WHITE PAPER

Gás de biomassa em turbinas a gás

Termodinâmica, gaseificadores e desafios de integração

GT2 Tecnologia

Resumo executivo

O gás de biomassa pode aproveitar uma fonte renovável e ampliar a flexibilidade do suprimento de energia, mas sua integração com uma turbina a gás exige mais do que substituir um combustível por outro. O poder calorífico inferior (PCI) é frequentemente menor que o do gás natural, e o gás pode conter diluentes, vapor, partículas e alcatrão. Para atingir o mesmo conteúdo térmico no combustor, são necessárias vazões maiores. Isso afeta o sistema de combustível, o acoplamento aerotermodinâmico entre compressor e turbina, o trabalho de compressão do gás combustível e a eficiência líquida da planta. A eficiência do gaseificador também limita a energia química disponível: a eficiência global do ciclo integrado é o produto entre a eficiência de gaseificação e a eficiência do ciclo da turbina a gás, considerando no trabalho útil as tomadas de potência incluídas na fronteira do modelo. A escolha do gaseificador determina parte importante da qualidade do gás e das necessidades de limpeza. A avaliação técnica deve, portanto, tratar combustível, gaseificador e turbina como um único sistema.

1. O gás produzido e o seu poder calorífico

A gaseificação converte biomassa sólida em um gás combustível por oxidação parcial a temperatura elevada. O processo envolve secagem, pirólise e conversão do carvão e dos vapores em uma mistura de gases. Dependendo da matéria-prima, da umidade, do agente gaseificante e da configuração do reator, o produto pode conter monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono, nitrogênio e vapor d’água, além de partículas, alcatrão e outros contaminantes.

Quando se usa ar como agente gaseificante, o nitrogênio que acompanha o oxigênio dilui o gás de produto e reduz seu PCI volumétrico. O uso de oxigênio pode produzir gás com PCI mais alto, mas exige uma unidade de separação ou suprimento de oxigênio e seu consumo de energia precisa entrar no balanço da planta. Para gaseificação com ar ou ar/vapor, o gás se enquadra na faixa de baixo PCI, cerca de 4–6 MJ/Nm³; em sistemas com oxigênio ou vapor, pode atingir a faixa de médio PCI, cerca de 12–18 MJ/Nm³. São valores indicativos, dependentes da base normalizada e da composição do gás.

Uma aproximação usada para ilustrar a vazão adicional necessária é considerar o gás de biomassa com cerca de um décimo do conteúdo energético do gás natural. Essa razão não é universal: valores da ordem de 12 MJ/Nm³ para gás produzido com oxigênio e aproximadamente metade disso para gaseificação com ar podem ser comparados a cerca de 38 MJ/Nm³ para o gás natural. A comparação deve explicitar agente gaseificante, composição e base de referência do PCI.

2. Balanço térmico e eficiência global da rota

Para uma mesma potência térmica requerida no combustor, o baixo PCI volumétrico exige maior vazão volumétrica de combustível. Com eficiência de combustão representada por η_{comb}, a relação simplificada é:

$$\dot{V}_g \approx \frac{\dot{Q}_{comb}}{\eta_{comb}\,\mathrm{PCI}_{g,V}}$$

A vazão varia inversamente com o PCI, desde que se mantenham iguais a entrada térmica e a eficiência de combustão. Se o PCI for expresso por unidade de massa, deve-se usar a vazão mássica e o PCI mássico, sem misturar bases.

A eficiência de gaseificação quantifica a conversão química entre a biomassa e o gás pela razão entre as taxas de energia química do gás produzido e da biomassa alimentada:

$$\eta_G = \frac{\dot{m}_g\,\mathrm{PCI}_g}{\dot{m}_b\,\mathrm{PCI}_b}$$

Como a definição compara o PCI do gás, ela não contabiliza o calor sensível do gás quente. A recuperação desse calor pode melhorar o balanço de energia da instalação, mas deve ser tratada separadamente.

A eficiência do ciclo da turbina a gás compara o trabalho útil com a energia química que entra com o gás. Na fronteira BIGGT adotada neste balanço, o trabalho útil considera as tomadas de potência incluídas no sistema:

$$\eta_{GT} = \frac{\dot{W}_u}{\dot{m}_g\,\mathrm{PCI}_g}$$

Combinando as duas definições, obtém-se a eficiência global do conjunto gaseificador–turbina. A eficiência de gaseificação atua multiplicativamente: uma fração menor da energia da biomassa chega ao ciclo como energia química do gás.

$$\eta_{BIGGT} = \eta_G\,\eta_{GT} = \frac{\dot{W}_u}{\dot{m}_b\,\mathrm{PCI}_b}$$

Como faixas históricas de referência, consideram-se eficiências de gaseificação de 65–75% para leito fixo e 80–85% para leitos fluidizados. Adotando eficiência do ciclo da turbina de 36% para este exemplo, a sensibilidade aritmética da eficiência global é:

η de gaseificação, η_G	η_GT assumida	η_BIGGT resultante
65%	36%	23,4%
70%	36%	25,2%
75%	36%	27,0%
80%	36%	28,8%
85%	36%	30,6%

Quadro 1 — Sensibilidade obtida multiplicando a eficiência de gaseificação por 36%. O valor de 36% é a hipótese adotada neste exemplo; os resultados não são previsão de uma planta comercial. As faixas são históricas e dependem do projeto, do combustível e da fronteira de balanço.

3. Trabalho de compressor, expansão e potência líquida

Para interpretar a eficiência global, o trabalho útil é o trabalho da turbina após descontar o compressor de ar e os demais consumos incluídos na fronteira do ciclo, como a compressão do gás combustível:

$$\dot{W}_u = \dot{W}_t - \dot{W}_c - \dot{W}_{aux}$$

$\dot{W}_{aux}$ representa as tomadas de potência dentro da fronteira escolhida, incluindo o compressor de gás combustível quando esse equipamento está no limite do sistema.

O aumento da vazão de combustível pode aumentar a vazão total de gases na turbina e, em algumas configurações, elevar a potência específica. Ao mesmo tempo, exige maior capacidade de fornecimento e pode deslocar o ponto de operação do compressor. No caso analisado, a mudança do balanço de massa aproxima o compressor do limite de surge, sobretudo em determinados regimes de carga. A resposta depende do mapa da máquina, da geometria da turbina, do controle de palhetas-guia variáveis e do uso de sangria; não é possível extrapolar as curvas de uma máquina para outra.

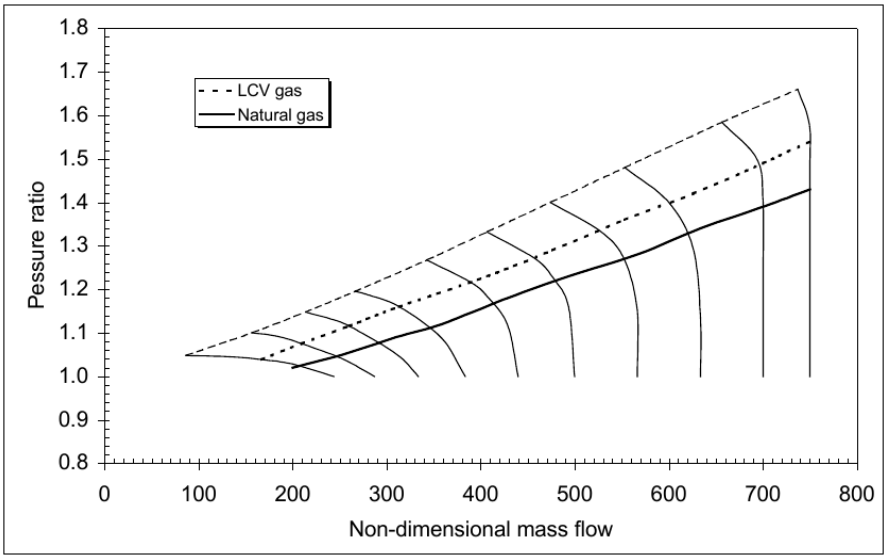


Figura 1 — Linhas de operação do compressor para gás de baixo PCI e gás natural. As curvas representam um caso específico e não devem ser interpretadas como mapa universal (Fig. 20, p. 52).

A compressão do combustível também importa. Um gás de menor PCI demanda maior vazão para a mesma potência térmica e, se for fornecido a pressão inferior à necessária no combustor, requer compressão antes da injeção. O trabalho do compressor de gás reduz a potência elétrica líquida e deve ser calculado com a pressão de fornecimento, a pressão no combustor, a composição do gás e a eficiência real do equipamento.

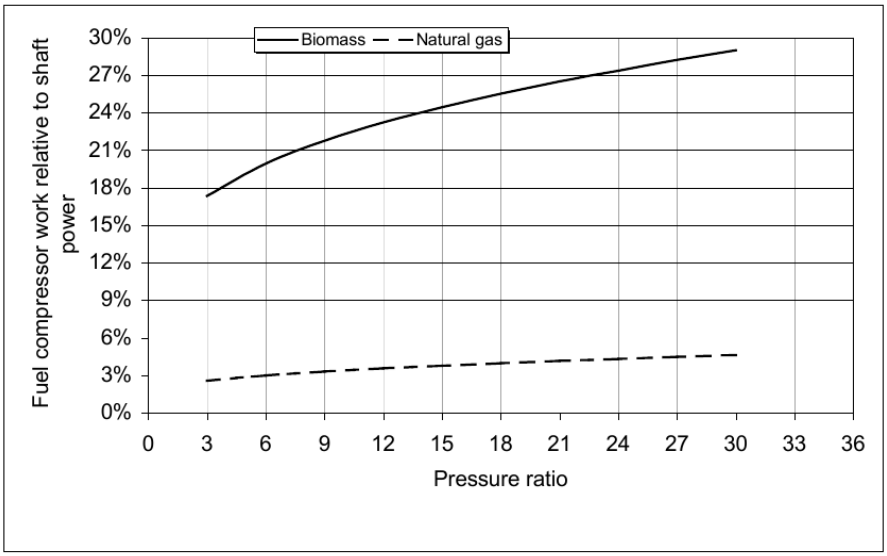


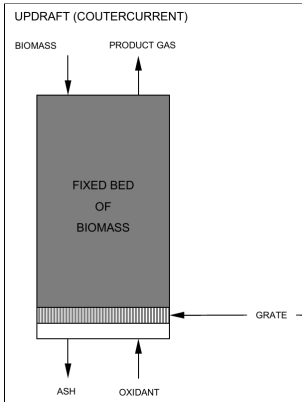
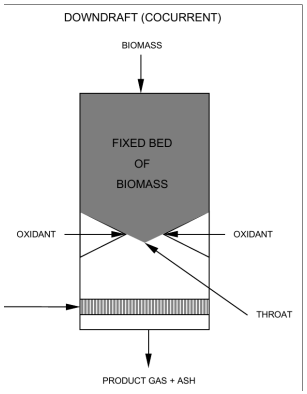
Figure 31 – Fuel compressor work for natural gas and gasified biomass

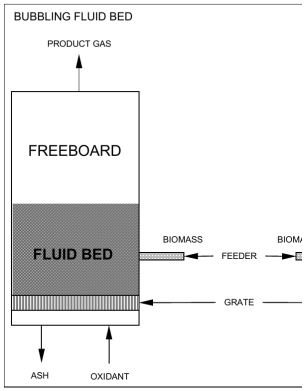
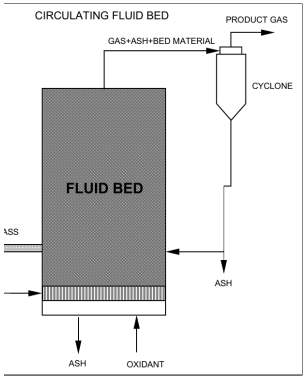
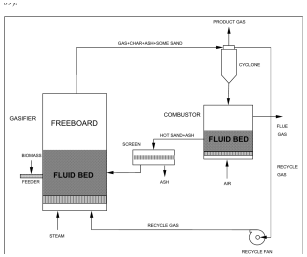
Figura 2 — Trabalho de compressão de combustível relativo à potência do eixo no caso estudado. A diferença entre os combustíveis depende das hipóteses adotadas (Fig. 31, p. 74).

Na simulação considerada, o trabalho de compressão do gás natural fica abaixo de cerca de 4% da potência de eixo em razões de pressão elevadas. Como o gás de biomassa pode exigir vazões de combustível muito maiores, a compressão pode representar uma parcela material do trabalho útil. Esse efeito depende da pressão de saída do gaseificador, da pressão de combustão, da composição e do rendimento do compressor; deve ser calculado para cada arranjo, sem extrapolar diretamente os valores da figura.

4. Tipos e comparação de gaseificadores

Os gaseificadores são agrupados em leito fixo e leito fluidizado. Os diagramas a seguir ilustram cinco configurações representativas. A comparação combina o princípio de operação com valores típicos para sistemas a ar.

Tipo e diagrama original	Princípio e temperaturas típicas	Gás bruto e escala típica	Vantagens típicas	Limitações para integração com turbina
 **Leito ascendente (updraft)**	Contracorrente: biomassa desce e gás sobe. Reação ≈1000 °C; saída ≈250 °C.	Alcatrão: muito alto; partículas: moderadas. Escala boa; ≈10 t/h; 1–10 MWe.	Construção simples e elevada eficiência térmica, com secagem e pré-aquecimento internos. Alcatrão e hidrocarbonetos elevam o PCI do gás bruto.	Para aplicação em turbinas, é necessário remover os alcatrão. Limpeza e perda de pressão devem entrar no balanço.
 **Leito descendente (downdraft)**	Co-corrente: biomassa e oxidante descem; garganta quente favorece craqueamento de alcatrão. Reação ≈1000 °C; saída ≈800 °C.	Alcatrão: muito baixos; partículas: moderadas. escalabilidade baixa; ≈0,5 t/h; 0,1–1 MWe.	Simples, confiável e capaz de produzir gás com baixo teor de alcatrão e particulados, em combustíveis adequados.	Exige biomassa relativamente seca (≈30% de umidade), cinzas <1% e faixa controlada de tamanho de partículas. O limite prático indicado é próximo de 500 kWe.

Tipo e diagrama original	Princípio e temperaturas típicas	Gás bruto e escala típica	Vantagens típicas	Limitações para integração com turbina
 **Leito fluidizado borbulhante**	Leito de sólidos inertes fluidizado por oxidante e/ou vapor; mistura e temperatura uniformes. Reação ≈850 °C; saída ≈800 °C.	Alcatrão: moderados; partículas: altas. Escala boa; ≈10 t/h; 1–20 MWe.	Transferência de calor e massa intensa, bom aproveitamento da umidade e conversão rápida. Em testes piloto, foi reportada conversão de carbono de 98%.	Carga de particulados no gás bruto é 1–2 ordens de grandeza acima de leitos fixos; sinterização/aglomeração pode causar perda de fluidização.
 **Leito fluidizado circulante**	Sólidos arrastados por alta velocidade são separados em ciclone e recirculados. Reação ≈850 °C; saída ≈850 °C.	Alcatrão: baixos; partículas: muito altas. Escala muito boa; ≈20 t/h; 2–100 MWe.	Recirculação de sólidos aumenta a conversão de carbono e permite capacidades maiores.	Alta carga de sólidos no gás exige separação robusta; ciclone, recirculação e limpeza introduzem perdas de pressão e exigências de controle.
 **Leito fluidizado duplo (twin bed)**	Um leito gaseifica a biomassa com calor transferido por areia; outro queima carvão e aquece a areia. Reação ≈800 °C; saída ≈700 °C.	Alcatrão: altos; partículas: altas. Escala boa; ≈10 t/h; 2–50 MWe.	Pode produzir, com ar, gás de maior poder calorífico que o leito único soprando ar, pois reduz a diluição direta por nitrogênio.	Dois leitos, circulação de sólidos e controle térmico aumentam a complexidade. Gás bruto ainda requer limpeza adequada à turbina.

Nota — Temperaturas, teores relativos de alcatrão e partículas, escalabilidade e capacidades são valores típicos históricos para operação soprada a ar. Servem como referências comparativas e não como garantias para um projeto específico. Os diagramas representam configurações esquemáticas de gaseificadores.

5. Limpeza, pressão de fornecimento e integração com a turbina

A limpeza do gás deve proteger os injetores, as superfícies quentes e os sistemas de controle sem impor perdas excessivas de pressão ou de energia. A sequência pode incluir separação de sólidos, remoção de alcatrão, resfriamento e compressão, ou limpeza a quente com retenção de calor sensível. A seleção precisa considerar temperatura, pressão, composição do gás e limites de contaminantes da turbina. Não há uma solução única: o sistema de limpeza está acoplado ao tipo de gaseificador e ao arranjo de fornecimento do combustível.

Em um sistema atmosférico, o gás frequentemente precisa ser limpo e depois comprimido para chegar ao combustor. Um gaseificador pressurizado pode reduzir ou eliminar parte do trabalho de compressão do combustível, mas torna a alimentação de sólidos e a manutenção do vaso pressurizado mais complexas. A compressão do gás também exige atenção à faixa de inflamabilidade e às propriedades reais da mistura, que podem diferir substancialmente do gás natural.

A câmara de combustão precisa distribuir uma vazão volumétrica maior e sustentar uma chama estável diante de variações de composição. O projeto de injetores, manifolds e controles deve levar em conta partida com combustível auxiliar, transição entre combustíveis, poder calorífico variável, limites de emissões e temperaturas locais. A compatibilidade deve ser demonstrada com dados de ensaio e requisitos do fabricante.

6. O que a comparação dos ciclos mostra

A Figura 28 compara NGGT, BIGGT e EFGT[1] em uma varredura de razão de pressão e temperatura de entrada da turbina. Sob as hipóteses e a fronteira adotadas no modelo, o BIGGT apresenta potência específica maior em parte do domínio, associada à maior vazão de produtos de combustão, mas eficiência térmica menor devido à penalização da gaseificação e da limpeza. Esses resultados expressam tendências do modelo considerado, não previsões de desempenho de equipamentos comerciais atuais.

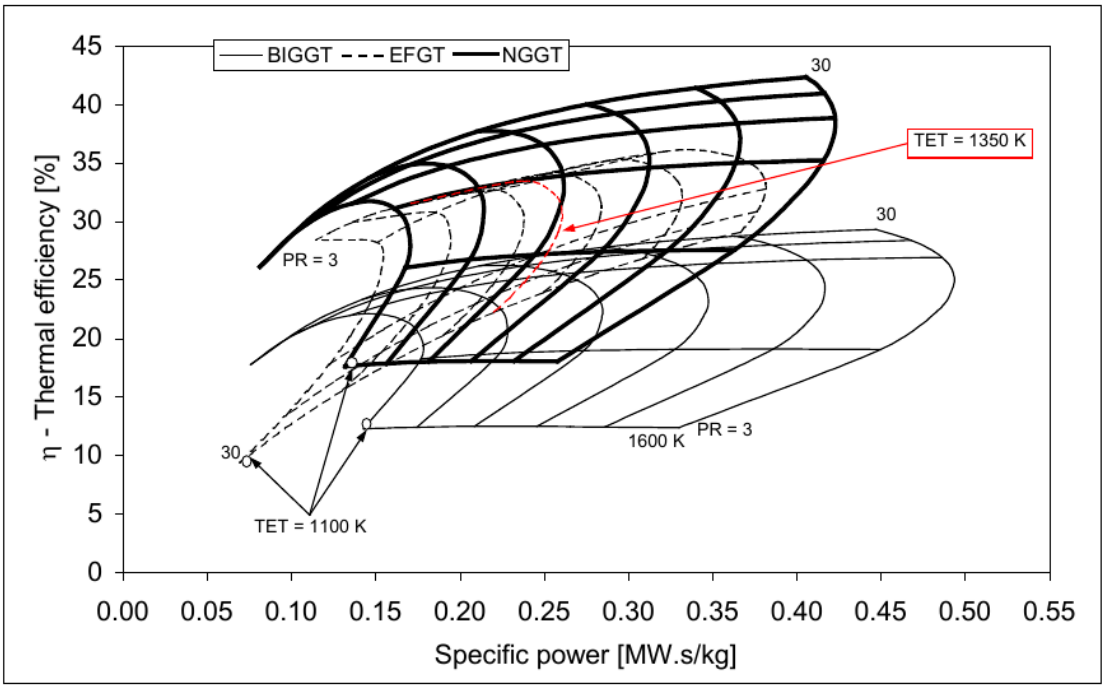


Figura 3 — Eficiência térmica e potência específica calculadas para NGGT, BIGGT e EFGT sob as hipóteses e os limites de temperatura considerados no estudo (Fig. 28, p. 70).

A figura não é uma previsão de desempenho de uma turbina comercial atual. Ela deve ser lida como comparação termodinâmica do conjunto de hipóteses empregado no estudo. Em um projeto, o balanço deve explicitar a fronteira da planta, a base de PCI, a umidade da biomassa, as perdas de pressão, os consumos de

[1] NGGT - Natural Gas fired Gas Turbine; BIGGT = Biomass Integrated Gasification Gas Turbine; EFGT = Externally Fired Gas Turbine.

gaseificação, limpeza e compressão, a temperatura de entrada na turbina e o eventual aproveitamento do calor de exaustão.

7. Síntese para a avaliação de projeto

- Caracterizar a biomassa e o gás produzido, incluindo composição, PCI, umidade, temperatura, pressão e variação temporal.
- Escolher o gaseificador considerando escala, qualidade de gás requerida e estratégia de limpeza, e não apenas conversão de carbono.
- Fechar os balanços de massa e energia desde a biomassa até a eletricidade líquida, incluindo secagem, gaseificação, limpeza e compressão.
- Verificar mapa do compressor, estabilidade da combustão, vazão de passagem da turbina, controle em carga parcial e transientes.
- Separar eficiência de gás frio, eficiência do bloco de potência e eficiência líquida da planta para evitar comparações com fronteiras diferentes.

Conclusão

A integração de gás de biomassa em turbinas a gás é condicionada por dois efeitos: o baixo PCI volumétrico requer maior vazão de combustível, e a conversão no gaseificador reduz a energia química transferida da biomassa para o gás. Neste balanço global, a eficiência do conjunto decorre do produto entre as eficiências de gaseificação e do ciclo da turbina; o trabalho útil deve incluir as tomadas de potência relevantes, como a compressão do gás. A escolha do gaseificador afeta a quantidade e a qualidade do combustível, enquanto a limpeza, a compressão e a combustão determinam a viabilidade da integração. A avaliação final deve usar balanços completos e dados específicos do combustível e do equipamento.

Referência

Tese de doutorado (2002). Thermoeconomic Analysis and Optimisation of Biomass Fuel Gas Turbines. School of Engineering, Cranfield University. Consultados: definição e perdas da gaseificação, pp. 46–47; tipos e características de gaseificadores, pp. 30–36; efeitos do gás de baixo poder calorífico, pp. 51–52; desempenho dos ciclos e compressão do combustível, pp. 69–74. Figuras 11–13, 20, 28 e 31 identificadas nas legendas.