

## ESTUDO DO RENDIMENTO ENERGÉTICO DE MÁQUINAS TÉRMICAS ALIMENTADAS POR BIOGÁS GERADO POR UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO ESGOTO

**Diego Rangel dos Santos (diegorangel.eng@gmail.com)**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica

**Jean Ribeiro de Souza Fernandes (jeanribeiro.engmec@gmail.com)**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica

**Luca Nahuel Bahamondez Zucoloto (lucanahuel@hotmail.com)**

Aluno de graduação do curso de Engenharia Mecânica

**Vital Pereira Batista Junior (vital@fsjb.edu.br)**

Professor do curso de Engenharia Mecânica da FAACZ

### RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido para verificar o rendimento energético de três máquinas térmicas teóricas, sendo uma microturbina, um grupo motor gerador e um ciclo Rankine Orgânico (ORC), todas alimentadas por biogás oriundo de uma estação de tratamento de esgoto. A metodologia adotada para este trabalho constitui-se em três passos, que são avaliar a quantidade de biogás que é produzido com a vazão diária de esgoto, analisar as máquinas térmicas que se encaixam no projeto através da sua vazão, e por último calcular o rendimento energético e exergético de cada máquina térmica com o auxílio de balanços de massa, balanços de energia e balanços de exergia. Dando procedência aos passos da metodologia, obteve-se a vazão de biogás produzido com o esgoto da estação de 122,26 m<sup>3</sup>/dia de biogás, tendo uma concentração de 65% de metano na composição de biogás, no segundo passo foi encontrado os rendimentos de cada máquina sendo que no ciclo ORC encontrou-se 15,4% de rendimento energético e de exergético encontrou-se 8,3%, já no Grupo Gerador encontrou o rendimento energético de 31,8% e exergético de 50,1%, já nas microturbinas encontrou 23,6% de rendimento energético e exergético encontrou 44,3%.

**PALAVRAS-CHAVE:** Microturbina. ORC. Motor Gerador. Biogás

### 1 – INTRODUÇÃO

O município de Aracruz, localizado na região norte do estado do Espírito Santo, possui pouco mais de 98 mil habitantes, sendo que 75% de seu território está coberto por rede coletora de esgoto, entretanto apenas 13% recebe tratamento. Em relação à água, 98,5% de todo o município tem cobertura de água tratada e 82% de todo o esgoto vai para os rios e praias (PREFEITURA DE ARACRUZ, 2018).

O presente trabalho visa verificar a hipótese de instalação de uma máquina térmica alimentada com o biogás gerado pela própria ETE, verificando o rendimento energético e exergético através do ciclo termodinâmico de uma microturbina, um grupo motor gerador e uma máquina do ciclo Rankine orgânico. A ETE selecionada para este estudo está localizada no município de Aracruz-ES, essa ETE possui um reator anaeróbio de fluxo ascendente (RAFA), onde o biogás oriundo do processo não possui nenhum aproveitamento energético, assim todo biogás gerado é direcionado para uma câmara acoplada a um queimador, onde ocorre a queima e o lançamento na atmosfera (COUTINHO et al., 2014).

### 2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA OU REFERENCIAL TEÓRICO

Pecora (2006), explica que, encontrou uma produção de biogás de 5,27 m<sup>3</sup>/dia, pelo fato de que sua vazão de biomassa foi de 71,7 m<sup>3</sup>/dia, essa diferença significativa foi devido ao fato de que Pecora analisou uma ETE com baixa vazão de biomassa. No presente trabalho teve uma análise de três máquinas térmicas sendo a primeira uma microturbina, a segunda um grupo gerador e a terceira um Ciclo ORC.

Nas microturbinas, Nascimento (2014) e Guerra (2017) dizem que a eficiência energética média de uma microturbina é de 17% e que pode chegar a 30% com aplicação de um regenerador ao processo, o valor encontrado de 23,6% encontra-se dentro desse intervalo, visto que a eficiência isentrópica considerada do compressor e da turbina de 85%.

No grupo gerador Coldebella (2006) afirma que o rendimento energético de conversão em energia elétrica dos grupos motores geradores pode variar entre 25% e 38% em relação à energia inicial presente no biogás, e também afirma que o rendimento exergético está entre 48% a 52,4%.

No Ciclo ORC, Meibak (2017) afirma que com uma vazão mássica de 1852 kg/h de biomassa conseguiu-se produzir 10 GWh por ano, onde o fluido escolhido influenciou diretamente no resultado. O fluido R245fa pode ser trabalhado em temperaturas que trazem fatores positivos, como um alto rendimento para o processo e também pela capacidade de trabalho com recuperação de calor industrial.

### 3 – METODOLOGIA DO TRABALHO OU DESENVOLVIMENTO

Primeiramente é necessário verificar a quantidade de biogás que é obtido no esgoto, para isso foi utilizada a equação 1 baseada nos estudos de Pecora (2006):

$$PB = \frac{V_{ef} \times DQO_e \times Y}{C_{CH_4}} \quad (1)$$

Onde:

$PB$  = Produção de biogás ( $m^3$ /dia);

$V_{ef}$  = Vazão de biomassa através da biodigestão anaeróbica ( $m^3$ /dia);

$DQO_e$  = Valor médio da demanda química de oxigênio (DQO);

$Y$  = Produção de metano por kg de DQO;

$C_{CH_4}$  = Concentração de metano no biogás.

Com a produção de biogás é possível indicar os tipos de máquinas térmicas para a geração de energia.

O segundo passo a ser executado é fazer um balanço de energia. O balanço da taxa de energia é representado pela Equação 2, verificando a energia específica dos fluxos de entrada e saída do volume de controle.

$$\frac{dEv.c}{dt} = Qv.c - Wv.c + \sum \dot{m}e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) - \sum \dot{m}s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \quad (2)$$

Onde:

$\frac{dEv.c}{dt}$  = Taxa de variação de energia de um volume de controle (kW);

$Qv.c$  = Taxa de transferência de calor para um volume de controle (kW);

$Wv.c$  = Taxa de realização de trabalho sobre um volume de controle (kW);

$\dot{m}e$  = Vazão mássica de entrada (kg/s);

$\dot{m}s$  = Vazão mássica de saída (kg/s);

$h_e$  = Entalpia de entrada (kJ/kg);

$h_s$  = Entalpia de saída (kJ/kg).

$V_e^2$  = Velocidade de entrada;

$g$  = Gravidade;  
 $z_s$  = Altura de entrada;  
 $V_s^2$  = Velocidade de saída;  
 $z_s$  = Altura de saída.

Com a Equação 2 é possível calcular grandezas como energia térmica adicionada e retirada ao fluido de trabalho, trabalho adicionado ou realizado no sistema, taxa de massa que flui pelo sistema e entalpias de entrada e de saída em cada volume de controle (PAZ, 2002).

O próximo passo a ser descrito é fazer um balanço exerético. O balanço de exergia sob a forma de taxa para um volume de controle é definido pela Equação 3 (VAN WYLEN et al., 2003):

$$\frac{dEv.c}{dt} = \sum \left(1 - \frac{T_o}{T_j}\right) Q_j - \left(W_{v.c.} - P_o \frac{dV_{v.c.}}{dt}\right) + \sum \dot{m}_e . e_{fe} - \sum \dot{m}_s . e_{fs} - Ed \quad (3)$$

Onde:

$T_j$  = Temperatura em um volume de controle ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $Q_j$  = Taxa de calor em um volume de controle (kW);  
 $P_o$  = Pressão inicial (bar);  
 $\frac{dV_{v.c.}}{dt}$  = Derivada do volume de controle ( $\text{m}^3$ );  
 $e_{fe}$  = Exergia de fluxo na entrada;  
 $e_{fs}$  = Exergia de fluxo na saída;  
 $Ed$  = Exergia destruída durante um processo termodinâmico.

A exergia destruída é proporcional à entropia gerada, sendo sempre positiva para processos reais, igual a zero para processos reversíveis e impossível para quantidade negativa, conforme o teorema de Gouy-Stodola.

Para finalizar o projeto e alcançar o maior objetivo proposto fez-se necessário o cálculo do rendimento energético e do rendimento exerético. O rendimento energético de um processo pode ser medido em termos da primeira lei da termodinâmica, que diz que a eficiência é a razão entre produto e o insumo ou recurso do processo (MORAN; SHAPIRO, 2009).

$$\eta = \frac{W_{liq}}{Q_{abs}} \quad (4)$$

Onde:

$\eta$  = rendimento energético;  
 $W_{liq}$  = Taxa de trabalho líquido do ciclo;  
 $Q_{abs}$  = Calor Adicionado.

Com a equação de rendimento é possível ter conhecimento do desempenho de equipamentos, onde simulações de ciclos de potência a vapor podem ser feitas a fim de encontrar uma melhor combinação dos elementos dos ciclos e descobrir um arranjo que proporcione o melhor desempenho.

Já o rendimento exerético determina as perdas e rejeitos em termos de sua localidade, tipo e valores, para com isso maximizar o uso eficiente da energia fornecida. Podendo identificar possíveis pontos de melhorias e analisando a eficácia das medidas de engenharia adotadas como melhoria, comparando os valores antes e depois das modificações (MORAN; SHAPIRO, 2009).

De acordo com Fonseca (2003), a rendimento exerético ( $\eta_{ex}$ ) é a razão entre o produto e o combustível, e pode ser escrita conforme a Equação 5.

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Produto}}{\text{Insumo}} \quad (5)$$

Este rendimento mostra a porcentagem de exergia de combustível adicionada ao sistema que é transformada em exergia de produto.

A partir dessas informações, é possível realizar um estudo detalhado da microturbina, do grupo motor gerador e do ciclo ORC, bem como seus respectivos componentes para verificar os resultados e alcançar os objetivos propostos nesse estudo.

#### 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES OU ANÁLISE DOS DADOS

Para uma vazão de biomassa de 978,05 m<sup>3</sup>/dia, com uma DQO de 0,325 kg DQO/m<sup>3</sup>, e com uma concentração de 65% de metano, obteve-se uma produção de biogás de 122,26 m<sup>3</sup>/dia, Já Pecora (2006), encontrou uma produção de biogás de 5,27 m<sup>3</sup>/dia, pelo fato de que sua vazão de biomassa foi de 71,7 m<sup>3</sup>/dia, essa diferença significativa foi devido ao fato de que Pecora analisou uma ETE com baixa vazão de biomassa.

Analisando a microturbina descobriu-se que o rendimento energético da microturbina é 23,6%. Nascimento (2014) e Guerra (2017) afirmam que o rendimento energético da microturbina é na faixa de 17 a 30%, com isso o valor encontrado, é válido devido ao fato de se está dentro do intervalo. Já o rendimento exergético foi de 44,3%. Guerra (2017) menciona que a rendimento exergético da microturbina é na faixa de 43 a 45%, dessa forma o valor que foi encontrado se faz valido, devido ao fato de estar dentro do intervalo.

Analisando o Grupo Gerador encontrou-se que o rendimento energético do grupo gerador é de 31,8%, Coldebella (2006) afirma que o rendimento energético de conversão em energia elétrica dos grupos motores geradores pode variar entre 25% e 38% em relação à energia inicial presente no biogás, como o rendimento energético encontrado é 31,8%, logo se encontra dentro do intervalo esperado e seu rendimento exergético é de 50,1%.

Analisando o Ciclo ORC encontrou-se que seu rendimento exergético é de 8,3% e seu rendimento energético o é de 15,4%. Segundo Carlão (2006) e Turboden (2018) o rendimento energético do ciclo ORC está na faixa de 12 a 19%, sendo o valor encontrado é de 15,4% estando dentro do intervalo.

#### 5 – CONCLUSÃO OU CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho procurou avaliar o comportamento de uma microturbina, um grupo motor gerador e um ciclo ORC trabalhando com o biogás, visando verificar a máquina térmica que apresenta o melhor rendimento energético e exergético. Para isso, foi realizado um estudo mais criterioso em cada componente dessas três máquinas.

Ao analisar o resultado das três máquinas térmicas percebe-se que a caldeira ou câmara de combustão apresenta o maior valor de destruição de exergia. Acrescentando também, o fato das turbinas nos três processos apresentarem as maiores eficiências exergéticas.

A vazão de biogás gerada pela estação de tratamento de esgoto é de 122,26 m<sup>3</sup>/dia, contendo 65% de metano em sua composição. Encontrou-se no ciclo ORC o valor de 15,4% de rendimento energético, 8,3% de rendimento exergético e 22,0 kW de trabalho na turbina. No grupo motor gerador encontrou-se o rendimento energético de 31,8%, rendimento exergético de 50,2% e trabalho na expansão de 331,8 kW. Finalmente, na microturbina, encontrou-se 23,6% de rendimento energético, 44,3% de rendimento exergético e 117,2 kW de trabalho na turbina.

Assim, conclui-se que o grupo gerador é mais eficaz, devido ao fato de ter rendimentos maiores, maior trabalho na expansão e ter um custo três vezes menor que o da microturbina.

## 6 – REFERÊNCIAS

1. COLDEBELLA, A. **Viabilidade do uso do biogás da bovinocultura e suinocultura para geração de energia elétrica e irrigação em propriedades rurais**. 2006. 58 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2006.
2. COUTINHO, G. L.; BENTO, P. S. N.; CAMPAGNARO, R. S. **Sistema de aproveitamento de biogás para geração de energia elétrica**. 2014. 59 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Curso de Engenharia Mecânica) - Faculdades Integradas de Aracruz, Aracruz. 2014.
3. Fonseca, J. G. S. **Análise Energética de um Ciclo Rankine com Aquecimento Distrital: Estudo de uma Planta Termelétrica**. 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2003.
4. GUERRA, F. C. **Análise de uma microturbina operada com biogás**. 2017. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.
5. MEIBAK, T. T. P. **Análise de um ciclo Rankine orgânico empregando pentano como fluido de trabalho e resíduos agrícolas como insumo energético**. 2017. 103 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2017. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10023629.pdf>>. Acesso em: 29 nov. 2018.
6. MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
7. NASCIMENTO, M. A. R.; RODRIGUES, L. O.; DOS SANTOS, E. C. **Micro Gas Turbine: A Review**. 2014.
8. PAZ, A. E. C. **Simulação de sistemas térmicos de potência para a geração de energia elétrica**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.
9. PECORA, V. **Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP** - Estudo de caso. 2006. 152 f. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
10. PREFEITURA DE ARACRUZ. **Saneamento básico: saiba mais do que se trata**. 2016. Disponível em: <<http://aracruz.es.gov.br/noticia/6841/>>. Acesso em: 25 mar. 2019.
11. VAN WYLEN, G. J.; BORGNACKE, C.; SONNTAG, R. E. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução 6.ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2003.