steam boiler*, *boiler instrumentation*, *water level indicator*, *safety valve*, *pressure control* e *boiler accidents*. A combinação desses termos possibilitou a obtenção de literatura atual e clássica, fornecendo embasamento teórico para a discussão dos principais dispositivos de segurança utilizados em unidades geradoras de vapor.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição de caldeiras e utilização

Segundo a Norma Regulamentadora 13 (BRASIL, 2025), documento responsável por tratar da gestão da integridade estrutural de caldeiras e vasos de pressão, caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refreradores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo, conforme disposto no Glossário da referida norma. Conforme ainda previsto pela NR-13, as caldeiras podem ser classificadas em duas principais categorias. As caldeiras da Categoria A são aquelas que operam com pressão igual ou superior a 1.960 kPa e possuem volume interno superior a 100 L. Já as caldeiras da Categoria B compreendem equipamentos com pressão de operação superior a 60 kPa e inferior a 1.960 kPa.

A partir desses critérios, equipamentos como fornos, serpentinas para troca térmica e demais que não se enquadram nas categorias acima não são considerados caldeiras, uma vez que não realizam o armazenamento ou acúmulo de vapor.

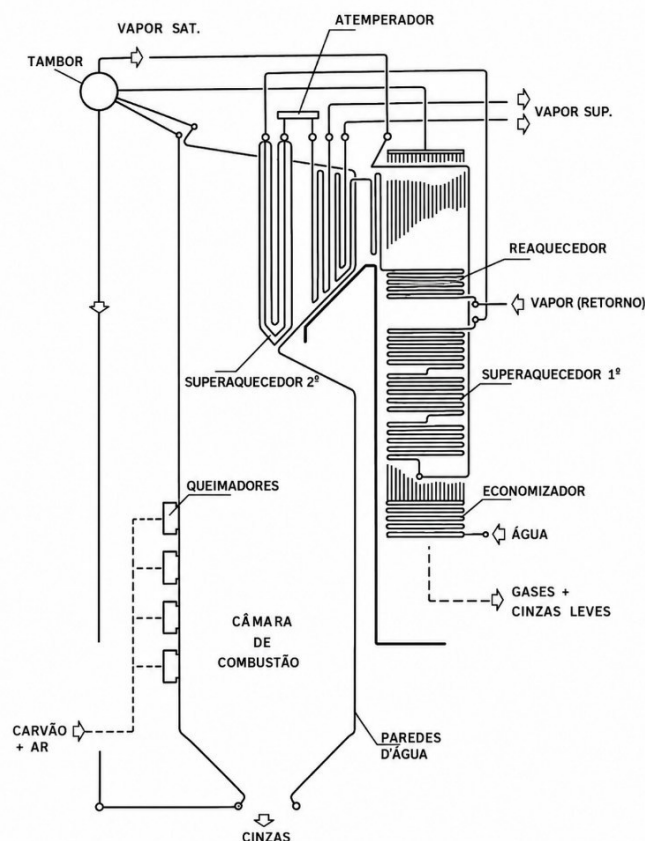
Segundo Botelho e Bifano (2011), as caldeiras também podem ser divididas em dois grupos: aquatubulares e flamatubulares. Caldeiras do tipo aquatubular são geradores de vapor em que a água a ser vaporizada circula pelos tubos, enquanto o calor oriundo da combustão circula na parte exterior dos tubos. Por outro lado, as caldeiras do tipo flamatubular tem os produtos da combustão circulando pelo interior dos tubos enquanto estão imersos na água que será vaporizada.

A geração do vapor é fundamental na operação industrial. O vapor é substancial em setores da indústria como as usinas sucroalcooleiras, onde é empregado na cogeração de energia elétrica e térmica, além do aquecimento em etapas do processamento da cana-de-açúcar. Na indústria petroquímica, é utilizado em operações de aquecimento, destilação, evaporação e acionamento de turbinas. Na indústria alimentícia, o vapor é amplamente aplicado em processos de cocção, esterilização, pasteurização e limpeza de equipamentos (ICATERM, 2024). Já na indústria têxtil, participa das etapas de tingimento, secagem, acabamento dos tecidos e aquecimento de processos, evidenciando sua ampla aplicação em operações industriais que demandam energia térmica.

3.2 Principais constituintes dos sistemas de geração de vapor

Os sistemas de geração de vapor são compostos por uma quantidade expressiva de constituintes conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 – Esquema simplificado de componentes de caldeira aquatubular



Fonte: Elaborado pela autora com base em Bazzo (1995).

Para síntese, serão detalhados os componentes descritos a seguir (BAZZO, 1995).

- **Fornalha:** região da caldeira em que ocorre a combustão da biomassa e liberação de energia térmica. O objetivo principal é proporcionar condições adequadas para queima eficiente do combustível, garantir tempo de residência e mistura com o ar vindo dos ventiladores e temperatura suficiente para que haja conversão da energia em calor. O calor é gerado predominantemente por radiação, que será transferido para superfícies de aquecimento e, assim, inicia-se o processo de geração de vapor.
- **Tubulão de vapor:** é a região responsável pela separação entre água e vapor produzidos durante o processo. Esses vasos de pressão recebem a mistura entre água e vapor, e por meio de dispositivos internos conseguem promover a separação das fases. O vapor segue para as etapas posteriores do processo e a água retorna para recirculação.

- Economizador: é um trocador de calor que se encontra ao final do percurso dos gases de combustão. Sua função é recuperar parte da energia térmica dos gases para aquecer a água de alimentação anterior à entrada da caldeira. Esse pré-aquecimento é um aliado na redução de combustível necessário para gerar vapor, aumento da eficiência térmica global e diminuição de perda energética.
- Pré-aquecedor de ar a gás: semelhante ao economizador, o pré-ar utiliza os gases da combustão para retornar à fornalha e queimar o combustível. Esse processo aumenta a eficiência da caldeira e diminui perdas térmicas do processo.
- Des aerador térmico: tem como finalidade remover gases dissolvidos na água de alimentação, especialmente oxigênio, que podem desencadear corrosão nos componentes da caldeira. Esse equipamento aquece a água até uma temperatura elevada, em que a solubilidade dos gases será reduzida e facilitará sua eliminação.
- Superaquecedor: tem como função elevar a temperatura do vapor proveniente do tubulão de vapor, para transformá-lo em vapor superaquecido. Esse equipamento é um constituinte presente apenas em caldeiras de alta pressão, onde o vapor torna-se superaquecido em decorrência do fornecimento adicional de calor após atingir a condição de saturação. (adaptado de Smith *et. al*, 2007).

Para além dos equipamentos constituintes de uma caldeira, o tratamento adequado da água de alimentação é fundamental. A qualidade da água deve ser controlada e tratada de acordo com as necessidades requeridas.

3.3 Variáveis operacionais de caldeiras

3.3.1 Variáveis do processo

Segundo Behera *et al.* (2022), a vazão, pressão e temperatura de vapor, o nível de água no tubulão de vapor constituem as principais variáveis operacionais de uma unidade geradora de vapor. Dentre estas, a pressão de vapor, pressão máxima de trabalho admissível e nível de água no tubulão de vapor serão destrinchadas.

3.3.2 Pressão do vapor e Pressão Máxima de Trabalho Admissível

A pressão de vapor é uma propriedade física de substâncias que descreve a pressão exercida pelo vapor de uma substância quando está em equilíbrio dinâmico com seu estado

condensado (SMITH *et al*, 2007). Essa variável pode ser calculada através da Equação de Clausius-Clapeyron, uma expressão termodinâmica para processos de mudança de fase conforme demonstrado na Equação (1), pode ser utilizada para cálculo de pressões baixas, em que P_1 representa a pressão de vapor no estado 1, P_2 é a pressão de vapor no estado 2, ΔH_{vap} é a entalpia de vaporização da substância, R é a constante universal dos gases, T_1 é a temperatura absoluta correspondente a P_1 e T_2 é a temperatura absoluta correspondente a P_2 .

$$\ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right) = -\frac{\Delta H_{vap}}{R}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right) \quad (1)$$

Para o caso de caldeiras de uso industrial, a Equação 1 não é válida, visto que as caldeiras industriais frequentemente operam a pelo menos 10 bar (HEAT BOILER, 2024), ponto em que o vapor não se comporta mais como um gás ideal e o volume do líquido é desprezível. Para essas situações, a maneira correta de se calcular a pressão de vapor é através de tabelas de vapor (IAPWS-IF97), diagramas de pressão-temperatura ou por equações de estado específicas para vapor, disponibilizadas em livros técnicos como Smith *et. al* (2007). Destaca-se que a pressão de vapor pode ser medida em Pa, caso seja utilizado o SI, ou bar, kgf/cm², psi.

Nas caldeiras, a pressão de vapor está diretamente relacionada com as condições de geração e distribuição do vapor produzido. Durante o processo de vaporização, a água é aquecida até atingir a pressão e temperatura de operação estabelecidas, permitindo a obtenção de vapor com as características requeridas para sua utilização nos processos industriais.

Segundo a NR-13 (2025), a Pressão Máxima de Trabalho Admissível (PMTA), é o maior valor de pressão a que um equipamento pode ser submetido continuamente, de acordo com critérios projetistas como resistência dos materiais utilizados e parâmetros operacionais. A PMTA deve ser calculada utilizando dados específicos de projeto de cada caldeira e deve constar no memorial de cálculo (ASME Code, 2024).

3.3.3 Nível de água no tubulão de vapor

Segundo Bazzo (1995), o sistema de controle da água funciona em conjunto com a bomba de alimentação, de modo a manter o nível da água no tubulão ou interior da caldeira. Dentre as opções de controle de nível, algumas, como eletrodos, serão detalhadas nas

próximas seções, por atuarem como dispositivos críticos de segurança.

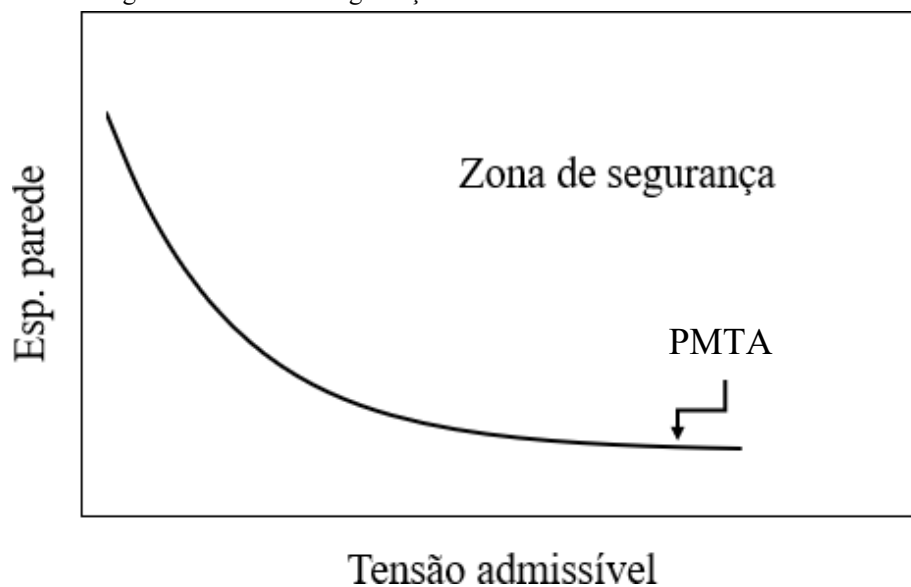
As bombas de alimentação e injetores são essenciais para reposição de água, para que a caldeira consiga fornecer a demanda de vapor (BAZZO, 1995).

A manutenção do nível adequado de água é fundamental para garantir a transferência eficiente de calor dos gases de combustão para a água e evitar a exposição dos tubos ao superaquecimento.

3.4 Dispositivos de segurança aplicados às caldeiras

A instalação, operação, inspeção e manutenção de caldeiras devem atender aos requisitos estabelecidos pela NR-13 (BRASIL, 2025). Considerando que a vida útil dos equipamentos constituintes das caldeiras decai com o passar do tempo por perda de espessura do material (BAZZO, 1995), o risco de acidentes aumenta quando ocorre a redução da espessura da parede e da tensão admissível dos materiais, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 – Limite de segurança da caldeira de acordo com a PMTA



Fonte: Adaptado de Bazzo (1995).

Partindo dessa premissa, a ocorrência de acidentes envolvendo explosão de caldeiras pode decorrer dos seguintes fatores (BAZZO, 1995):

- elevada pressão de trabalho, ultrapassando a PMTA;
- superaquecimento excessivo da estrutura do material;
- corrosão ou erosão do material constituinte (ANNARATONE, 2008);
- ignição espontânea, a partir de inflamáveis remanescentes na fornalha.

O Brasil registrou 70 explosões e uma média de 3,5 fatalidades por ano com problemas de operação de caldeiras (Landi *et al.*, 2022). Embora haja investigações sucessivas, a prevalência de acidentes em caldeiras permanece alta. Em 2016, um dos piores acidentes com caldeiras ocorreu em uma indústria cervejeira, resultado da operação do equipamento com nível d'água abaixo do mínimo permitido, ocasionando a morte de quatro trabalhadores e deixando um ferido (G1 VALE DO PARAÍBA E REGIÃO, 2016).

Dessa maneira, a literatura apresenta um vasto conjunto de estudos voltados à investigação de acidentes em caldeiras (LANDI *et al.*, 2022), incluindo análises de fratura (KIM, 2017), análise de estresse (PASTOR *et al.*, 2020), com o objetivo de compreender os mecanismos de falha e propor medidas para mitigação.

As unidades geradoras de vapor devem operar em condições que garantam a segurança operacional e o adequado funcionamento do processo de combustão e geração do vapor. Para isso, utilizam dispositivos auxiliares de operação e de segurança destinados ao monitoramento e controle das variáveis do processo, evitando que a pressão ultrapasse os limites de operação estabelecidos pela caldeira (BAZZO, 1995).

As referências apresentadas nessas seções 3.4.1 e 3.4.2 foram obtidas através da observação em campo, em uma indústria do agronegócio situada no Triângulo Mineiro e, respeitando questões de confidencialidade, documentos não poderão ser citados.

3.4.1 Dispositivos de Monitoramento e Controle de Nível de Água

3.4.1.1 Garrafa de Nível

A garrafa de nível é um dispositivo instalado com o intuito de formar um vaso comunicante confiável - recebe a mesma pressão e o mesmo nível de água da caldeira - com o tubulão de água da caldeira com o objetivo de permitir identificar o nível de água dentro do tubulão de vapor com ajuda de acessórios como visores, transmissores, eletrodos, entre outros. Dessa forma, a garrafa de nível contribui para a mitigação de falhas operacionais por possibilitar a verificação confiável no supervisório do nível de água, reduzindo o risco de operação inadequada. Representa-se na Figura 3 uma ilustração esquemática de instalação de garrafa de nível e de visor de nível.

Figura 3 – Garrafa de nível



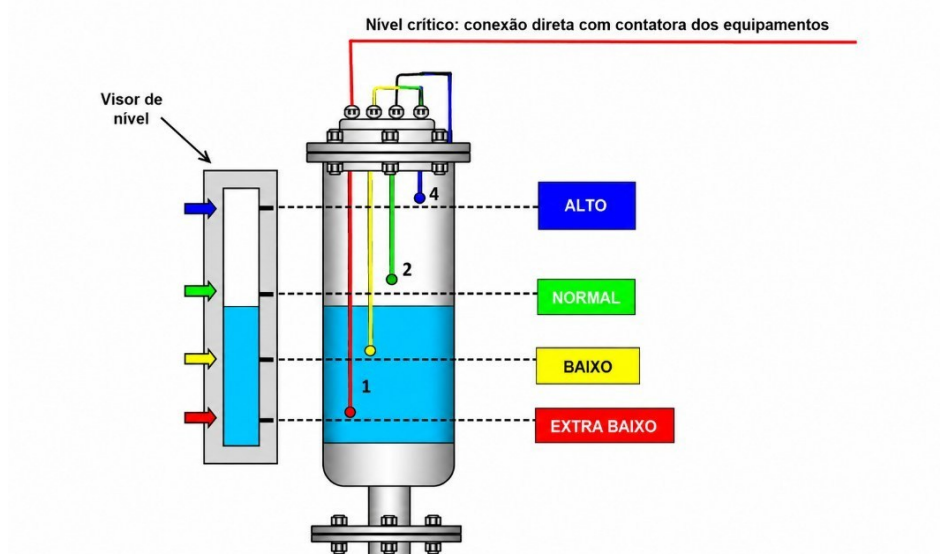
Fonte: Autora.

3.4.1.2 Eletrodos de nível

Os eletrodos de nível são sensores instalados, usualmente, na garrafa de nível conforme apresentado na Figura 3, e não diretamente no tubulão. Seu princípio de funcionamento baseia-se na condutividade elétrica: quando os eletrodos estão imersos em água, ocorre condução elétrica; quando ficam expostos ao vapor, essa condução é interrompida. Este sistema identifica o nível da água por meio de quatro eletrodos que possuem sinalizações específicas para cada caso, conforme disposto na Figura 4.

- Alto: gera um alarme visual e sonoro.
- Normal: possui apenas a indicação visual, não resultando em nenhuma ação.
- Baixo: assim como o eletrodo de nível alto, gera um alarme visual e sonoro.
- Extra baixo: produz alarme visual e sonoro e promove o *trip* (parada automática de emergência do sistema de combustão, isto é, o desligamento automático da caldeira em condições inseguras, visto que nesse ponto os tubos de aquecimento já podem não estar completamente submersos, o que pode resultar em superaquecimento, gerando deformação ou ruptura dos tubos.

Figura 4 – Desenho esquemático de eletrodo de nível



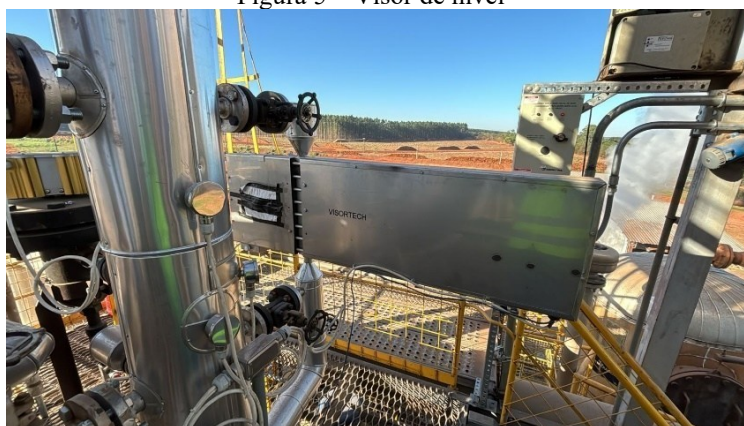
Fonte: imagem gerada com inteligência artificial (ChatGPT, 2026).

Dessa forma, os eletrodos de nível constituem um dos principais dispositivos de proteção das caldeiras, pois permitem a identificação precoce de condições críticas de operação e promovem o desligamento automático *trip* antes que o nível da água esteja extra baixo, contribuindo para redução de acidentes.

3.4.1.3 Visor de nível

O visor de nível permite a visualização imediata do nível do tubulão e se encontra conectado à garrafa de nível, conforme a Figura 5. Esse dispositivo proporciona uma referência rápida essencial para a operação da caldeira, pois o visor de nível pode ser transmitido via circuito de câmeras diretamente para o supervisor da caldeira, proporcionando uma visão clara e ininterrupta ao operador. Desta forma, os operadores podem identificar rapidamente condições anormais e adotar medidas corretivas.

Figura 5 – Visor de nível



Fonte: Autora

3.4.1.4 Sistemas de Alimentação de água

Os sistemas de alimentação de água são responsáveis pelo abastecimento de água da(s) caldeira(s). Conforme item 13.4.1.2 c) da NR13, as caldeiras de combustível sólido não atomizado ou com queima em suspensão devem ser dotadas de injetor ou sistema de alimentação de água independente do principal.

Além disso, de acordo com o PG-61.1 da norma ASME Seção I, caldeiras com área de aquecimento de água maior que 47 m² devem possuir duas formas de alimentação de água e que essas fontes de alimentação não devem ser suscetíveis à mesma forma de falha. Ambas as formas de alimentação devem ser capazes de prover volume suficiente para prevenir danos nas caldeiras. São aceitos como sistemas alternativos para fornecimento emergencial de água: motobombas diesel, bombas elétricas conectadas a grupos geradores dedicados ou ao gerador de emergência da fábrica, ou turbinas movidas a vapor ou uma combinação destas alternativas.

A confiabilidade das caldeiras é assegurada quando o sistema de alimentação de água opera de forma correta, pois assim irá ocorrer a reposição contínua de água consumida na geração de vapor para o processo, minimizando o risco de operação com baixo nível de água.

3.4.2 Outros dispositivos de monitoramento e controle de nível de água

Os transmissores de pressão na linha de alimentação de água monitoram a pressão de água na linha de alimentação de água da caldeira. Outro dispositivo a ser citado são transmissores de vazão instalados nas linhas de alimentação de água e vapor proporcionam

indicação para a malha de controle de nível e auxiliam no controle de vazão mínima das bombas.

3.4.3 Dispositivos de Monitoramento, Controle e Alívio de Pressão

3.4.3.1 Transmissor de Pressão de Vapor

Transmissores de pressão são equipamentos que utilizam o princípio de medição por diferencial da pressão: mede-se a pressão na parte superior e a pressão na parte inferior do vaso ou tanque e então calcula-se a diferença entre elas (MEIRELLES, 2015). A função do transmissor de pressão de vapor é fornecer a indicação da pressão de vapor no tubulão de vapor e na linha (antes da válvula de bloqueio da caldeira), atuando como elemento primário no controle da combustão para compensar as variações na pressão e, se necessário, protegendo a instalação dos valores de sub e sobrepressão. O transmissor de pressão mede a pressão na câmara de combustão e envia um sinal com o valor da saída ao controlador de pressão, que irá comparar esse sinal com o valor do ponto de ajuste e atuar no damper de entrada do ventilador de tiragem induzida, a fim de manter a pressão na câmara de combustão no ponto de ajuste fornecido pelo operador (MEIRELLES, 2015). Exemplifica-se na Figura 6 um transmissor de pressão de vapor instalado em fábrica.

O transmissor contribui para uma operação mais segura por fornecer medições precisas, permitindo que o sistema opere dentro dos limites estabelecidos na malha de controle, sem riscos de sobrepressão.

Figura 6 – Instalação do transmissor de pressão



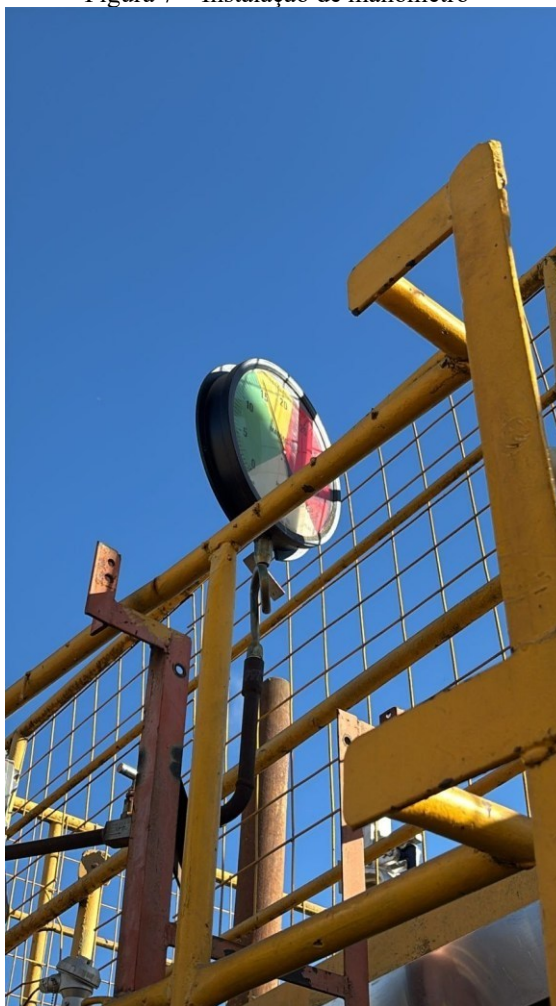
Fonte: Autora

3.4.3.2 Manômetro

Um manômetro é um instrumento que indica pressão de vapor acumulado. (BEUX, 2014). Esse aparelho utiliza o princípio da Lei de Hooke, onde dentro da zona elástica a tensão é proporcional a deformação e a deflexão é então proporcional à pressão aplicada. (MEIRELLES, 2015). A função do manômetro com atuação mecânica é oferecer uma leitura rápida, atuação confiável e independente da pressão da caldeira. Na Figura 7 mostra-se um manômetro instalado em campo, que possui câmera acoplada para que a operação possa receber e acompanhar a informação em tempo real. Estes equipamentos devem estar ligados eletricamente na linha de *trip* da caldeira, quando a pressão estiver acima da PMTA da caldeira.

Erros em manômetros podem acarretar em falhas operacionais, que culminam no aumento de pressão (BEUX, 2014). Por atuar de forma independente da instrumentação eletrônica principal, o pressostato ou manômetro representa uma camada adicional de proteção à operação, por assegurar o *trip* em condições de pressão acima da PTMA.

Figura 7 – Instalação de manômetro

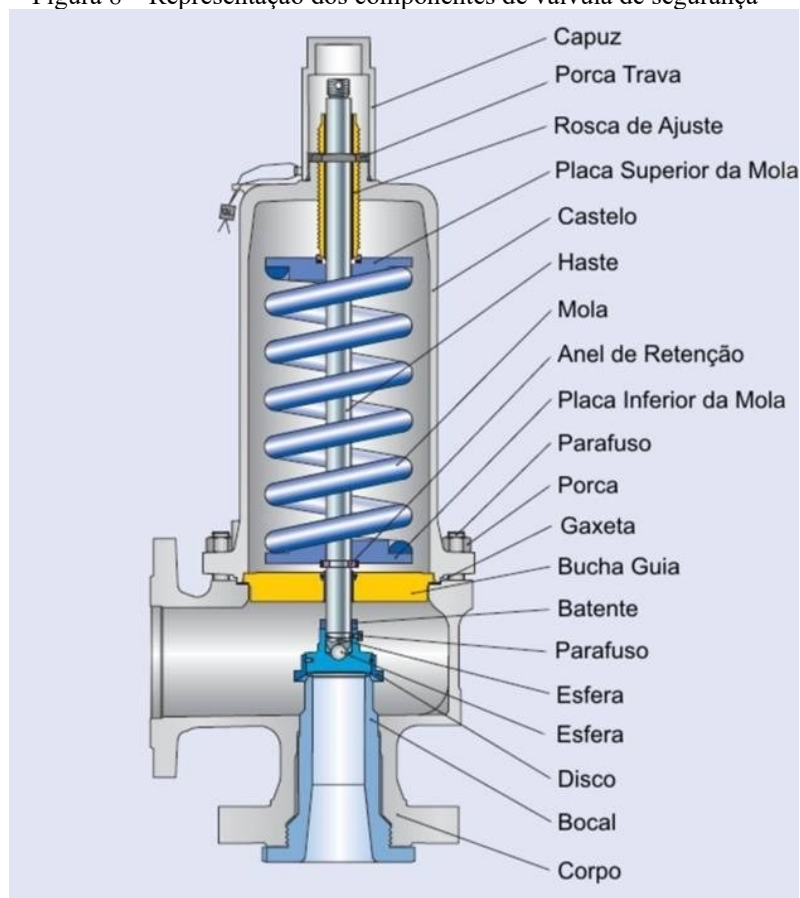


Fonte: Autora

3.4.3.3 Válvulas de Segurança (PSV)

A função das válvulas de segurança é prover alívio imediato para sobrepressões na caldeira, vasos, coletores e tubulações. Em operação normal a válvula permanece fechada devido a ação da mola que mantém o disco pressionado contra o bocal. Quando a resultante da pressão do sistema sobre a área do disco se equilibra com a força da mola ocorre escape de fluido compressível para a câmara formada pelo bocal, anel de regulação e suporte do disco. Esse vazamento promove uma força adicional, não equilibrada pela força da mola que provoca a rápida elevação do disco (disparo ou “pop”). Após o alívio da pressão a válvula irá fechar em valor menor daquele que provocou a abertura. Representam-se na Figura 8 os componentes internos de válvulas de segurança e, na Figura 9, mostra-se uma PSV instalada no ambiente industrial.

Figura 8 – Representação dos componentes de válvula de segurança



Fonte: Santini (2016)

As considerações do código ASME para instalação de válvulas de segurança são listadas a seguir.

- Caldeiras com mais de 47m² de área de aquecimento devem possuir no mínimo 2 válvulas de segurança.
- Caldeiras com superaquecedor devem possuir pelo menos 1 válvula de segurança instalada entre a saída do último superaquecedor e a válvula de bloqueio da caldeira, e esta deverá a primeira válvula a disparar para garantir o resfriamento do superaquecedor.
- A descarga somada de todas as válvulas de segurança instaladas deve ser no mínimo a vazão máxima projetada da caldeira na PMTA, não permitindo em nenhum caso a elevação da pressão 6% acima da PMTA da caldeira (106% PMTA).
- A conexão da caldeira com a válvula de segurança deve no mínimo possuir a área de entrada do bocal da válvula de segurança.
- O tubo de descarga de vapor, quando utilizado, deve possuir área útil igual a

área do bocal de descarga da válvula, sendo instalado tão próximo quanto possível da válvula de segurança (máximo 600 mm).

- As tensões geradas na conexão da válvula com a caldeira quando da abertura da válvula devem ser mantidas dentro do admissível com a instalação de suportações ou ancoragens para os tubos de descarga instalados (conforme Projeto Técnico).
- Nenhuma válvula ou bloqueio deve ser instalado entre a válvula de segurança e a caldeira e no tubo de descarga da válvula.
- O tubo de descarga da válvula de segurança deverá ser direcionado para área segura, longe do acesso de pessoas.
- Deve ser previsto dreno no tubo de descarga e o prolongamento do dreno do corpo da válvula conforme figura a seguir.

A PSV evita que a pressão ultrapasse limites capazes de provocar falhas na estrutura da caldeira, assim como acidentes de grandes proporções.

Figura 9 – Válvula PSV instalada em campo



Fonte: Autora

3.4.3.4 Válvula de Partida

A função primária da válvula de partida é permitir o fluxo mínimo em momentos de partida e parada de uma caldeira. No processo de partida de uma caldeira, a pressão do vapor que está sendo produzido irá variar de zero até a pressão de operação. Durante este processo, o vapor produzido, não pode ser enviado para a turbina ou o processo da planta. Assim, este vapor deve ser aliviado para a atmosfera de forma controlada para manter a tubulação do superaquecedor da caldeira dentro dos limites de temperatura desejados (DURCON, s.d.). Além disso, a válvula também é utilizada como válvula de alívio de pressão em casos de rejeição abrupta de carga ou em condição em que a temperatura de vapor esteja acima do valor programado, assegurando que o controle da pressão e minimizando riscos de falhas. Representa-se na Figura 10 uma válvula de partida de caldeira aquatubular.

Figura 10 – Válvula de partida instalada em campo



Fonte: Autora

4 CONCLUSÃO

O presente trabalho atingiu o objetivo proposto de apresentar, por meio de revisão bibliográfica, os principais componentes de uma caldeira e os dispositivos de segurança empregados em sistemas industriais de geração de vapor, destacando suas funções e sua contribuição para a redução de falhas e acidentes. A análise demonstrou que esses dispositivos atuam de forma complementar, formando sucessivas camadas de proteção capazes de detectar desvios operacionais, acionar alarmes, promover o desligamento automático da caldeira e aliviar condições de sobrepressão, contribuindo para a integridade dos equipamentos e para a segurança operacional.

Observou-se que componentes como fornalha, tubulão de vapor, economizador, superaquecedor e sistema de alimentação de água exercem papel fundamental na geração eficiente de vapor, enquanto os dispositivos de segurança constituem importantes camadas de proteção, capazes de detectar condições anormais de operação, acionar alarmes e aliviar condições de sobrepressão antes que ocorram danos aos equipamentos.

Conclui-se que o adequado dimensionamento, instalação, operação e manutenção desses dispositivos, aliados ao atendimento às exigências da Norma Regulamentadora nº 13 (NR-13) e do código da *American Society of Mechanical Engineers* (ASME), são fundamentais para reduzir a probabilidade de falhas, aumentar a confiabilidade operacional e prevenir acidentes em sistemas de geração de vapor.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS (ASME). **ASME Boiler and Pressure Vessel Code**. Section I: Rules for Construction of Power Boilers. New York: ASME, 2024.

ANNARATONE, Donatello. **Steam Generators: Description and Design**. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

BAZZO, Edson. **Geração de vapor: para aquecimento de processo e geração de energia**. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BEHERA, C et al. **Control and analysis of crucial parameters for an automatic boiler unit in a chemical industry**. International Journal of Engineering, Science and Technology, v. 14, n. 3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4314/ijest.v14i3.11s>.

BEUX, Giovana. **Avaliação das condições de segurança na operação de caldeiras a vapor**. 2014. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Engenharia de Segurança do Trabalho) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2014. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/22255>. Acesso em: 7 jul. 2026.

BOTELHO, M. H. C.; BIFANO, H. M. **Operação de caldeiras: gerenciamento, controle e manutenção**. São Paulo: Blucher, 2011.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-13: Caldeiras, vasos de pressão e tubulações**. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2025.

CHAMORRO, M. et al. **Operational control of the energy performance of a water-tube boiler using intelligent monitoring of operating variables and parameters**. EUREKA: Physics and Engineering, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2024.003222>.

DURCON EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. **Válvulas de “Partida e Vent” da DURCON para caldeiras de alta pressão**. [s.d.]

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Máquinas térmicas estáticas e dinâmicas: fundamentos de termodinâmica, características operacionais e aplicações**. São Paulo: Érica, 2014.

G1 VALE DO PARAÍBA E REGIÃO. Falta d'água em caldeira causou explosão em cervejaria em Jacareí. G1, 18 nov. 2016. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2016/11/falta-dagua-em-caldeira-causou-explosao-em-cervejaria-em-jacarei.html>. Acesso em: 2 jul. 2026.

HEAT BOILER. O que você precisa saber sobre a capacidade da caldeira industrial? 29 jul. 2024. Disponível em: <https://www.heatboiler.com.br/blog/capacidade-da-caldeira-industrial/>. Acesso em: 6 jul. 2026.

ICATERM. Geração de vapor para processos industriais: entenda a importância. 15 abr. 2024. Disponível em: <https://icaterm.com.br/geracao-de-vapor-para-processos->

[industriais-entenda-a-importancia/](#). Acesso em: 16 jul. 2026.

LANDI, Renan Guimarães et al. **Using systems theory for additional risk detection in boiler explosions in Brazil**. Safety Science, v. 152, p. 12, 2022. Tradução . . Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105761>. Acesso em: 17 jul. 2026.

MEIRELLES, Ana Luiza Ottoni. **O controle automático de caldeira**. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Ciências Náuticas) – Escola de Formação de Oficiais da Marinha Mercante, Centro de Instrução Almirante Graça Aranha, Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: [Repositório Institucional da Marinha do Brasil](#). Acesso em: 7 jul. 2026.

KIM, E.S., 2017. **Fracture analysis of tube boiler for physical explosion accident**. Forensic Sci. Int. 278, e1–e7. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2017.07.036>

PASTOR, M. et al., 2020. **Prediction of failures in steam boiler using quantification of residual stresses**. Eng. Failure Anal. 118, 104808. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104808>.

PEREIRA, Nicolas Bruno Santos. **Análise do cavaco de bambu como alternativa ao cavaco de eucalipto para utilização em caldeiras a vapor**. 2022. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecatrônica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

RAYAPROLU, Kumar. **Boilers for Power and Process**. Boca Raton: CRC Press, 2009

ROCHA, Valdemir. Como funciona uma caldeira industrial na prática. **Galpão das Máquinas**, 22 fev. 2026. Disponível em: <https://galpaodasmaquinas.com.br/blog/termico/caldeira/como-funciona-uma-caldeira/>. Acesso em: 22 maio 2026.