

A história da geração termelétrica: do carvão ao ciclo combinado a gás natural

A criação e a evolução da geração termelétrica pode ser lida quase como uma história da luta dos engenheiros contra as irreversibilidades termodinâmicas e contra os limites dos materiais. Em mais ou menos 140 anos, a eficiência térmica saiu de alguns poucos por cento nas primeiras máquinas a carvão para mais de 64% em ciclos combinados modernos a gás natural.

Há, no entanto, um detalhe técnico importante: valores históricos de eficiência não podem ser diretamente comparados. Alguns são brutos, outros líquidos, outros se baseiam no PCS (poder calorífico superior) e outros PCI (poder calorífico inferior), principalmente aqueles relatados nos primórdios do desenvolvimento, quantos padrões não estavam ainda estabelecidos. Por isso, os números deste artigo devem ser vistos principalmente como marcos da evolução tecnológica ao invés de uma comparação rigorosa entre os tipos de máquinas térmicas apresentados.

1. O carvão e a máquina a vapor

A história começa antes mesmo da geração de energia elétrica. O carvão tornou possível alimentar em grande escala as primeiras máquinas térmicas da Revolução Industrial. A máquina atmosférica de Newcomen tinha eficiência térmica da ordem de **0,5%** em meados do século XVIII. A introdução do condensador separado por James Watt elevou a eficiência para cerca de **2,7%**, chegando posteriormente a aproximadamente **4,5%**. No século XIX, pressões maiores e motores mais desenvolvidos permitiram avanços adicionais.

O princípio que governaria toda a evolução futura já estava embutido nessa história: quanto maior a temperatura na qual o calor é fornecido ao ciclo e menor a temperatura na qual ele é rejeitado, maior pode ser a eficiência térmica. Mais tarde, a formulação de Carnot e o desenvolvimento do ciclo Rankine dariam a base teórica para o projeto das usinas a vapor. A evolução sobre o entendimento da influência das condições do vapor tornou-se um dos principais caminhos para aumentar a eficiência.

2. 1880–1900: as primeiras centrais elétricas a carvão

Um marco fundamental foi a Pearl Street Station, de Thomas Edison, que iniciou operação comercial em Nova York em 4 de setembro de 1882. Ali eram usadas máquinas a vapor diretamente acopladas aos dínamos “Jumbo” e se tornou um protótipo do conceito de central elétrica.

Essas primeiras centrais ainda usavam máquinas alternativas (pistão) a vapor, e não turbinas. A eficiência global combustível-eletricidade era extremamente baixa. Um levantamento histórico de centrais a carvão construídas em Berlim registra uma evolução de

aproximadamente 4% em 1885 para 24% em 1927, ilustrando a velocidade do desenvolvimento tecnológico nesse período.

O sistema básico era:

carvão → caldeira → vapor → máquina alternativa → gerador

Boa parte da energia do carvão era perdida na combustão, nos gases quentes da exaustão, nas paredes da caldeira, no condensador e pelas limitações das próprias máquinas alternativas.

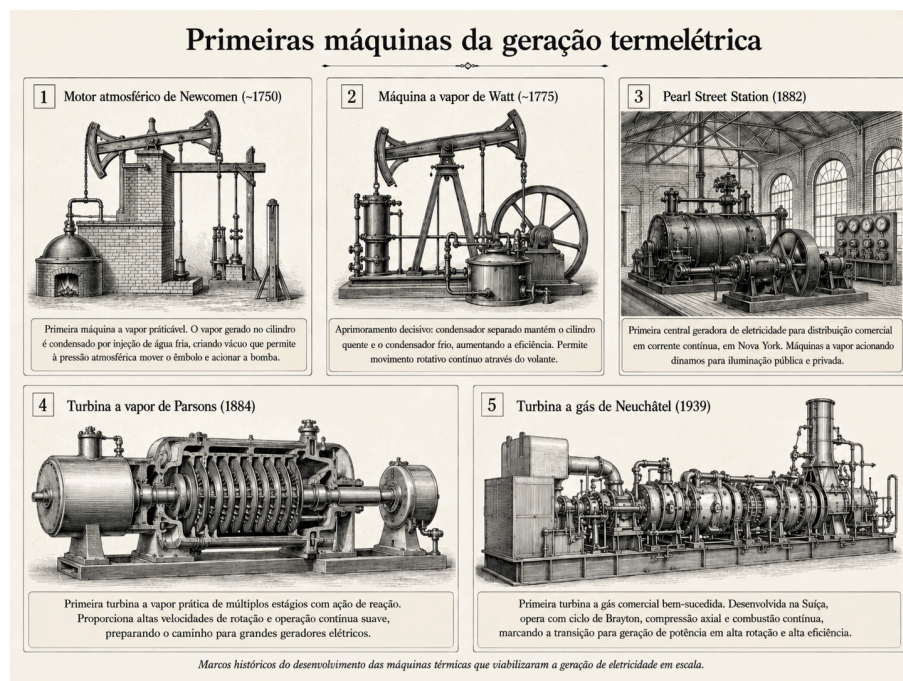


Figura 1 — Marcos históricos das primeiras máquinas térmicas associadas à evolução da geração termelétrica. Ilustração elaborada para este artigo.

3. 1884–1930: a turbina a vapor chega para mudar o mercado

Em 1884, Charles Parsons patenteou sua turbina a vapor de múltiplos estágios. A possibilidade de expandir o vapor progressivamente por vários estágios transformou tanto a propulsão naval quanto a geração elétrica.

Nos Estados Unidos, turbinas do tipo Curtis começaram a ser utilizadas comercialmente em geração elétrica no início do século XX. Uma instalação de 500 kW em 1903 é reconhecida pela ASME como um marco na utilização da turbina a vapor em centrais elétricas.

A turbina apresentava vantagens fundamentais sobre a máquina alternativa:

- maior potência por unidade;
- maiores velocidades de rotação;
- melhor adaptação ao acionamento de geradores;
- expansão do vapor em diversos estágios;
- menor massa específica de equipamento por MW;
- possibilidade de construir unidades cada vez maiores.

Ao mesmo tempo, ocorreu uma evolução substancial na queima do carvão. Em vez de simplesmente queimá-lo bruto sobre grelhas, o carvão passou a ser pulverizado antes da injeção na caldeira. Ensaios do U.S. Bureau of Mines na década de 1920 já mostravam vantagens de eficiência térmica para geração de vapor.

Surgia a configuração que dominaria a geração térmica durante grande parte do século XX:

carvão pulverizado → caldeira → vapor superaquecido → turbina a vapor → condensador → bomba → caldeira

o que ficou conhecido como o Ciclo Rankine.

4. 1920–1960: ajustes na pressão, temperatura, e a aplicação do reaquecimento e da regeneração

Esse foi o período de crescimento mais rápido da eficiência das usinas a carvão. Dados apresentados no programa Advanced Ultra-Supercritical do DOE/EPRI mostram que, entre aproximadamente 1920 e 1960, a temperatura de entrada do vapor na turbina subiu de cerca de 315°C para 538–600°C. A eficiência das usinas aumentou substancialmente nesse mesmo período.

Não foi uma única inovação que produziu esse resultado. Houve uma combinação:

- aumento da pressão do vapor;
- aumento da temperatura do vapor;
- superaquecimento;
- reaquecimento;
- aquecimento regenerativo da água de alimentação;
- melhores projetos de condensadores;
- melhores projetos de turbinas;
- melhores projetos de caldeiras;
- adesão ao carvão pulverizado;
- melhor isolamento térmico e redução das perdas internas.



Figura 2 — Esquema simplificado de uma usina a carvão baseada no ciclo Rankine. A água e o vapor circulam no interior dos tubos da caldeira, enquanto os gases quentes da combustão circulam externamente aos tubos.

O reaquecimento é particularmente importante. Depois da expansão na turbina de alta pressão, o vapor retorna à caldeira, é novamente aquecido e segue para os estágios intermediário e de baixa pressão. Isso melhora a eficiência e também reduz a umidade nos últimos estágios da turbina.

A regeneração, por sua vez, utiliza extrações de vapor da turbina para pré-aquecer a água que retorna à caldeira, aumentando a temperatura média de fornecimento de calor ao ciclo.

5. Décadas de 1950–1970: a maturidade das plantas subcríticas

Nas décadas de 1950 e 1960, as grandes usinas a carvão já haviam alcançado condições de vapor próximas de 538°C e pressões da ordem de 2.400 psi, aproximadamente 165 bar.

Uma síntese apresentada pelo DOE/EPRI fornece uma boa referência para a evolução do Rankine:

Tecnologia	Condições representativas	Eficiência líquida aproximada
Subcrítica	2.400 psi; 538–566°C	35% HHV

Tecnologia	Condições representativas	Eficiência líquida aproximada
Supercrítica	~3.600 psi; $\geq 550^{\circ}\text{C}$	38% HHV
Ultrassupercrítica (USC)	~3.600 psi; $\geq 600^{\circ}\text{C}$	42% HHV
USC Avançado (A-USC)	4.000–5.000 psi; 700–760 $^{\circ}\text{C}$	$\approx 45\%$ PCS ou mais

Nota: valores de referência, não médias universais de frota.

A razão física é clara: elevar pressão e temperatura do vapor aumenta a temperatura média de fornecimento de calor e, conseqüentemente, a eficiência do ciclo. Nessa época começam os grandes desafios dos materiais. Quanto maiores pressão e temperatura, maiores os problemas de fluência, oxidação, corrosão, fadiga térmica e resistência mecânica dos tubos, coletores, válvulas, rotores e carcaças.

6. Supercrítico e ultrassupercrítico: o Rankine se aproxima de seus limites práticos

No ciclo subcrítico ainda existe uma mudança de fase bem definida na caldeira.

Acima do ponto crítico da água (aproximadamente 22,1 MPa e 374 $^{\circ}\text{C}$) deixa de existir uma fronteira líquido-vapor convencional. Isso permite utilizar caldeiras do tipo once-through e condições de vapor significativamente mais elevadas. Surgiram assim as usinas SC — Supercritical e, posteriormente, as USC — Ultra-Supercritical.

Ao final do século XX, plantas supercríticas podiam operar com vapor próximo de 610 $^{\circ}\text{C}$ e 4.300 psia, alcançando eficiências próximas de 41% em determinadas configurações. Hoje, tecnologias HELE — *High Efficiency, Low Emissions* — a carvão podem chegar aproximadamente à faixa de 45%, dependendo do combustível, das condições ambientais, da configuração e da definição utilizada para eficiência.

O próximo nível de eficiência, A-USC, exige temperaturas de aproximadamente 700–760 $^{\circ}\text{C}$. Nessa região, aços convencionais tornam-se insuficientes, tornando necessários materiais baseados em níquel, como superligas desenvolvidas para resistir à fluência por dezenas de milhares de horas. O DOE vem desenvolvendo componentes em escala industrial para plantas A-USC operando em torno de 760 $^{\circ}\text{C}$.

7. Enquanto o Rankine evoluía ...

Paralelamente à turbina a vapor apareceu a turbina a gás. O primeiro grande marco comercial ocorreu em 1939, em Neuchâtel, Suíça. A Brown Boveri instalou uma turbina a gás de 4 MW

com eficiência de 17,4%. Foi a primeira turbina a gás bem-sucedida comercialmente utilizada para geração de eletricidade. Termodinamicamente, tratava-se de uma máquina radicalmente diferente:

compressor → combustor → turbina

que ficou conhecido como Ciclo Brayton.

Curiosamente, a eficiência de 17,4% não era particularmente impressionante em comparação com as boas plantas a vapor da época. A vantagem estava em outro ponto. A turbina a gás oferecia a possibilidade de trabalhar com temperaturas extremamente altas, muito maiores do que as temperaturas do vapor permitidas por uma turbina a vapor.

8. O problema original das turbinas a gás

A primeira turbina de Neuchâtel tinha temperatura de entrada na turbina de apenas cerca de 550°C. A dificuldade era simples: quanto maior a temperatura de entrada na turbina, melhor tende a ser a eficiência do ciclo Brayton, mas o metal das pás precisa sobreviver.

Durante décadas, o desenvolvimento das turbinas a gás concentrou-se em:

- metalurgia;
- ligas resistentes a altas temperaturas;
- aerodinâmica dos compressores;
- eficiência dos compressores;
- refrigeração das pás;
- revestimentos térmicos;
- combustão;
- aumento da razão de pressão.

Em 1945, por exemplo, a Westinghouse desenvolveu uma turbina industrial com cerca de 18% de eficiência. Em 1954, uma máquina com regenerador e intercooler já era projetada para aproximadamente 29%.

9. A entrada do gás natural na matriz de geração

Turbinas a gás podem queimar vários combustíveis e historicamente queimaram derivados de petróleo, gases industriais, até mesmo combustíveis sólidos foram usados em circunstâncias especiais. Porém, o gás natural se adaptou particularmente bem a estas máquinas.

A mistura entre gás natural e ar pode ser controlada com precisão, a combustão produz poucos resíduos sólidos, não existem cinzas como no carvão e a composição do combustível facilita o projeto e uso de combustores compactos e de alta intensidade energética.

Com a expansão das redes de gasodutos e da disponibilidade do combustível, as turbinas a gás passaram a assumir um papel crescente na geração elétrica. Entretanto, utilizar gás natural em uma turbina de ciclo simples ainda não explorava completamente seu potencial. O verdadeiro salto de eficiência viria quando alguém olhasse para os gases quentes da exaustão da turbina a gás.

10. O ciclo combinado Brayton+Rankine

Os gases saem da turbina a gás a temperaturas na região de 500–650°C ou mais. Em um ciclo simples, essa energia é rejeitada para a atmosfera, mas essa temperatura é perfeitamente adequada para produzir vapor de alta qualidade. Por que não colocar uma usina Rankine atrás de uma usina Brayton?

A resposta foi o ciclo combinado, cujo arranjo é:

gás natural

↓

turbina a gás — ciclo Brayton

↓

gases de escape quentes

↓

HRSG — Heat Recovery Steam Generator

↓

vapor

↓

turbina a vapor — ciclo Rankine

↓

gerador

O mesmo combustível passa, termodinamicamente, por dois motores térmicos em cascata.

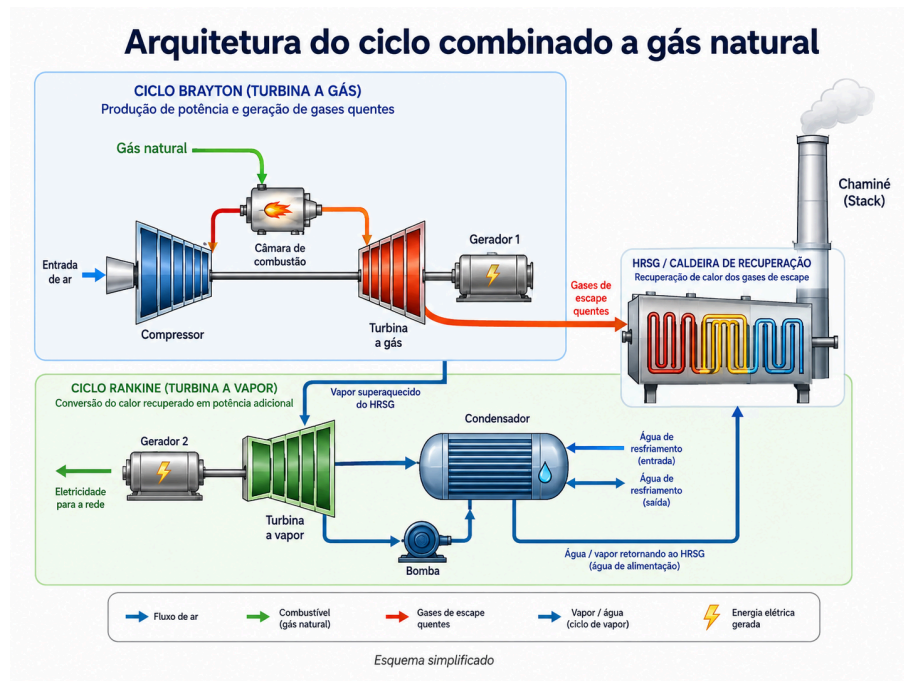


Figura 3 — Esquema simplificado de um ciclo combinado a gás natural, evidenciando o acoplamento entre os ciclos Brayton e Rankine por meio da HRSG.

11. 1960–1980: o ciclo combinado moderno

Em 1967, a cidade de Ottawa, Kansas, colocou em operação o primeiro sistema GTCC pré-engenheirado reconhecido pela ASME. A unidade possuía aproximadamente 11 MW e eficiência térmica líquida de 30,25%.

Na mesma época, a Westinghouse desenvolveu instalações combinando turbinas a gás e a vapor que já alcançavam valores próximos de 40% de eficiência média. O conceito tinha nascido, mas ainda existia enorme espaço para melhoria.

12. Décadas de 1980–1990: a tecnologia aeronáutica chega às usinas

Grande parte da tecnologia de alta temperatura desenvolvida na indústria aeronáutica começou a alimentar a evolução das turbinas industriais:

- pás monocristalinas;
- superligas de níquel;
- revestimentos térmicos;
- refrigeração interna das pás;
- geometrias aerodinâmicas tridimensionais;
- compressores de alta razão de pressão;

- técnicas avançadas de combustão.

As máquinas chamadas F-Class representaram um salto particularmente importante. Na década de 1990, ciclos combinados comerciais já atingiam aproximadamente 54–58% de eficiência, faixa muito superior à obtida pelas usinas Rankine convencionais. Essa diferença alterou profundamente a economia da geração térmica.

13. A barreira dos 60%

Durante muitos anos, alcançar 60% de eficiência foi uma espécie de “Santo Graal” da indústria de turbinas a gás. O principal obstáculo continuava sendo a temperatura.

Na década de 1990, o programa Advanced Turbine Systems — ATS, do U.S. Department of Energy, trabalhou com fabricantes como GE e Siemens-Westinghouse no desenvolvimento de uma nova geração de máquinas. Rumores apontam para 10 anos de pesquisa e cerca de USD1 bilhão aplicados à superação dessa barreira.

O desenvolvimento envolveu tecnologias como:

- pás monocristalinas;
- thermal barrier coatings;
- refrigeração avançada;
- aerodinâmica aprimorada;
- combustão Dry Low NOx;
- temperaturas de combustão próximas de 1.430°C.

O resultado foi a geração H-Class. Segundo o DOE, os sistemas desenvolvidos acabaram ultrapassando a barreira de 60% em ciclo combinado no início dos anos 2000.

14. Décadas de 2000–2010: 60% e além

A partir daí, a competição entre fabricantes concentrou-se em décimos de ponto percentual. O desenvolvimento passou pelas classes E, F, G, H, J, HA/HL/JAC, a depender da nomenclatura de cada fabricante.

Ao mesmo tempo, o próprio ciclo a vapor ficou mais sofisticado. Os HRSGs passaram a utilizar:

- dois ou três níveis de pressão;
- reaquecimento;
- otimização de pinch e approach;
- turbinas a vapor mais eficientes;
- menores perdas de pressão;
- condensadores aperfeiçoados.

Assim, não foi apenas a turbina a gás que melhorou, o casamento termodinâmico entre Brayton e Rankine tornou-se muito melhor.

15. 2010–2026: a região dos 64%

A geração atual de turbinas a gás de grande porte opera em um nível extraordinário quando comparada às primeiras centrais térmicas. A Mitsubishi Power declara para sua série M701J/JAC:

- eficiência de ciclo simples em torno de 43–44% LHV;
- eficiência de ciclo combinado superior a 64% LHV.

A GE Vernova declara para a nova 7HA.03 valores próximos de 64% de eficiência líquida PCI em configuração 2×1, com a linha HA operando na faixa de 63–64%. A Siemens Energy também declara eficiência superior a 64% para suas máquinas HL-Class em ciclo combinado.

Portanto, em 2026, a fronteira comercial das grandes centrais térmicas convencionais está aproximadamente na região 64%+ PCI para ciclos combinados avançados a gás natural.

16. A evolução em uma única tabela

Uma síntese aproximada ajuda a visualizar a dimensão da transformação:

Época	Tecnologia dominante/marco	Eficiência aproximada
1750	Newcomen — máquina a vapor	~0,5%
1775	Watt + condensador separado	~2,7%
1880s	Primeiras centrais elétricas a carvão	~4–10%
1920s	Turbinas a vapor + carvão pulverizado	~20–25%
1950–60	Rankine subcrítico moderno	~30–35%
1960–90	Supercrítico	~35–40%
atual	USC a carvão	~40–45%
1939	Primeira GT comercial	17,4%
1950s	GT aperfeiçoada	~25–30%

Época	Tecnologia dominante/marco	Eficiência aproximada
1960–70	Primeiros ciclos combinados	~30–40%
1990s	F-Class CCGT	~54–58%
2000s	H-Class CCGT	>60%
2010s	H/J/HA-Class	~61–63%
2020–26	HA/HL/JAC	≈64%+ LHV

Os valores combinam referências históricas e marcos tecnológicos e, portanto, não devem ser interpretados como uma série estatística homogênea.

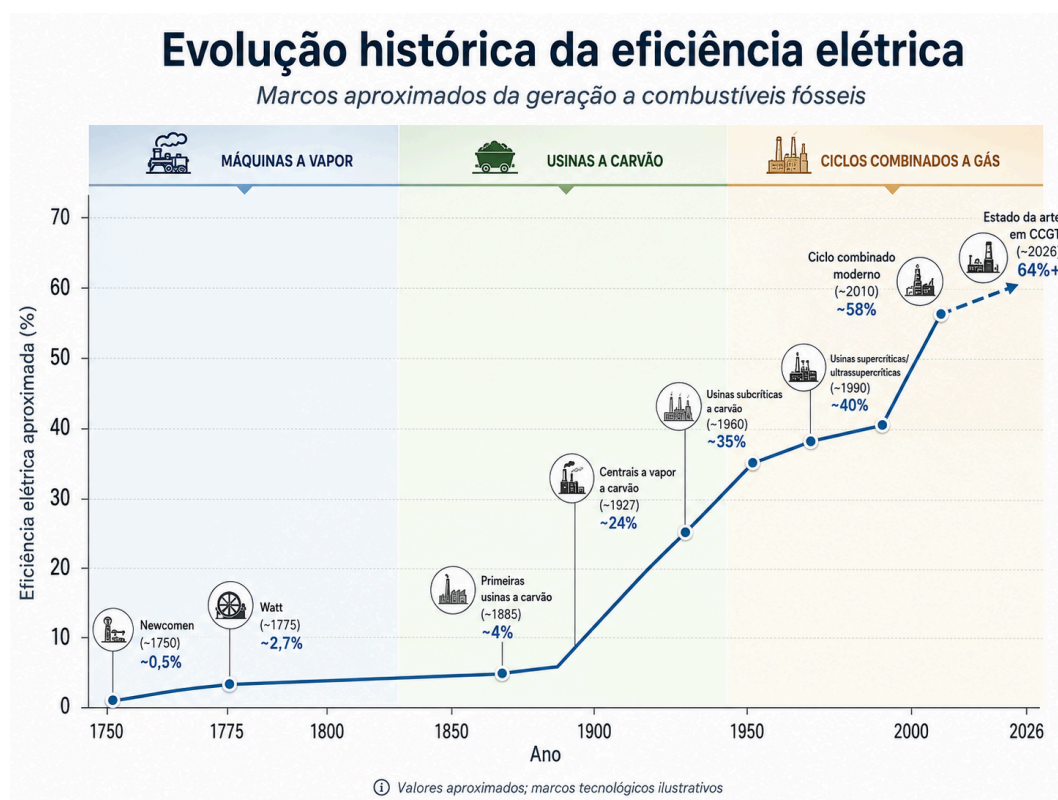


Figura 4 — Evolução conceitual da eficiência elétrica ao longo dos principais marcos tecnológicos da geração termelétrica. Os valores são aproximados e servem para evidenciar a tendência histórica.

O que se observa neste gráfico é que o ciclo Rankine melhorou continuamente, mas sua curva começou a se achatar quando temperaturas e pressões encontraram os limites econômicos e metalúrgicos dos materiais. A introdução do Brayton criou uma nova trajetória. E o ciclo combinado uniu as duas.

17. O que realmente produziu os ganhos de eficiência?

Podemos decompor aproximadamente 140 anos de evolução em oito revoluções tecnológicas:

1. Máquina alternativa → turbina a vapor

Permitindo maior escala, rotação e eficiência.

2. Carvão em grelha → carvão pulverizado

Melhorando combustão e transferência de calor.

3. Aumento da pressão do vapor

Elevando a eficiência do Rankine.

4. Aumento da temperatura do vapor

Talvez a variável mais importante historicamente.

5. Reaquecimento + regeneração

Reduzindo irreversibilidades internas.

6. Rankine subcrítico → SC → USC → A-USC

Aproximando plantas a carvão da faixa de 40–45% ou mais.

7. Desenvolvimento da turbina a gás

Permitindo temperaturas de ciclo muito superiores às encontradas no Rankine.

8. Brayton + Rankine = ciclo combinado

Utilizando o calor rejeitado pelo primeiro ciclo como fonte térmica para o segundo.

18. Uma conclusão termodinâmica interessante

Talvez a maneira mais interessante de interpretar essa história seja perceber que não houve uma única máquina térmica vencedora. O carvão ajudou a desenvolver a máquina a vapor que evoluiu para a turbina a vapor, que levou o ciclo Rankine próximo de seus limites tecnológicos. Enquanto isso, o desenvolvimento aeronáutico levou à turbina a gás, que tornou o ciclo Brayton extremamente eficiente.

Mas a máquina térmica fóssil mais eficiente da atualidade surgiu quando os engenheiros perceberam que não precisavam escolher entre elas e colocaram o ciclo Rankine atrás do ciclo Brayton.

É isso que explica, em grande medida, a trajetória de sucesso dos ganhos de potência e eficiência.

E há um detalhe ainda mais interessante, a fronteira da pesquisa já está além disso. O DOE investiga turbinas e ciclos avançados visando eficiências superiores a 65%, envolvendo temperaturas ainda maiores, materiais avançados, CMCs, novas formas de combustão e ciclos de CO₂ supercrítico. Daqui a pouco tem mais!

Referências

1. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Edison “Jumbo” Engine-Driver Dynamo — 1882.* ASME Historic Mechanical Engineering Landmark No. 48. A fonte documenta a Pearl Street Station, o início da operação comercial em 4 de setembro de 1882 e os conjuntos máquina a vapor–dínamo utilizados por Edison.
<https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/48-edison-jumbo-engine-driver-dynamo>
2. **BERG, H.** *Early days of German power plant construction — a contribution to the 750th anniversary of Berlin.* Energietechnik, v. 37, n. 9, p. 348–354, 1987. Disponível por meio do Energy Technology Data Exchange/OSTI. É uma das referências mais importantes para a curva histórica de eficiência: registra a evolução de aproximadamente **4% em 1885 para 24% em 1927** nas centrais de Berlim.
<https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/7243279>
3. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Charles A. Parsons.* ASME. Descreve a criação da turbina a vapor de múltiplos estágios por Parsons em 1884 e sua posterior aplicação em turbo-geradores.
<https://www.asme.org/topics-resources/content/charles-a-parsons>
4. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Turbinia — 1897.* ASME Historic Mechanical Engineering Landmark. O documento apresenta o desenvolvimento da turbina de reação de Parsons, cujo primeiro pedido de patente data de 1884, e sua aplicação à geração elétrica e posteriormente à propulsão naval.
<https://www.asme.org/wwwasmeorg/media/resourcefiles/aboutasme/who%20we%20are/engineering%20history/landmarks/73-turbinia-1897.pdf>
5. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Curtis 500-kW Vertical Turbine — 1903.* ASME Historic Mechanical Engineering Landmark No. 144. Documenta uma das primeiras aplicações comerciais da turbina a vapor à geração elétrica e a transição das máquinas alternativas para turbomáquinas.
<https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/144-curtis-500-kw-vertical-turbine>
6. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Curtis 5000-kW Vertical Turbine — 1903.* ASME Historic Mechanical Engineering Landmark No. 6. Apresenta a turbina-gerador de 5 MW que, à época, era uma das mais potentes do mundo e ilustra o rápido aumento de escala das centrais elétricas no início do século

XX.

<https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/6-curtis-5000-kw-vertical-turbine>

7. **U.S. DEPARTMENT OF ENERGY / NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY — DOE/NETL; ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE — EPRI.** *Advanced Ultra-Supercritical Component Testing*. DOE Contract DE-FE0025064, 2021. Esta foi uma das principais referências para a evolução do ciclo Rankine e fornece a seguinte comparação de eficiência líquida em base HHV: **subcrítico ≈35%; supercrítico ≈38%; ultrassupercrítico ≈42%; A-USC ≈45%**, associando-a ao aumento da temperatura e pressão do vapor.
https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/21HPM_Hack.pdf
8. **U.S. DEPARTMENT OF ENERGY / NATIONAL ENERGY TECHNOLOGY LABORATORY — DOE/NETL.** *Evaluating Ni-Based Alloys for A-USC Component Manufacturing and Use*. Projeto FWP-FEAA152. Aborda o desenvolvimento de componentes para ciclos Advanced Ultra-Supercritical, com condições de vapor de até aproximadamente **760 °C e 35 MPa**, e o emprego de superligas à base de níquel.
<https://netl.doe.gov/projects/project-information.aspx?p=FWP-FEAA152>
9. **CHEN, X. et al. / OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY — ORNL; DOE/NETL.** *Evaluating Ni-Based Alloys for A-USC Component Manufacturing and Use*. 2024 FECM/NETL Spring R&D Project Review Meeting. Referência complementar sobre Haynes 282, Inconel 740H e os desafios de materiais associados às temperaturas de A-USC.
https://netl.doe.gov/sites/default/files/netl-file/24FECM_AEM_Chen_2.pdf
10. **INTERNATIONAL ENERGY AGENCY — IEA.** *Technology Roadmap: High-Efficiency, Low-Emissions Coal-Fired Power Generation*. Paris: IEA, 2012. A publicação registra que tecnologias HELE em operação já podiam atingir aproximadamente **45% de eficiência térmica** e discute a evolução tecnológica das plantas a carvão.
<https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-high-efficiency-low-emissions-coal-fired-power-generation>
11. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Neuchâtel Gas Turbine — 1939*. ASME Historic Mechanical Engineering Landmark No. 135. Documenta a primeira turbina a gás bem-sucedida comercialmente para geração elétrica, construída pela Brown Boveri, com **4 MW e eficiência de 17,4%**.
<https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/135-neuchatel-gas-turbine>
12. **BANNISTER, R. L.; BEVC, F. P.; DIAKUNCHAK, I. S.; HUBER, D. J.** *Overview of Westinghouse's Advanced Turbine Systems Program*. Westinghouse Electric Corporation / U.S. DOE, 1995. A referência documenta a evolução das turbinas

terrestres da Westinghouse: cerca de **18% de eficiência em 1945**, 29% em uma máquina regenerativa/inter-resfriada de 1954 e o posterior desenvolvimento de ciclos combinados.

<https://www.osti.gov/biblio/269480>

13. **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS — ASME.** *Ottawa Gas Turbine Combined Cycle Power Plant — 1967.* ASME Historic Mechanical Engineering Landmark No. 283. Documenta o primeiro ciclo combinado GTCC pré-engenheirado da série STAG, instalado em Ottawa, Kansas, com aproximadamente **11,5 MW e 30,25% de eficiência térmica líquida.**

<https://www.asme.org/about-asme/engineering-history/landmarks/283-ottawa-gas-turbine-combined-cycle-power-plant%2C-1967>

14. **U.S. DEPARTMENT OF ENERGY — DOE.** *DOE Technology Successes — “Breakthrough” Gas Turbines.* Documento sobre o programa Advanced Turbine Systems. Descreve o desenvolvimento de tecnologias como pás monocristalinas, thermal barrier coatings, refrigeração avançada e o surgimento dos sistemas H-Class capazes de superar a barreira de **60% em ciclo combinado.**

<https://www.energy.gov/hgeo/doe-technology-successes-breakthrough-gas-turbines>

15. **U.S. DEPARTMENT OF ENERGY — DOE.** *Advanced Turbine Systems.* Programa de desenvolvimento tecnológico do DOE dedicado ao aumento de eficiência, redução de emissões e avanço das turbinas a gás industriais.

<https://www.energy.gov/hgeo/advanced-turbine-systems>

16. **mitsubishi power.** *M701J/JAC Series — Large Capacity Gas Turbine.* Documentação técnica do fabricante. Para a geração atual da M701JAC, a Mitsubishi informa eficiência de ciclo simples da ordem de **43–44% LHV** e eficiência de ciclo combinado **superior a 64% LHV.**

<https://power.mhi.com/products/gasturbines/lineup/m701j>

17. **GE VERNova.** *7HA.03 — The Next Evolution of the HA Gas Turbine.* Technical Fact Sheet, 2025. Apresenta a evolução da família HA e desempenho de até aproximadamente **64% de eficiência líquida LHV em configuração 2×1**, dependendo da configuração e das condições de referência.

https://www.gevernova.com/content/dam/gepower-new/global/en_US/downloads/gas-new-site/products/gas-turbines/7ha.03-takeaway.pdf

18. **GE VERNova.** *7HA Gas Turbine.* Documentação técnica do fabricante. A família 7HA é apresentada atualmente na faixa de aproximadamente **63–64% de eficiência líquida em ciclo combinado.**

<https://www.gevernova.com/gas-power/products/gas-turbines/7ha>

19. **SIEMENS ENERGY.** *SGT5-9000HL Heavy-Duty Gas Turbine — 50 Hz.* Documentação técnica da HL-Class. A Siemens Energy informa potência de aproximadamente **593 MW em ciclo simples**, aproximadamente 880 MW em ciclo combinado e eficiência de ciclo combinado **superior a 64%**.

<https://www.siemens-energy.com/global/en/home/products-services/product/sgt5-9000hl.html>