

**CALDEIRAS NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.  
BOILERS IN THE GENERATION OF ELECTRICAL ENERGY.**

**Luiz Gustavo de Assis Serafim<sup>1</sup>, Diogo Cambraia<sup>2</sup>, Aline Rezende Gonçalves<sup>3</sup>,  
Nathan Costa Silva<sup>4</sup>.**

<sup>1</sup>Grupo Unis, Varginha, Minas Gerais, [luiz.serafim@alunos.unis.edu.br](mailto:luiz.serafim@alunos.unis.edu.br)

<sup>2</sup>Grupo Unis, Varginha, Minas Gerais, [diogo.cambraia@alunos.unis.edu.br](mailto:diogo.cambraia@alunos.unis.edu.br)

<sup>3</sup>Grupo Unis, Varginha, Minas Gerais, [aline.rezende@alunos.unis.edu.br](mailto:aline.rezende@alunos.unis.edu.br)

<sup>4</sup>Grupo Unis, Varginha, Minas Gerais, [nathan.silva@alunos.unis.edu.br](mailto:nathan.silva@alunos.unis.edu.br)

**RESUMO (em Português)**

Este artigo apresenta uma síntese técnico-científica sobre caldeiras aplicadas à geração de energia elétrica, com ênfase em fundamentos termodinâmicos, tipologias (flamotubulares, aquatubulares, supercríticas e de recuperação), aspectos de eficiência e controle, aplicações em ciclos Rankine e combinados (HRSG), e integração com reatores nucleares (PWR/BWR e SMR). São discutidos limites operacionais, segurança (códigos de projeto) e tendências tecnológicas, incluindo ultra-supercríticas, automação, IoT/IA e biomassa. O contexto brasileiro é analisado a partir do Balanço Energético Nacional, com destaque ao papel da cogeração industrial e do uso de biomassa. Referenciais nacionais e internacionais sustentam a revisão, com aplicações e exemplos pertinentes ao interior de Minas Gerais.

**Palavras-chave:** Caldeiras; geração de vapor; ciclo Rankine; HRSG; PWR; SMR; eficiência energética; biomassa.

**1 INTRODUÇÃO**

Este artigo apresenta uma síntese técnico-científica sobre caldeiras aplicadas à geração de energia elétrica, com ênfase em fundamentos termodinâmicos, tipologias (flamotubulares, aquatubulares, supercríticas e de recuperação), aspectos de eficiência e controle, aplicações em ciclos Rankine e combinados (HRSG), e integração com reatores nucleares (PWR/BWR e SMR). São discutidos limites operacionais, segurança (códigos de projeto) e tendências tecnológicas,

incluindo ultra-supercríticas, automação, IoT/IA e biomassa. O contexto brasileiro é analisado a partir do Balanço Energético Nacional, com destaque ao papel da cogeração industrial e do uso de biomassa. Referenciais nacionais e internacionais sustentam a revisão, com aplicações e exemplos pertinentes ao interior de Minas Gerais.

Palavras-chave: caldeiras; geração de vapor; ciclo Rankine; HRSG; PWR; SMR; eficiência energética; biomassa.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

O referencial teórico fundamenta-se em obras clássicas e normas técnicas que sustentam o estudo das caldeiras na geração de energia. Autores como Moran e Shapiro (Princípios de Termodinâmica para Engenharia) e Borgnakke & Sonntag (Fundamentos da Termodinâmica) apresentam os princípios termodinâmicos essenciais para compreender os ciclos de potência, incluindo o ciclo Rankine e suas variações. Essas obras descrevem as relações entre pressão, temperatura e entalpia, fundamentais para o dimensionamento e análise de caldeiras. Complementarmente, Pera (Geradores de Vapor de Água) e Bazzo (Geração de Vapor) abordam aspectos construtivos e operacionais das caldeiras, incluindo trocadores de calor, sistemas de combustão e controle de eficiência. Torreira (Fluídos Térmicos) contribui com a análise das propriedades dos fluidos térmicos e sua influência na transferência de calor, enquanto Botelho & Bifano (Operação de Caldeiras) detalham práticas de manutenção, segurança e gerenciamento operacional. No âmbito normativo, a NR-13 estabelece requisitos para integridade estrutural e inspeção de caldeiras, garantindo conformidade legal e segurança. Dados do Balanço Energético Nacional (BEN 2024) e relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA) contextualizam a relevância das caldeiras na matriz energética brasileira e mundial, enquanto publicações da NRC e da IAEA fornecem diretrizes para sistemas nucleares (PWR/BWR) e reatores modulares (SMR). Esse conjunto de referenciais assegura a base científica e técnica para a discussão dos fundamentos, tipologias, eficiência e aplicações das caldeiras na geração de energia elétrica.

## **3 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.1 FUNDAMENTOS TERMODINÂMICOS E OPERAÇÃO REFERENCIAL TEÓRICO**

Caldeiras são geradores de vapor que operam em regime fechado: o combustível fornece calor à água, que atinge elevadas pressões e temperaturas para acionar turbinas, prover calor de processo ou viabilizar cogeração. A transferência de calor ocorre por condução, convecção e radiação, sendo o projeto da fornalha e das superfícies de troca determinante para o desempenho. Caldeiras modernas alcançam faixas superiores a 25 MPa e 600 °C, e sua eficiência depende de fatores como relação ar-combustível, qualidade da combustão, recuperação de calor de exaustão, controle de purgas e reintrodução de condensado. A segurança operacional é regida por códigos e normas de projeto e inspeção, e pela instrumentação de proteção (válvulas de alívio, intertravamentos, monitoramento contínuo de pressão/nível).

### 3.2 TIPOS DE CALDEIRAS E APLICAÇÕES

As tipologias clássicas abrangem: (i) flamotubulares, com gases percorrendo tubos imersos em água, indicadas para baixas a médias pressões; (ii) aquatubulares, com água nos tubos expostos ao calor, adequadas a altas pressões e grandes vazões de vapor; (iii) supercríticas e ultra-supercríticas, com operação acima do ponto crítico da água, elevando a eficiência do ciclo; (iv) de recuperação de calor (HRSG), que aproveitam a exaustão de turbinas a gás em ciclos combinados; (v) nucleares (PWR/BWR), em que o calor de fissão aquece água direta ou indiretamente; e (vi) a biomassa, empregadas amplamente em cogeração industrial.

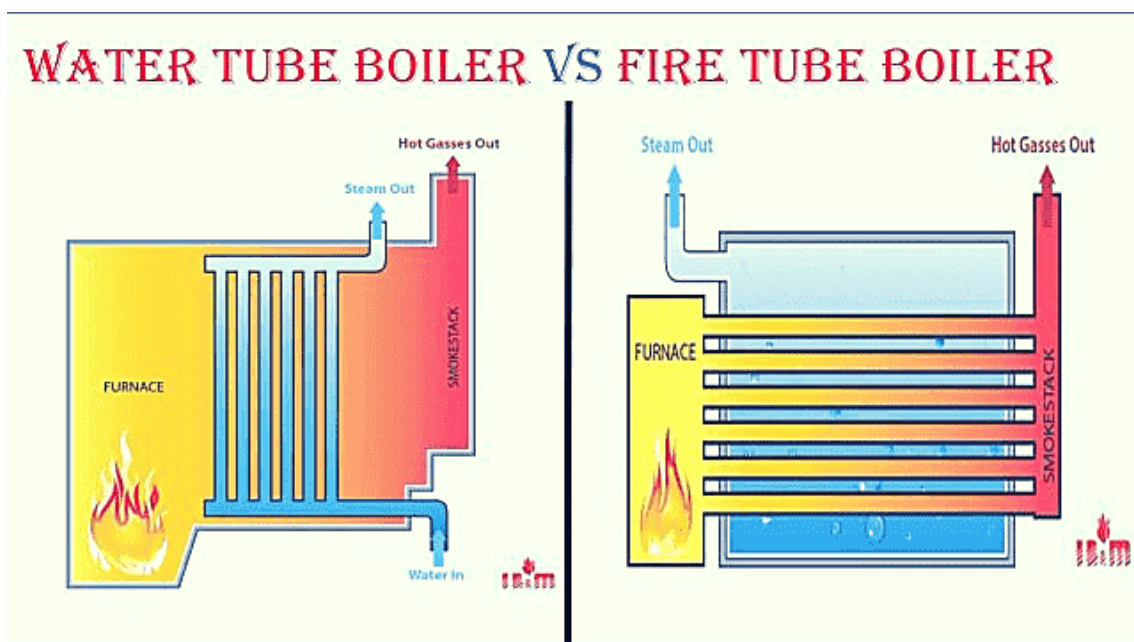


Figura 1 – Flamotubular vs. Aquatubular

Fonte: <https://themechanicalengineering.com/differences-between-fire-tube-boiler-and-water-tube-boiler-with-pdf/>

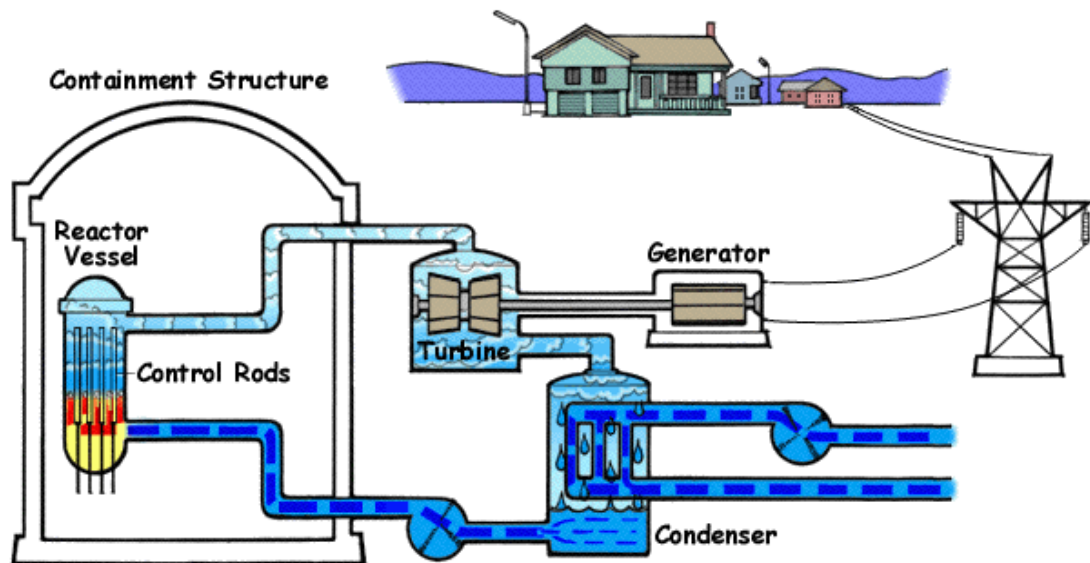


Figura 2 – Ciclo Rankine (esquema)

Fonte: [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Rankine\\_cycle](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Rankine_cycle)

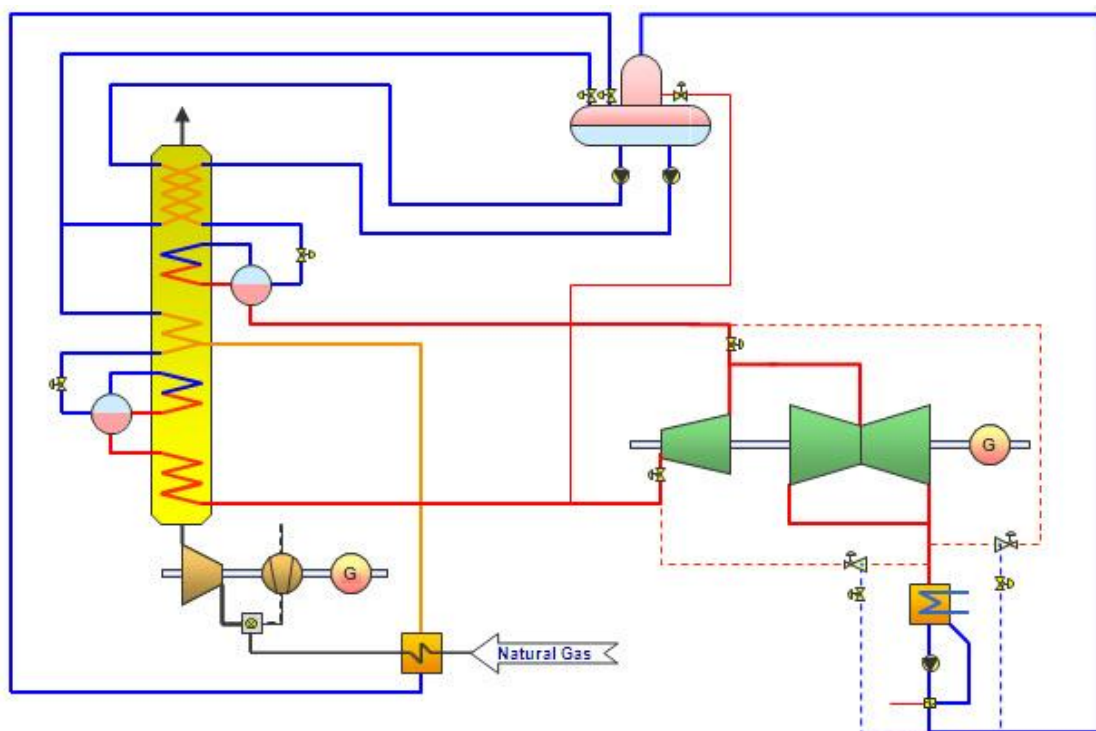


Figura 3 – HRSG em ciclo combinado

Fonte: [https://en.wikipedia.org/wiki/Heat\\_recovery\\_steam\\_generator](https://en.wikipedia.org/wiki/Heat_recovery_steam_generator)

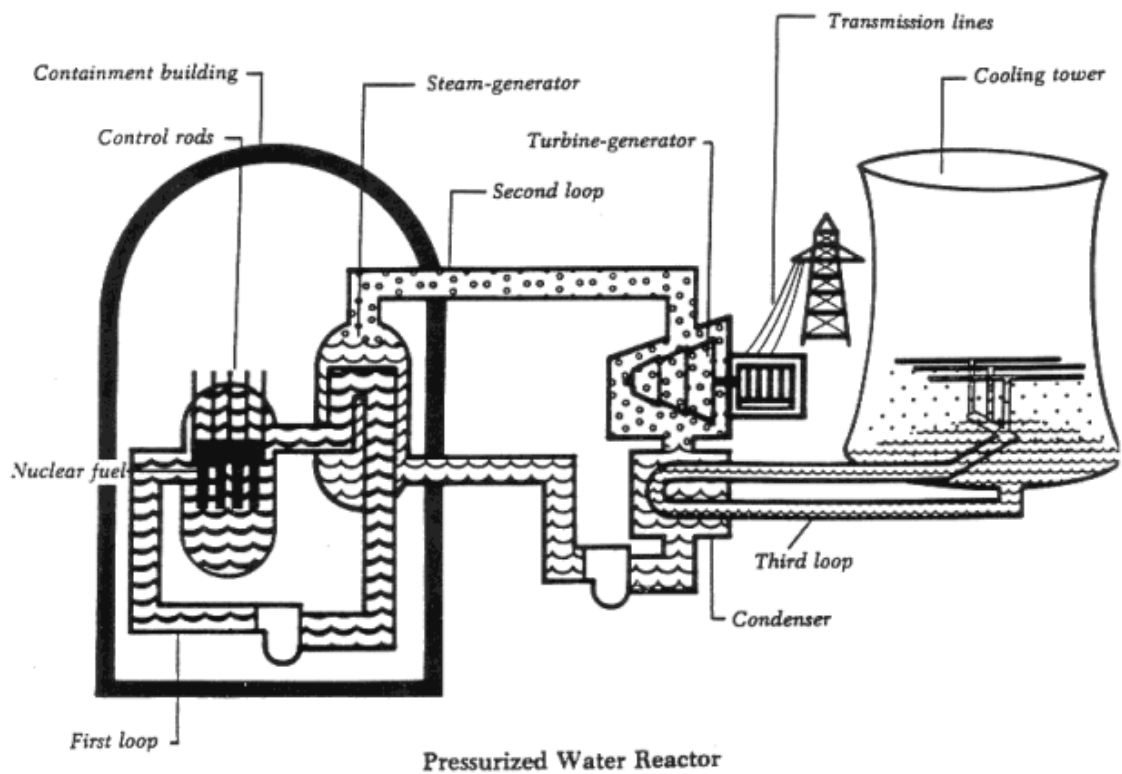


Figura 4 – Esquema PWR (reator de água pressurizada)

Fonte: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/pwr-schematic.html>

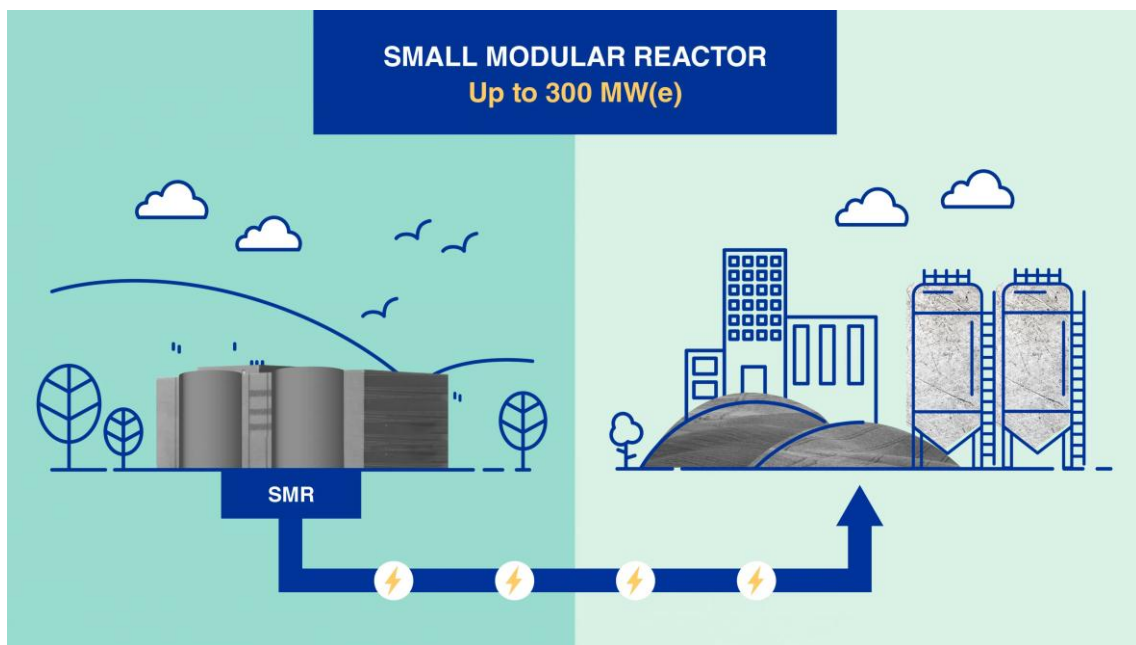


Figura 5 – Exemplo de SMR (visão esquemática)

Fonte: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>

### 3.3 EFICIÊNCIA, CONTROLE E SUSTENTABILIDADE

A eficiência térmica de caldeiras e ciclos depende do aumento da temperatura média de adição de calor e da redução da temperatura média de rejeição. No nível do equipamento, destacam-se técnicas de otimização da combustão, redução de fuligem e incrustações, emprego de economizadores, pré-aquecedores de ar e superaquecedores, além de estratégias de purgas otimizadas e retorno de condensado. Em termos ambientais, queimadores de baixa emissão, controle de NO<sub>x</sub>/SO<sub>2</sub>, e a adoção de biomassa como combustível contribuem para reduzir a pegada de carbono. Tendências incluem automação avançada, uso de IoT e algoritmos preditivos para manutenção e operação ótima.

### **3.4 APLICAÇÕES EM GERAÇÃO ELÉTRICA E COGERAÇÃO**

Em escala global, a geração termoelétrica permanece dominante em diversos países, com relevância para carvão, gás natural e nuclear. As caldeiras estão no cerne dos ciclos Rankine e combinados. No Brasil, segundo o BEN 2022, a cogeração industrial — especialmente com biomassa — desempenha papel estratégico, notadamente em papel e celulose, sucoenergético e setores intensivos em calor de processo.

### **3.5 CALDEIRAS EM REATORES NUCLEARES (PWR/BWR) E SMR**

Nos reatores PWR, a caldeira atua como gerador de vapor secundário, isolando o circuito primário pressurizado do ciclo de turbina a vapor. Em BWR, a ebulição ocorre diretamente no vaso do reator, enviando vapor às turbinas. Os pequenos reatores modulares (SMR) integram geradores de vapor em arranjos compactos, com ênfase em segurança passiva e modularidade, aptos a cogeração e aplicações fora da rede.

### **3.6 CICLOS TERMODINÂMICOS (RANKINE, MODIFICAÇÕES E ALTERNATIVAS)**

O ciclo Rankine ideal constitui a base de usinas a vapor e combina processos de compressão isentrópica (bomba), adição de calor a pressão aproximadamente constante (caldeira), expansão isentrópica (turbina) e rejeição de calor (condensador). Modificações — superaquecimento, reaquecimento e regeneração — elevam a eficiência e reduzem umidade na turbina. Discussões modernas incluem ciclos supercríticos e alternativas como o Allan (variante com arranjos de regeneração), com ganhos potenciais em condições ideais.

### **3.7 TECNOLOGIAS EMERGENTES E PERSPECTIVAS**

Entre as tendências destacam-se caldeiras ultra-supercríticas (> 48% de eficiência de planta em condições de projeto), combustão com plasma ou MILD para redução de poluentes, integração solar térmica, e controle avançado baseado em dados. No âmbito industrial, HRSGs multi-pressão com reaquecimento e SCR para NOx consolidam o padrão em ciclos combinados.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

A análise dos tipos de caldeiras e suas aplicações evidencia que os modelos aquatubulares apresentam maior eficiência térmica e capacidade de operação em altas pressões, sendo preferidos em usinas de grande porte e em ciclos combinados. Já os flamotubulares, embora mais simples, são adequados para aplicações industriais de menor escala. A incorporação de tecnologias como HRSGs em plantas com turbinas a gás permite ganhos significativos de eficiência global, especialmente quando associadas a sistemas de cogeração.

Nos sistemas nucleares, os geradores de vapor em reatores PWR demonstram elevada confiabilidade ao separar os circuitos primário e secundário, enquanto os BWR simplificam o arranjo ao gerar vapor diretamente no vaso do reator. Os SMRs, por sua vez, representam uma tendência emergente, com potencial para aplicações descentralizadas e integração com redes isoladas.

A eficiência térmica das caldeiras foi discutida com base em estratégias como retorno de condensado, controle de purgas, uso de economizadores e queimadores de baixa emissão. Estudos recentes indicam que caldeiras ultra-supercríticas podem atingir até 48% de eficiência de planta em condições ideais, conforme relatórios da IEA e literatura especializada.

No contexto brasileiro, os dados do Balanço Energético Nacional (BEN 2024) confirmam a relevância da cogeração com biomassa, especialmente nos setores sucroenergético e de papel e celulose. A modernização de caldeiras e a adoção de sistemas de controle avançado, como IoT e algoritmos preditivos, são apontadas como caminhos promissores para aumentar a eficiência e reduzir impactos ambientais.

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

As caldeiras continuam desempenhando papel central na geração de energia elétrica e no fornecimento de calor de processo em diversos setores industriais. A evolução tecnológica, aliada à aplicação de fundamentos termodinâmicos sólidos e ao cumprimento de normas técnicas como a NR-13, permite ganhos significativos em eficiência, segurança e sustentabilidade.

A diversidade de tipologias — desde flamotubulares e aquatubulares até HRSGs e sistemas nucleares — evidencia a adaptabilidade das caldeiras às diferentes demandas energéticas. A incorporação de tecnologias emergentes, como automação avançada, controle preditivo, combustão de baixa emissão e integração com fontes renováveis, aponta para um futuro mais eficiente e ambientalmente responsável.

No contexto brasileiro, especialmente no interior de Minas Gerais, há oportunidades concretas na modernização de ativos térmicos, na ampliação da cogeração com biomassa e na adoção de sistemas híbridos e modulares. A articulação entre conhecimento técnico, inovação e políticas energéticas será essencial para consolidar avanços e garantir a segurança energética com responsabilidade ambiental.

## ABSTRACT

*This paper provides a technical review of boilers applied to power generation, covering thermodynamic fundamentals, boiler typologies (fire-tube, water-tube, supercritical and heat-recovery), efficiency and control aspects, applications in Rankine and combined cycles (HRSG), and integration with nuclear reactors (PWR/BWR and SMR). Operational limits, safety codes, and technology trends such as ultra-supercritical steam conditions, automation, IoT/AI and biomass are discussed. The Brazilian context is analyzed using the National Energy Balance, highlighting industrial cogeneration and biomass use. Both national and international references support the review, with examples suitable for Minas Gerais' industrial context.*

**Keywords:** *boilers; steam generation; Rankine cycle; HRSG; PWR; SMR; energy efficiency; biomass.*

## Agradecimentos

O autor expressa sua sincera gratidão ao professor orientador Fabiano Farias de Oliveira, cujo acompanhamento técnico e acadêmico foi essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Agradece também aos professores da disciplina Termodinâmica Aplicada e Trocas Térmicas, Luiz Carlos Vieira Guedes e Déborah Alvarenga Romano, pelas contribuições teóricas e pela inspiração na compreensão dos

fundamentos energéticos. Estende os agradecimentos aos professores de Projeto, Dimensionamento e Inspeção, Luiz Carlos Vieira Guedes e Thiago Luis Nogueira Silva, pelo suporte nas aplicações práticas e pela orientação nas etapas de análise e validação técnica.

## REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Thermodynamics: An Engineering Approach. 8. ed. New York: McGraw-Hill, 2015.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. 7. ed. New York: Wiley, 2010.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2022. Brasília: EPE, 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>. Acesso em: 12 Nov 2025.

IEA – International Energy Agency. World Energy Outlook 2023. Paris: IEA, 2023.

IAEA – International Atomic Energy Agency. Advances in Small Modular Reactors. Vienna: IAEA, 2021. Disponível em: [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1944_web.pdf). Acesso em: 12 Nov 2025.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. World Nuclear Performance Report 2022. London: WNA, 2022. Disponível em: <https://aben.com.br/wp-content/uploads/2022/07/World-Nuclear-Performance-Report-2022.pdf>. Acesso em: 12 Nov 2025.

BALESTIERI, J. A. P. A geração de energia no contexto da sustentabilidade. In: VILANOVA, M. R. N.; SHIINO, M. Y. (org.). Fronteiras da engenharia e ciências ambientais: perspectivas multidisciplinares. São Paulo: Editora UNESP, 2020. Disponível em: <https://books.scielo.org/id/7cnwy/pdf/vilanova-9786557140093-02.pdf>. Acesso em: 12 Nov 2025.

SILVA, P. R. S. Avaliação de eficiência e desempenho de uma caldeira de recuperação de calor via simulações computacionais fora do ponto de projeto. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – COPPE/UFRJ, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11422/21950>. Acesso em: 12 Nov 2025.

BARBOSA, M. A. P.; THÉ PONTE, R. S.; RUFINO, M. G. Eficiência Energética em Caldeiras. In: Energia 2030 – Desafios para uma nova matriz energética, São Paulo, 2010.

Disponível em: <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/22028646>. Acesso em: 12 Nov 2025.

CURCINO, G. M. A. Análise do Sistema Elétrico de uma Caldeira a Vapor. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Uberlândia, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/35801/1/AnaliseSistemaEletrico.pdf>.

Acesso em: 12 Nov 2025.

FERNANDES, J. R. Impacto do modelo matemático da caldeira na modelagem de usinas termoeletricas a vapor. Monografia – UDESC, 2014. Disponível em: <https://repositorio.udesc.br/handle/UDESC/13585>. Acesso em: 12 Nov 2025.

SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. Energia e Meio Ambiente no Brasil. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2006.

KREITH, F.; GOSWAMI, D. Y. Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy. Boca Raton: CRC Press, 2005.

ALLAM, R. J.; FETVEDT, J. E.; FORREST, B. A.; FREED, D. A. \*The Oxy-Fuel, Supercritical CO<sub>2</sub> Allam Cycle: New Cycle Developments to Produce Even Lower-Cost Electricity From Fossil Fuels Without Atmospheric Emissions\*. In: ASME Turbo Expo 2014. Düsseldorf, 2014. DOI: 10.1115/GT2014-26952. Disponível em: <https://asmedigitalcollection.asme.org/GT/proceedings/GT2014/45660/V03BT36A016/250224>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BAZZO, E. \*Geração de Vapor\*. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

BHATT, A. et al. \*Emission Factors of Industrial Boilers Burning Biomass-Derived Fuels\*. Journal of the Air & Waste Management Association, v. 73, n. 4, p. 241–257, 2023. DOI: 10.1080/10962247.2023.2166158. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy23osti/83308.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. \*Fundamentos da Termodinâmica\*. 9. ed. São Paulo: Blucher, 2009.

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

DBDH – Danish District Heating Association. \*Electrifying District Heating in the Ongoing Energy Transition\*. Copenhagen, 11 dez. 2024. Disponível em: <https://dbdh.org/electrifying-district-heating/>. Acesso em: 14 nov. 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. \*Balço Energético Nacional 2024: ano-base 2023\*. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2024>. Acesso em: 14 nov. 2025.

EUROHEAT & POWER. \*Solution Booklet: District Heating and Cooling\*. Bruxelas, 8 jul. 2024. Disponível em: <https://www.euroheat.org/dhc/knowledge-hub/solution-booklet-district-heating-and-cooling>. Acesso em: 14 nov. 2025.

FERNANDES, D.; WANG, S.; XU, Q.; BUSS, R.; CHEN, D. \*Process and Carbon Footprint Analyses of the Allam Cycle Power Plant Integrated with an Air Separation Unit\*. Clean Technologies, v. 1, n. 1, p. 325–340, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2571-8797/1/1/22>. Acesso em: 14 nov. 2025.

IAEA – INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. \*Small Modular Reactors (SMR)\*. Vienna: IAEA, 2025. Disponível em: <https://www.iaea.org/topics/small-modular-reactors>. Acesso em: 14 nov. 2025.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. \*World Energy Outlook 2023\*. Paris: IEA/OECD, 24 out. 2023. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>. Acesso em: 14 nov. 2025.

IEA-ETSAP. \*Coal-Fired Power (Technology Brief E01)\*. Paris: IEA-ETSAP, 2010. Disponível em: <https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E01-coal-fired-power-GS-AD-gct.pdf>. Acesso em: 14 nov. 2025.

LOWTEMP PROJECT. \*Power-to-Heat & Power-to-Gas in District Heating systems (Background Material)\*. 2021. Disponível em: [https://www.lowtemp.eu/wp-content/uploads/2021/01/BackgroundInfo\\_Power-to-Heat-and-Power-to-X\\_LowTEMP.pdf](https://www.lowtemp.eu/wp-content/uploads/2021/01/BackgroundInfo_Power-to-Heat-and-Power-to-X_LowTEMP.pdf). Acesso em: 14 nov. 2025.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. \*Princípios de Termodinâmica para Engenharia\*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013.

NRC – U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. \*Pressurized Water Reactors (PWR)\*. Disponível em: <https://www.nrc.gov/reactors/power/pwrs>. Acesso em: 14 nov. 2025.

NUSSBAUMER, T. \*Low emission biomass combustion in automated boilers for heat and power\*. IEA Bioenergy Task 32, 2024. Disponível em: [https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/Nussbaumer\\_IEA-Bioenergy-Task32-Emissions-Report\\_2024\\_08\\_20.pdf](https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/09/Nussbaumer_IEA-Bioenergy-Task32-Emissions-Report_2024_08_20.pdf). Acesso em: 14 nov. 2025.

PERA, H. \*Geradores de Vapor de Água\*. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1966.

SOMOVA, E. V.; TUGOV, A. N.; TUMANOVSKII, A. G. \*Modern Coal-Fired Power Units for Ultra-Supercritical Steam Conditions (Review)\*. Thermal Engineering, v. 70, p. 81–96, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1134/S0040601523020064>. Acesso em: 14 nov. 2025.

TORREIRA, R. P. \*Fluídos Térmicos\*. Curitiba: Hemus, 2002.