



# IV SIMPÓSIO

do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica da UFMG  
1º e 2 de outubro de 2025

Realização: **PPGMEC**  
Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Mecânica  
Universidade Federal de Minas Gerais

Apoio: **CAPES** **CNPq**  
Conselho Nacional de Desenvolvimento  
Científico e Tecnológico

**FAPEMIG** **PRPG**  
PRÓ-REITORIA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO

## ANÁLISE EXERGoeCONÔMICA DE UM MOTOR GERADOR A BIOGÁS

Iara C. D. Duarte<sup>a</sup>, Diego H. S. Chaves<sup>a</sup>, Suzimara S. da Silva<sup>b</sup>, Esly F. Costa Junior<sup>a,b</sup>, Andréa O. S. Costa<sup>a,b</sup>

<sup>a</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGMEC), Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

<sup>b</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PPGEQ), Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

### PROBLEMA DE PESQUISA

O aproveitamento do biogás em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) por meio de sistemas de cogeração de calor e potência (CHP) representa uma alternativa para aumentar a autossuficiência energética e reduzir impactos ambientais (Duarte et al., 2025; Hervé et al., 2023). Nesses sistemas, o motor gerador converte o biogás em eletricidade, enquanto o calor dos gases de exaustão pode ser direcionado à secagem do lodo, promovendo o uso eficiente da energia. Este trabalho apresenta uma análise exergoeconômica de um motor gerador instalado em ETE, considerando o equipamento como unidade global de conversão, com foco na eletricidade gerada e no aproveitamento térmico dos gases de exaustão (GEs).

### HIPÓTESE

O uso do motor gerador em ETEs apresenta vantagens exergoeconômicas e sustentáveis ao combinar a geração de eletricidade com o aproveitamento térmico dos gases de exaustão, contribuindo para a valorização do biogás como fonte renovável.

### METODOLOGIA

A planta CHP estudada pertence a uma ETE situada na RMBH/MG e possui capacidade instalada para tratar uma vazão de 140,0 L/s de lodo de esgoto, atendendo a uma população de mais de 110 mil habitantes. A Figura 1 apresenta o fluxograma simplificado do processo de cogeração de calor e potência na ETE. O biogás proveniente da digestão anaeróbia do lodo é convertido em eletricidade por

meio de um motor gerador. O calor dos gases de exaustão é recuperado na secagem do lodo. Para esta análise, o motor gerador foi tratado como unidade global de conversão, avaliando o desempenho integrado do sistema.

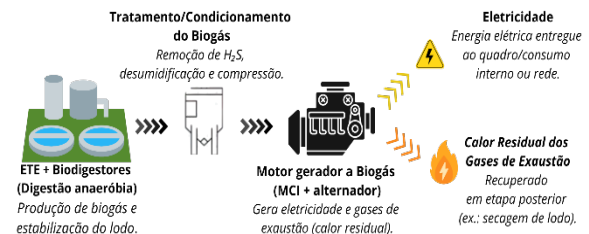


Figura 1. Fluxograma geral do sistema CHP da ETE.

Os balanços de massa e energia foram estabelecidos a partir de dados operacionais da planta, (Figura 2). O aproveitamento térmico foi estimado a partir da vazão e da temperatura dos gases de exaustão, assumindo combustão completa. Foi considerado ainda que o biogás se comporta como gás ideal e possui 67,5%v de metano (CH<sub>4</sub>), 24,1%v de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 6,7%v de nitrogênio (N<sub>2</sub>) e 1,7%v de oxigênio (O<sub>2</sub>), com poder calorífico inferior (PCI) de 24,23 MJ/Nm<sup>3</sup> (Vane, 2016).

A exergia física e química das correntes de entrada e saída foram calculadas com base em modelos termodinâmicos (Duarte et al., 2025). A avaliação exergoeconômica foi realizada pelo método SPECOC (*Specific Exergy Costing*), no qual cada fluxo de saída foi tratado como produto. Atribuíram-se custos unitários de exergia à eletricidade e à energia térmica recuperada, possibilitando quantificar a contribuição relativa de cada fluxo para o desempenho global do sistema (Duarte et al., 2025). O balanço

exergeoeconômico do componente pode ser dado pela Equação (1).

$$c_f \dot{E}_{biogás} + \dot{Z}_{motor} = c_p (\dot{W}_{ele} + \dot{E}_{gex}) \quad (1)$$

em que  $c_f$  é o custo exerético do biogás, adotado neste trabalho como 0,019 US\$/kWh (Vane, 2016),  $\dot{Z}_{motor}$  é taxa de custo de investimento, operação e manutenção (O&M), valor adotado de 79,79 US\$/h. O custo de investimento foi calculado de acordo com Vane (2016), sendo que seu valor foi corrigido para o ano 2022 de acordo com Índice de Custos de Instalações de Engenharia Química (Tabriz et al., 2023). A taxa de custo associada a O&M foi definida segundo a metodologia e os indicadores propostos por Tabriz et al. (2023), considerando 720 h/ano de operação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 2 apresenta o balanço de energia do motor gerador a biogás, evidenciando os fluxos de entrada e saída do sistema. É possível visualizar a distribuição da energia entre potência elétrica útil, calor contido nos gases de exaustão e perdas térmicas, servindo como base para a análise dos resultados.

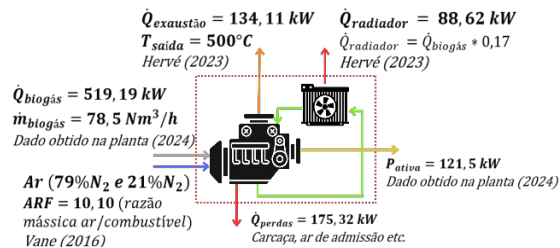


Figura 2. Balanço energético do conjunto motor gerador estudado.

A Tabela 1 apresenta o balanço exerético do motor gerador, evidenciando que, apesar da alta exergia do biogás, apenas parte é convertida em eletricidade. Grande parcela é destruída no processo, enquanto o calor dos gases de exaustão surge como importante oportunidade de recuperação energética.

Tabela 1. Balanço exerético do motor gerador.

$\dot{E}_{Biogás}$	Exergia do fluxo do biogás (kW)	546,5
$\dot{E}_{gex}$	Exergia do fluxo dos gases (kW)	77,42
$\dot{W}_{ele}$	Potência elétrica ativa (kW)	121,5
$\dot{E}_{XL}$	Exergia transferida (carcaça, ...) (kW)	39,05
$\dot{E}_{XD}$	Exergia destruída (kW)	308,5

A Tabela 2 complementa essa análise ao evidenciar o impacto da recuperação térmica sobre o desempenho exergeoeconômico do sistema. Verifica-se que a eficiência exerética é ampliada e o custo unitário da eletricidade é reduzido. A diferença relativa dos custos entre os cenários com

aproveitamento (cenário 1) e sem aproveitamento energético dos gases de exaustão (cenário 2), reforça a relevância do aproveitamento dos GEs para a competitividade do sistema CHP.

Tabela 2. Resultados da análise exergeoeconômica para os dois cenários avaliados.

Indicadores	Cenário 1	Cenário 2
Eficiência exerética (n)	36%	22%
Custo unitário produto (US\$/kWh)	0,45	0,74
Custo eletricidade (US\$/h)	55,03	90,1
Custo calor GE (US\$/h)	35,05	-
Fator exergeoeconômico	0,93	0,93
Diferença relativa dos custos	22,04	38,03

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados indicaram que o motor gerador a biogás possui bom potencial de conversão da exergia do combustível, ainda que acompanhado por significativa destruição de exergia. Observou-se que o aproveitamento do calor contido nos gases de exaustão é importante para elevar a eficiência exerética global. Além disso, a recuperação térmica contribuiu para reduzir o custo unitário da eletricidade ao redistribuir os custos do combustível e do investimento entre múltiplos produtos. Assim, o aproveitamento térmico mostrou-se importante não apenas para o desempenho exergeoeconômico, mas também para a valorização energética do biogás e, conseqüentemente, para a sustentabilidade do sistema de cogeração em ETes.

## REFERÊNCIAS

- Duarte I. C. D., Chaves D. H. S., Silva S. R., Costa Junior E. F., and Costa A.O.S., 2025, Sustainability of energy recovery from by-products in wastewater treatment: a thermo-economic and environmental review, *Biofuels*.
- Hervé P. L., Michael T. T., Salomon N. E. P., Joseph K., Raphael M. K., and Jean N., 2023, Energy and exergy analyses of CCHP system based on co-firing of biogas and syngas produced from biomass, *Heliyon*, Vol. 9, No. 11, e21753.
- Tabriz Z. H., Mohammadpourfard M., Akkurt G. G., Heris, S. Z., 2023, Energy, exergeoeconomic, and exergeoenvironmental analysis of a new bio-waste driven multigeneration system for power, heating, hydrogen, and freshwater: modeling and case study in Izmir, *Energy Conversion and Management*, Vol. 288.
- Vane L. F., 2016, Aplicação do Método Diagrama Funcional Termoeconômico para Otimização da Operação de um Motor gerador a Biogás: Incorporação da Eficiência Ecológica na Otimização, Tese de Doutorado, PPGEM/UNESP.