

Turbinas a gás e combustíveis renováveis: desafios técnicos e econômicos na substituição de gás natural e diesel por biogás e gás derivado de biomassa

1. Introdução

As turbinas a gás são máquinas amplamente utilizadas na geração de eletricidade, no acionamento de compressores e até em sistemas de cogeração. Projetadas originalmente para operar com combustíveis de alto poder calorífico e alta pureza, como o gás natural e o óleo diesel, esses equipamentos se destacam pela eficiência e confiabilidade.

No entanto, com o aumento da busca por fontes renováveis e de baixo carbono, surge o interesse em utilizar combustíveis alternativos, como o biogás (proveniente de digestão anaeróbia de resíduos orgânicos) e o gás de biomassa gaseificada (produzido pela queima controlada de madeira, palha ou cascas de arroz, por exemplo). Embora promissores do ponto de vista ambiental, esses gases impõem desafios técnicos e econômicos.

Vamos explicar, de forma acessível, quais são esses desafios; menor poder calorífico, impurezas como o alcatrão e aumento dos custos de equipamentos; e como eles afetam a viabilidade de projetos com turbinas movidas a combustíveis renováveis.

2. O princípio de funcionamento da turbina a gás (para leigos e técnicos)

Antes de discutir os problemas, é útil recordar como opera uma turbina a gás.

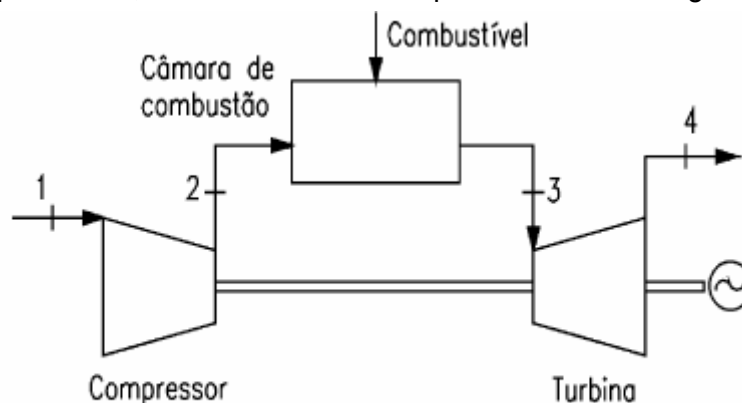


Figura 1. Diagrama simplificado de uma turbina a gás: compressor, câmara de combustão e turbina.

O ar é aspirado e comprimido em alta pressão (compressor). Em seguida, ele entra na câmara de combustão, onde o combustível é injetado e queimado. Os gases resultantes, muito quentes e em expansão, passam pela turbina, fazendo-a girar. Essa rotação aciona tanto o compressor quanto um gerador (ou outra carga mecânica).

Para que o processo seja estável, a chama deve se manter acesa e a temperatura dos gases deve estar dentro de limites projetados. O combustível ideal tem:

- **Alto poder calorífico (quantidade de energia por m³ ou por kg):** para que pequenas vazões gerem muita potência.
- **Baixo teor de impurezas:** para não danificar pás, bicos injetores ou o sistema de exaustão, que trabalham em temperaturas e pressões muito altas.

Gás natural e diesel atendem perfeitamente a esses requisitos. Biogás e gás de biomassa, não.

3. O problema do baixo poder calorífico: maior vazão e riscos operacionais

O biogás típico contém 50–70% de metano (CH₄) e o restante de CO₂, além de traços de H₂S e água. Seu poder calorífico inferior (PCI) varia entre 18 e 25 MJ/m³, contra aproximadamente 35–40 MJ/m³ do gás natural. Já o gás de gaseificação de biomassa pode ter PCI ainda mais baixo (4–10 MJ/m³), devido à presença de nitrogênio e CO₂.

Como consequência prática, para gerar a mesma energia, é necessário injetar um volume muito maior de combustível na câmara de combustão.

Implicações técnicas:

1. **Redimensionamento dos bicos injetores:** Os injetores originais podem não comportar a vazão extra, exigindo projeto específico.
2. **Alteração da relação ar-combustível:** Com mais combustível gasoso, a chama pode se tornar mais longa ou até sair da zona de combustão, causando *flameout* (apagamento) ou danos por superaquecimento localizado.
3. **Queda de eficiência:** Parte da energia é gasta comprimindo o grande volume de combustível pobre, reduzindo a potência útil.
4. **Blow off do compressor:** Com a maior vazão de combustível, a turbina atinge o ponto crítico de escoamento (*choke*), causando uma contra pressão no compressor, acarretando seu surto (*surge*). Para se evitar estes fenômenos e os danos que eles causam, é necessário sangrar parte do ar comprimido, o que leva a ineficiências.

Exemplo numérico: Uma turbina de 5 MW que consome 0,2 m³/s de gás natural passaria a consumir cerca de 0,5 a 0,8 m³/s de biogás bruto. Isso exige dutos maiores, maior potência de compressão e modificações no sistema de controle.

4. Impurezas e a presença do alcatrão

Se o baixo poder calorífico é um problema de engenharia, as impurezas representam uma ameaça à integridade da turbina. No caso do gás de biomassa gaseificada, o alcatrão é, talvez, o vilão principal.

O que é alcatrão?

Alcatrão é uma mistura complexa de hidrocarbonetos pesados (naftaleno, fenol, benzeno, etc.) que se condensam em temperaturas abaixo de 300 a 400 °C. Na gaseificação, ele é produzido inevitavelmente e pode permanecer no gás se não for removido.

Por que o alcatrão é tão prejudicial?

- **Condensação em partes frias:** O gás combustível geralmente esfria ao ser comprimido ou ao passar por válvulas. O alcatrão condensa formando um líquido pegajoso que gruda nas pás da turbina, bicos injetores e dutos.
- **Depósitos sólidos:** Sob alta temperatura na câmara de combustão, o alcatrão pode polimerizar e formar crostas duras (semelhantes ao coque), que desequilibram as pás da turbina e reduzem a seção de passagem dos gases.
- **Corrosão e erosão:** Alguns compostos do alcatrão contêm enxofre ou cloro, que em alta temperatura atacam ligas metálicas.

Outras impurezas importantes

Contaminante	Origem comum	Efeito na turbina
Siloxanas (biogás)	Resíduos de cosméticos, detergentes	Depósitos de sílica (vidro) nas pás
H ₂ S (sulfeto de hidrogênio)	Decomposição anaeróbia de proteínas	Corrosão de metais, emissão de SO ₂
Partículas sólidas (poeira, carvão fino)	Gaseificação incompleta	Erosão das pás do compressor e turbina
Umidade	Processo de dessulfurização deficiente	Instabilidade de chama, redução do poder calorífico



Figura 2. Foto de uma pá de turbina danificada por deposição de particulado seguida de encharcamento de calor.

5. Custos e viabilidade

Já vimos que é tecnicamente possível usar biogás ou gás de biomassa em turbinas a gás. A seguir apresentamos uma análise dos custos envolvidos e seu impacto na viabilidade de um projeto desse tipo.

Custos adicionais típicos:

1. Sistema de limpeza do gás (upgrading)

- Remoção de alcatrão: scrubbers, filtros de leito móvel, craqueamento catalítico (pode custar de 30 a 50% do valor do gaseificador).
- Remoção de H₂S e siloxanas: adsorção em carvão ativado ou lavagem química.
- Compressão para atingir a pressão de injeção na turbina (geralmente 10 a 25 bar).

2. Modificação da câmara de combustão

- Substituição de bicos injetores por versões específicas para baixo PCI (pode exigir desenvolvimento sob medida, custo elevado).
- Possível adição de piloto de chama com gás natural ou diesel para garantir estabilidade.

3. Manutenção mais frequente

- Trocas de óleo lubrificante contaminado por alcatrão.
- Inspeção e limpeza das pás a cada 1.000 a 2.000 horas (contra 8.000 a 15.000 horas com gás natural).

4. Sobredimensionamento do conjunto

- Como a mesma turbina produz menos potência com combustível pobre, pode ser necessário adquirir uma turbina maior do que a que seria usada com gás natural, elevando o investimento inicial.

Caso ilustrativo (dados hipotéticos médios)

Item	Gás natural	Biogás purificado	Gás de gaseificação bruto
Custo da turbina (5 MW)	R\$ 8 milhões	R\$ 10 milhões (adaptações)	R\$ 12 milhões (adaptações + sistema limpeza intensivo)
Custo do combustível (R\$/MWh)	120	60 (resíduo gratuito, mas com custo de purificação)	30 (biomassa barata)
Custo de manutenção anual	R\$ 200 mil	R\$ 500 mil	R\$ 800 mil
Viabilidade (VPL 10 anos)	Alta	Média (depende de subsídio)	Baixa (raramente viável)

Observação: Para gás de gaseificação, muitas usinas optam por motores de combustão interna (tipo Otto ou Diesel) em vez de turbinas, pois os motores suportam melhor baixo PCI e impurezas, com menor custo de adaptação.

6. Soluções e tendências para tornar esses combustíveis viáveis

Apesar dos desafios, há avanços promissores:

6.1. Limpeza profunda do gás

- **Craqueamento catalítico do alcatrão:** usando catalisadores de níquel ou dolomita a altas temperaturas, converte alcatrão em gases leves (H_2 , CO , CH_4), aumentando o poder calorífico e eliminando o contaminante.
- **Lavadores de alta eficiência:** (Venturi, colunas de aspersão) que reduzem partículas e alcatrão a níveis abaixo de 5 mg/Nm^3 .

6.2. Turbinas especiais para baixo PCI

Alguns dos grandes fabricantes oferecem versões “Low BTU” de suas turbinas, com câmaras de combustão mais volumosas, bicos multi-injetores e sistemas de controle de chama adaptativos. O custo adicional é de 15 a 30% sobre a turbina padrão.

6.3. Co-combustão com gás natural

Injetar uma pequena fração de gás natural (10 a 30% da energia total) estabiliza a chama e permite usar biogás com menos purificação. É uma solução intermediária para reduzir emissões sem grandes investimentos.

6.4. Uso em microturbinas (30–500 kW)

Microturbinas são mais tolerantes a impurezas e operam com pressões menores devido às suas características construtivas. Vários protótipos comerciais já rodam com biogás de aterro sanitário sem tratamento além da dessulfurização básica.

7. Conclusão

Gerar eletricidade a partir de resíduos orgânicos usando turbinas a gás é tecnicamente possível, mas esbarra em três grandes obstáculos: o baixo poder calorífico (que exige maior vazão e modifica a dinâmica da combustão), a presença de contaminantes agressivos como o alcatrão (causador de deposição, corrosão e erosão) e os elevados custos de adaptação e manutenção.

Para o gás de gaseificação de biomassa, o alcatrão continua sendo o principal desafio tecnológico, exigindo sistemas de limpeza sofisticados e caros. Para o biogás, as siloxanas e H₂S são os problemas mais críticos, embora soluções de remoção já estejam bem estabelecidas no mercado.

Em termos de viabilidade econômica, projetos com turbinas e biogás são viáveis apenas em escala média (>3 MW) e com subsídios à energia renovável ou quando há necessidade de alta confiabilidade (ex.: hospitais, data centers). Já o gás de gaseificação raramente justifica o uso de turbinas, sendo preferível motores a pistão ou caldeiras seguidas de turbinas a vapor.

A transição energética exige inovação, mas também realismo. Saber quando uma turbina a gás é a solução certa ou não, é parte essencial do projeto de engenharia sustentável.

Referências (sugestões para leitura complementar)

- BASU, P. *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction*. Academic Press, 2018.
- BOYCE, M. P. *Gas Turbine Engineering Handbook*. 4ª ed., Elsevier, 2012.
- Capstone Turbine Corporation. “Microturbine Applications with Low-BTU Fuels”, white paper, 2020.
- Ferreira, S. B. *Thermoeconomic Analysis and Optimisation of Biomass Fuel Gas Turbines*. PhD Thesis, Cranfield University, 2002.
- SIMÕES, A. L. et al. “Techno-economic assessment of biogas upgrading for gas turbine power generation”, *Renewable Energy*, vol. 180, 2021, pp. 1140–1152.