WHITE PAPER

Turbinas a gás com reaquecimento

História, fundamentos e evolução

GT2 Tecnologia

Resumo executivo

A combustão sequencial em turbinas a gás constitui uma alternativa à arquitetura convencional do ciclo Brayton: a expansão é dividida em duas etapas, separadas por uma segunda adição de combustível. Embora o princípio tenha sido aplicado industrialmente desde o final da década de 1940, sua reinvenção moderna ocorreu com as ABB GT24 e GT26, introduzidas na década de 1990. A tecnologia combinou razão de compressão elevada, combustores de baixas emissões e reaquecimento para atingir desempenho competitivo em ciclo combinado. Sua introdução enfrentou graves problemas de durabilidade e desempenho, seguidos por um programa de recuperação técnica e comercial. A difusão limitada decorreu tanto desses episódios quanto da evolução das turbinas convencionais de classes F, G, H e J. Não obstante, a arquitetura permanece ativa: a GT26 continua disponível para novos projetos na Ansaldo Energia, que também desenvolveu a GT36 de classe H; a GT24 integra principalmente o mercado de serviços e modernizações.

1. Introdução

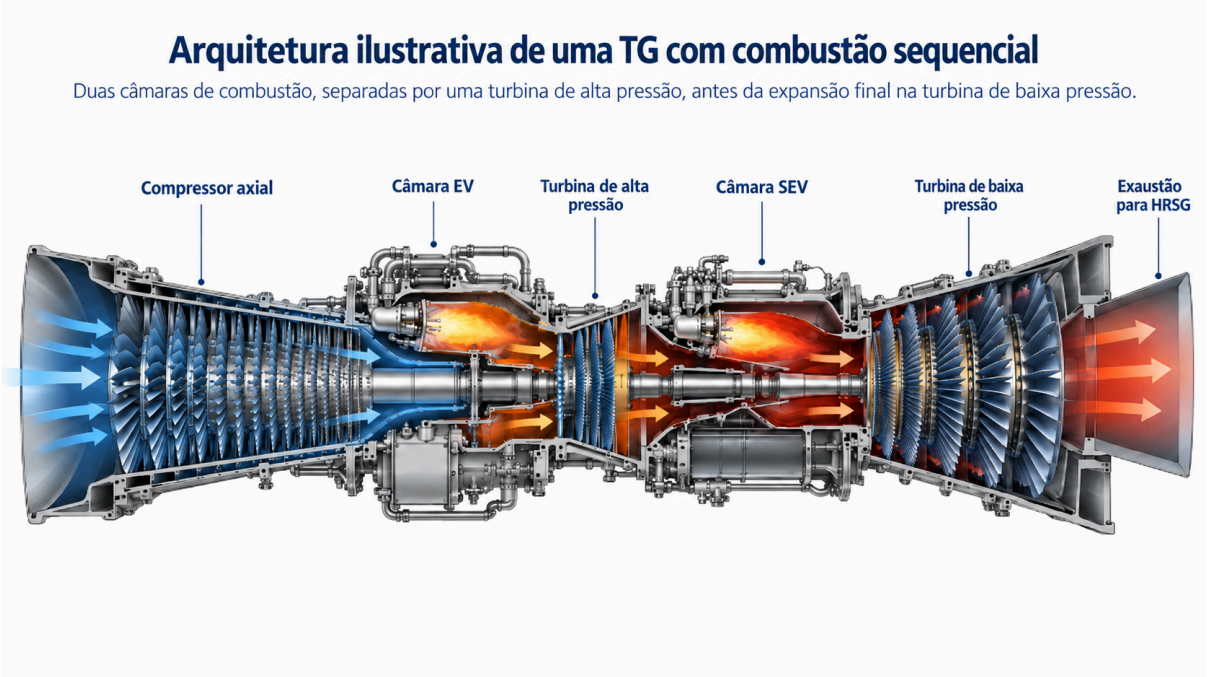
Durante a década de 1990, a indústria de geração termelétrica buscava elevar simultaneamente a potência específica das turbinas a gás e a eficiência global dos ciclos combinados. A maior parte dos fabricantes seguiu uma trajetória baseada em maiores temperaturas de entrada na turbina, revestimentos térmicos, materiais avançados e aperfeiçoamento dos sistemas de resfriamento. A ABB adotou adicionalmente a combustão sequencial, com uma segunda câmara de combustão entre duas expansões. O conceito não foi universalizado, mas também não desapareceu. A sua história permite examinar a distância entre uma vantagem termodinâmica potencial e sua concretização em um produto industrial confiável e competitivo.

2. Princípio termodinâmico e arquitetura

Em uma turbina de ciclo Brayton convencional, o ar é comprimido, recebe calor na câmara de combustão e se expande na turbina. No ciclo com reaquecimento, os gases atravessam uma primeira turbina, recebem combustível adicional em uma segunda câmara e se expandem novamente. Na família GT24/GT26, a sequência fundamental é compressor axial → combustor EV → turbina de alta pressão → combustor SEV → turbina de baixa pressão → exaustão para a caldeira de recuperação (HRSG). A configuração original utilizava um compressor axial de 22 estágios, turbina de alta pressão de um estágio e turbina de baixa pressão de quatro estágios, com razão de compressão global da ordem de 30:1.

O trabalho específico idealizado da expansão é $w_t = (h_3 - h_4) + (h_5 - h_6)$, enquanto o trabalho líquido é $w_{\text{liq}} = w_t - w_c$. O reaquecimento eleva a entalpia de entrada da segunda etapa de expansão, aumentando o trabalho de turbina em determinadas condições. Entretanto, acrescenta consumo de combustível, perdas de pressão e geração

de entropia. Em um Brayton ideal, com razão de compressão total e temperatura máxima fixadas, o reaquecimento isolado pode reduzir a eficiência térmica do ciclo simples. Portanto, o benefício da solução ABB resultava do dimensionamento integrado do compressor, da repartição da expansão e do aproveitamento do calor residual em ciclo combinado, não de uma propriedade universal do reaquecimento.



3. História da tecnologia

3.1. As origens na Brown Boveri

A utilização de combustão em dois estágios antecede as GT24/GT26 em quase cinco décadas. Desde 1948, a Brown Boveri experimentou soluções de reaquecimento em turbinas estacionárias e, durante os anos 1950 e 1960, forneceu cerca de 24 instalações com combinações de reaquecimento e resfriamento intermediário. Algumas operaram por muitos anos e demonstraram a viabilidade do conceito. As máquinas iniciais, entretanto, empregavam arranjos volumosos, combustores externos e maior complexidade construtiva. Seus ganhos não compensavam consistentemente as penalidades de investimento e manutenção frente à evolução dos ciclos convencionais.

3.2. O retorno nos anos 1990

A retomada do reaquecimento tornou-se possível graças à associação de combustores compactos de baixas emissões, técnicas de mistura e autoignição controlada, instrumentação de ensaio e maior capacidade de simulação aerotermodinâmica. A primeira câmara EV (Environmental) operava com combustão pobre pré-misturada. A segunda, SEV (Sequential Environmental), utilizava gases quentes provenientes da primeira expansão e injeção de combustível em condições favoráveis à autoignição. Isso reduzia a necessidade de uma estabilização convencional de chama no segundo estágio e permitia integrar o conjunto em uma máquina industrial de eixo único.

3.3. Evolução histórica

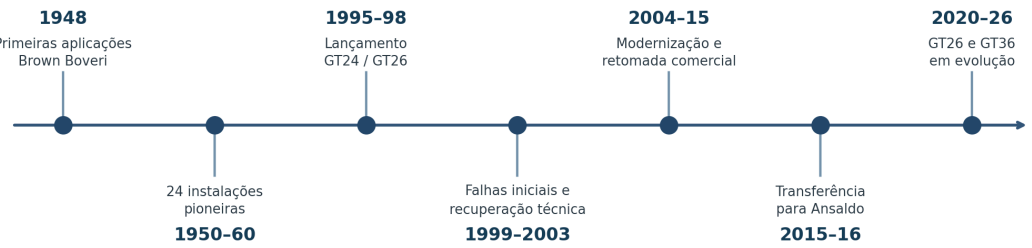


Figura 1 — Evolução da tecnologia de combustão sequencial, das primeiras aplicações industriais à continuidade comercial da GT26 e da GT36. Cronologia compilada a partir de publicações ABB, Alstom, GE e Ansaldo Energia.

O lançamento das GT24 e GT26 ocorreu entre meados e o final dos anos 1990. A transferência dos negócios de geração da ABB para a Alstom coincidiu com um período de intensa correção de problemas técnicos. A partir de 2004, a GT26 retomou projetos comerciais. Após a reorganização do setor em 2015–2016, os direitos para novas vendas da GT26 e o desenvolvimento da GT36 passaram à Ansaldo Energia, enquanto a GE Vernova continuou relevante nos serviços e atualizações da frota instalada.

4. A crise de confiabilidade e a recuperação industrial

As primeiras versões das GT24/GT26 apresentaram deficiências de desempenho, durabilidade e confiabilidade que exigiram intervenções de engenharia e renegociações contratuais. Relatos técnicos de época identificaram contato entre componentes rotativos e estacionários no compressor (rubbing), problemas de fixação de componentes, trincas nos revestimentos da primeira câmara de combustão e deformações de shrouds da turbina de baixa pressão. As medidas corretivas envolveram revisão de folgas, geometrias, fixações, distribuição de resfriamento e condições operacionais. Nem todas as falhas resultaram diretamente da segunda combustão: parte delas estava associada à maturação simultânea de vários subsistemas inéditos.

Em 2000, a Alstom reconheceu problemas que afetavam o programa de cerca de 80 turbinas vendidas. As repercussões incluíram reduções temporárias de potência, custos de modificação em campo, garantias e disputas contratuais. Em março de 2003, a empresa anunciou uma provisão adicional de aproximadamente € 1,35 bilhão para um conjunto de problemas que abrangia GT24/GT26 e contratos ferroviários britânicos; esse montante não deve ser atribuído integralmente às turbinas. Os acordos comerciais e programas de retrofit permitiram reconstruir gradualmente a confiança. Encomendas de GT26 anunciadas em 2004 e entradas em operação em 2006 marcaram a recuperação comercial.

5. Principais desafios de engenharia

5.1. Autoignição, mistura e estabilidade do combustor SEV

Na câmara SEV, o combustível é introduzido em um escoamento de alta temperatura contendo oxigênio residual. A posição da autoignição depende da cinética química, pressão, temperatura, composição do combustível, tempo de residência e mistura turbulenta. Uma representação simplificada da condição desejável é $\tau_{\text{mistura}} < \tau_{\text{ignicao}} < \tau_{\text{residencia}}$. Trata-se de uma orientação qualitativa: os três tempos não são valores uniformes no combustor.

Ignição prematura pode provocar pontos quentes e emissões elevadas; ignição tardia pode favorecer CO, combustão incompleta e instabilidades.

5.2. Perdas aerodinâmicas e gestão térmica

A segunda câmara adiciona perdas de carga e superfícies sujeitas a elevadas temperaturas. Seu dimensionamento deve equilibrar a combustão completa, a homogeneidade da temperatura à entrada da turbina LP, os fluxos de resfriamento e a vida em fadiga térmica dos componentes. Além disso, a repartição da expansão altera a distribuição de pressões e temperaturas ao longo da máquina, com repercussões na aerodinâmica das palhetas, nas folgas e nos gradientes térmicos durante partidas e transientes.

5.3. Controle, emissões e operação flexível

A distribuição de combustível entre EV e SEV constitui um grau de liberdade adicional para controlar potência, temperatura de exaustão e emissões de NOx e CO. Entretanto, requer estratégias de controle e proteção mais elaboradas, especialmente em regime transitório, baixa carga, variações da composição do gás combustível e procedimentos de partida e parada. O potencial de flexibilidade operacional deve sempre ser avaliado conjuntamente com restrições de emissões e limites termomecânicos.

6. Por que a combustão sequencial não se tornou dominante?

A explicação envolve uma combinação de fatores. Primeiro, as turbinas convencionais evoluíram rapidamente nas classes F, G, H e J, alcançando níveis de eficiência e potência que reduziram o diferencial inicialmente pretendido pela ABB. Segundo, a segunda câmara acrescentou custos de desenvolvimento, fabricação, manutenção e validação. Terceiro, o histórico de problemas iniciais afetou a percepção de risco tecnológico e comercial em um setor no qual a disponibilidade e as garantias de longo prazo são decisivas. Finalmente, a pequena quantidade de fabricantes que adotou a arquitetura limitou a escala industrial, a padronização e a difusão do conhecimento operacional.

A difusão limitada, portanto, não demonstra uma inviabilidade termodinâmica. Demonstra que os ganhos obtidos com a arquitetura precisam exceder suas penalidades em um contexto específico de mercado, requisitos de carga, custos de combustível, serviços e risco de implantação. Uma comparação rigorosa entre projetos deve normalizar temperatura máxima, condições ambientais, base PCI/PCS, fronteira de potência líquida, perdas de admissão e exaustão e configuração da HRSG.

7. GT24, GT26 e GT36: situação comercial

A GT24 de 60 Hz permanece como equipamento da frota instalada, com serviços e soluções de modernização oferecidos pela GE Vernova; não foi identificada evidência de oferta corrente de unidades novas dessa designação. A GT26 de 50 Hz segue no portfólio comercial da Ansaldo Energia para novas usinas. Em dezembro de 2025, a fabricante anunciou o fornecimento de uma GT26 para a central de Mátra, na Hungria, com operação prevista para 2029. A GT36 de classe H preserva o princípio de combustão sequencial e já entrou em operação comercial em instalações na China.

Os catálogos atuais da Ansaldo indicam, em valores de referência sujeitos às condições de configuração, aproximadamente 370 MW e 41% de eficiência para a GT26 em ciclo simples, e 563 MW e 43% para a GT36. Em ciclo combinado 1+1, são anunciados respectivamente cerca de 540 MW e 61,0% e 800 MW e 62,6% de eficiência líquida. Tais números não são diretamente comparáveis às especificações originais dos anos 1990 sem normalização do projeto e das condições de garantia.

8. Perspectivas: flexibilidade e hidrogênio

A transição de operação predominante em carga-base para regimes de maior flexibilidade valoriza recursos capazes de ampliar a faixa operacional e controlar temperaturas e emissões em cargas parciais. A combustão sequencial oferece possibilidades específicas de repartição do combustível entre os dois estágios, mas também amplia os desafios de controle. Combustíveis enriquecidos com hidrogênio impõem atenção à cinética de autoignição, velocidades de chama, instabilidade termoacústica e formação de NOx. A Ansaldo divulga capacidades de mistura de hidrogênio para os modelos GT26 e GT36, assim como ensaios de combustores GT36 com hidrogênio puro; ensaios de combustor não devem ser confundidos com certificação de toda a turbina para operação comercial contínua em hidrogênio puro.

9. Conclusões

A história do reaquecimento em turbinas a gás evidencia a importância da integração entre termodinâmica, combustão, aerodinâmica, resistência mecânica e operação. Sua aplicação precedeu a década de 1990, mas a ABB transformou um conceito anteriormente volumoso em uma solução compacta de alta potência. A introdução industrial foi marcada por falhas importantes e custos extraordinários, que foram posteriormente enfrentados mediante modificações técnicas e programas de recuperação. A evolução das arquiteturas convencionais reduziu o diferencial competitivo da combustão sequencial, impedindo sua adoção generalizada. Ainda assim, a GT26 permanece comercialmente disponível e a GT36 constitui uma nova geração dessa linha tecnológica. A avaliação de sua competitividade depende de parâmetros de projeto e operação, e não apenas da existência de uma segunda câmara de combustão.

Referências

[1] ABB Review (1998). Development of the Sequential Combustion System for the GT24/GT26 Gas Turbine Family.
https://library.e.abb.com/public/7e823c573fb781ddc125799c0046e3d1/04-16.pdf

[2] ABB Review (1998). Field Experience with Sequential Combustion.
https://library.e.abb.com/public/4eb9f9de7aa888fac1256ec3002bca71/12-20.pdf

[3] Power Engineering (2003). Gas Turbines: Breaking Through the Barriers to Higher Reliability.
https://www.power-eng.com/gas/turbines/gas-turbines-breaking-through-the-barriers-to-higher-reliability-2/

[4] Alstom (2003). Alstom presents new action plan.
https://www.alstom.com/press-releases-news/2003/3/ALSTOM-presents-new-action-plan-20030312

[5] GE (2016). GE completes divestment of power generation assets to Ansaldo Energia.
https://www.ge.com/news/press-releases/ge-completes-divestment-power-generation-assets-ansaldo-energia

[6] Ansaldo Energia (2025). GT26 — Technical brochure.
https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/2025/GT26.pdf

[7] Ansaldo Energia (2025). GT36 — Technical brochure.
https://www.ansaldoenergia.com/fileadmin/Brochure/2025/GT36.pdf

[8] Ansaldo Energia (2025). Mátra Power Plant — GT26 supply announcement.
https://www.ansaldoenergia.com/about-us/media-center/power-generation-news-insights/det

ail-news/matra-power-plant-ansaldo-energias-gt26-gas-turbine-to-support-hungarys-energy-security-and-decarbonization