

Análise da Eficiência Termodinâmica de um Sistema de Microgeração em Refrigeração com Motor de Combustão

José Douglas A. de Lira¹, Marques, A. S.², Carlos Antônio C. dos Santos.¹

¹ Universidade Federal da Paraíba, departamento de engenharia mecânica, LES laboratório de energia solar
João Pessoa, Paraíba, Brasil, 58.051-970

² Universidade Federal Rural de Pernambuco, departamento de engenharia mecânica, termofluidos
Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco, Brasil, 54.518-430
José Douglas A. de Lira, jdouglira@gmail.com

Resumo

No Brasil, a maior parte dos recursos energéticos são obtidas através de usinas hidrelétricas que, em geral, localizam-se distantes dos grandes centros consumidores, sendo, muitas vezes, necessário sistemas de transmissão extensos e que não atendem por completo todas as regiões, aumentando as tarifas de energia para o consumidor. Os sistemas de cogeração surgem como importante alternativa para o cenário energético, já que possuem grande relevância na questão ambiental, devido ao aproveitamento da energia útil, evitando consumo de combustível adicional, colaborando para redução dos níveis de emissões evaporativas. Os sistemas de cogeração podem ser utilizados para diferentes propósitos, apresentando diversas vantagens como por exemplo: aumento na eficiência energética do sistema, redução dos custos monetários e das emissões dos gases responsáveis por danos ambientais. Neste trabalho, uma unidade de cogeração é analisada termodinamicamente. Tal unidade é composta por um motor de combustão do ciclo Diesel de 10 hp de potência que aciona um sistema de refrigeração por compressão de vapor a partir do seu compressor que é aberto. A unidade também aquece água, pelo aproveitamento do calor dos produtos de combustão do motor, a uma vazão de 0,07 l/s. As análises termodinâmicas resultam em um aumento da eficiência da unidade, operando em cogeração, de aproximadamente 25%.

Palavras-chave: microgeração, refrigeração, motor de combustão, eficiência.

Introdução

A cogeração consiste em um sistema integrado que tem a capacidade de produzir dois ou mais produtos a partir de uma mesma fonte de energia (Moran, 2013). A exemplo da potência de eixo para acionar um gerador elétrico e calor para aquecimento de água de processo.

A cogeração surge como um programa de uso racional de energia oferecendo uma economia da ordem de 15% a 40% se comparada ao uso de energia elétrica isoladamente (COGEN, 2018).

A cogeração proporciona um aumento da eficiência energética com a diminuição das emissões de poluentes, custos com energia e tornando assim mais competitivos setores industriais, comerciais, e bem como reduzindo o custo de aquisição de energia pelas residenciais. (COGEN, 2018)

Os sistemas de cogeração podem ser aplicados em diversos segmentos, como por exemplo: setor sucroalcooleiro, shoppings centers, hospitais, dentre outros (Barbeli, 2015).

O Ciclo de refrigeração é um sistema térmico que transfere energia em forma de calor de uma região de menor potencial energético para uma região com maior potencial energético, sendo necessário uma fonte de energia externa (Borgnakke, 2009).

Em um sistema por compressão de vapor, o fluido refrigerante passa continuamente pelos seguintes componentes: compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador como apresentado na figura 1. É

comum considerar que um sistema dessa natureza opere em regime permanente, desprezando as variações de energia cinética e potencial durante a análise da 1ª lei da termodinâmica em cada componente (Çengel, 2009).

Com o propósito de aproveitar parte do calor gerado pelos gases da combustão de um motor diesel com 10hp de potência, utilizado no acionamento do compressor (tipo aberto) de um sistema de refrigeração por compressão vapor, foi implementado um sistema de microgeração. Através dos gases da combustão foi possível aquecer uma vazão de água de 0,07 l/s de água.

Portanto, o estudo tem como objetivo quantificar o aumento da eficiência energética da unidade de refrigeração ao aproveitar calor dos gases da combustão no sistema de microgeração.

Na produção da energia elétrica gerada a partir de combustíveis, a cogeração tem um papel de suma importância uma vez que, é uma energia limpa, há uma diminuição das emissões dos poluentes, barata por reaproveitar o calor proveniente dos combustíveis e também pelo baixo impacto ambiental.

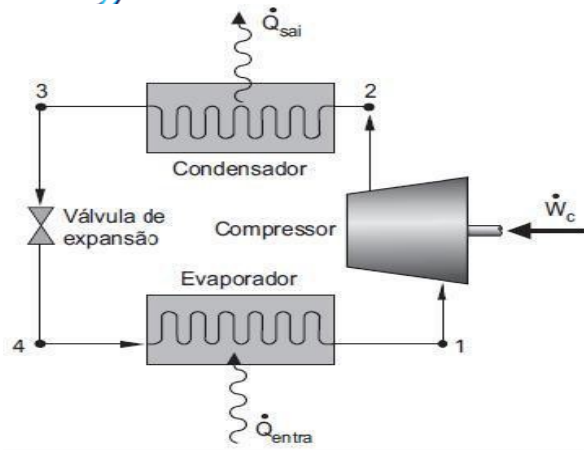


Figura 1: Ciclo de refrigeração por compressão de vapor (Moran).

Análise Energética da Unidade

A figura 2 mostra o motor diesel de 10 hp que é responsável pelo acionamento do compressor apresentado na figura 3. O calor gerado através dos gases da combustão é reaproveitado para aquecer água à uma vazão de 0,07 l/s no trocador de calor do tipo tubo duplo apresentado na figura 4.

O estudo é realizado considerando as seguintes hipóteses simplificadoras para o ciclo de refrigeração por compressão de vapor:

1. Cada componente do ciclo é analisado como volume de controle em regime permanente;
2. Todos os processos são internamente reversíveis, exceto o estrangulamento na válvula de expansão;
3. Efeitos das energias cinéticas e potenciais são desprezíveis;
4. Compressor e válvula operam de forma adiabática;
5. Vapor saturado entra no compressor, líquido saturado sai no condensador.

A seguinte análise é válida para qualquer um dos fluidos.

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ \right)_e - \sum \dot{m}_s \left(h + \frac{v^2}{2} + gZ \right)_s \quad (1)$$

Em todos os pontos do percurso dos fluidos, a vazão mássica é a mesma e as propriedades termodinâmicas não se alteram com o tempo (Bejan, 1997). Assim, a equação para o trocador de calor resume-se a:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h \quad (2)$$

Podendo ser reescrita com relação ao poder calorífico inferior de uma substância conhecida:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times PCI \quad (3)$$

A eficiência pela primeira lei da termodinâmica é determinada por:

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{out}}{\dot{Q}_{in}} \quad (4)$$

Análise Exergética da Unidade

O fluxo de exergia total associado a um estado termodinâmico, é a soma da contribuição da exergia termomecânica e química (Potter, 2016). Portanto:

$$e^{tm} = h - h_0 - T_0(s - s_0) + \frac{v^2}{2} + gZ \quad (5)$$

$$e^{ch} = \left(\sum \bar{g}_r - \sum \bar{g}_p \right) (T_0, P_0) + \bar{R} T_0 \sum n_i \ln \left(\frac{y_i}{y_i^e} \right) \quad (6)$$

$$e^T = e^{tm} + e^{ch} \quad (7)$$

A variação líquida de exergia de fluxo entre a entrada e a saída para o escoamento de água no trocador de calor é obtida por:

$$e_{tc} = h_{sai} - h_{ent} - T_0(s_{sai} - s_{ent}) \quad (8)$$

A taxa de exergia e a eficiência exergética são determinadas, respectivamente, por:

$$\dot{E} = e \times \dot{m} \quad (9)$$

$$\epsilon = \frac{\dot{E}_{out}}{\dot{E}_{in}} \quad (10)$$



Figura 2: Motor Diesel de 10 HP.



Figura 3: Compressor aberto

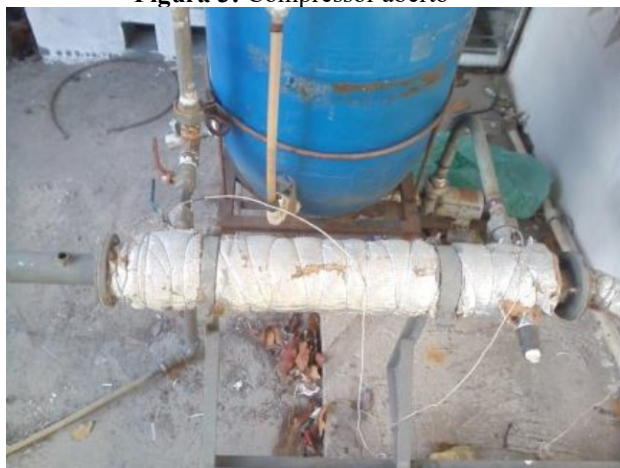


Figura 4: Trocador de calor tubo duplo.

A figura 5 mostra o modelo esquemático do sistema em estudo que consiste de um motor diesel com potência de 10hp, fornecendo potência de eixo para um compressor do tipo aberto operando em um sistema de refrigeração por compressão a vapor com o gás refrigerante R-22 a 751,59 kPa. O trocador de calor de tubo duplo operava com uma vazão de água de 0,07 l/s a pressão de 1 bar e a água aquecida foi acondicionada em um reservatório. Foi medido a temperatura da água na entrada e na saída do trocador de calor.

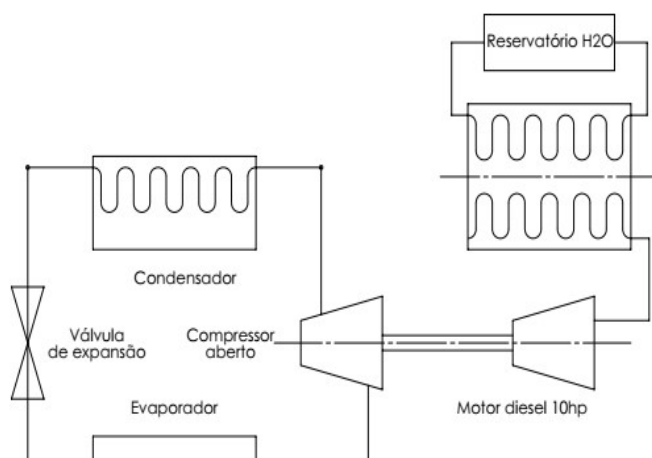


Figura 5: Modelo esquemático do sistema de microgeração.

Resultados

A partir da vazão de combustível, determinada experimentalmente ($\dot{m}_{comb} = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$) e do Poder Calorífico Inferior encontrado em Moran (2013) ($PCI_{(C_{12}H_{26})} = 44143,18 \text{ kJ/kg}$), a taxa de energia gerada pela combustão no motor diesel é de:

$$\dot{Q}_{comb} = 19,423 \frac{\text{kJ}}{\text{s}}$$

O calor dos gases de combustão aciona uma unidade de refrigeração, a partir do seu compressor (tipo aberto). São removidos no evaporador $6,123 \text{ kJ/s}$ de calor ($\dot{Q}_{evap}$). A eficiência de Primeira Lei dessa unidade de refrigeração é de:

$$\eta_{sem\ trocador} = 31,52\%$$

Ao se medir a vazão de água no trocador de calor foi constatado uma vazão de $\dot{m}_{(H_2O)_1} = 0,06979 \text{ kg/s}$, a diferença de temperatura na entrada ($T_{in} = 30,1^\circ\text{C}$) e na saída ($T_{out} = 35,5^\circ\text{C}$) $\Delta T = 5,4^\circ\text{C}$, aferida com os termopares, resultou em um aproveitamento de energia do processo pelo trocador de calor de mais $\dot{Q}_{tc} = 1,5753 \text{ kJ/s}$ de energia na microgeração.

Com o aproveitamento do calor proveniente dos gases da combustão do motor diesel houve e um aumento de pouco mais de 25% na eficiência energética da unidade quando ocorre o acoplamento do trocador de calor, caracterizando um sistema de cogeração.

$$\eta_{com\ trocador} = 39,63\%$$

A avaliação do fluxo de exergia total dos produtos de combustão pode ser representado por:

Tabela 1: Fluxo de exergia da combustão de $C_{12}H_{26}$.

e	e^{tm}	e^{ch}	e^T
$C_{12}H_{26}[\text{kJ/kmol}]$	$1,45 \times 10^6$	$1,50 \times 10^5$	$1,60 \times 10^5$

Colocando o fluxo total de exergia (e^T) em termos de taxa de exergia (kJ/s) obtivemos uma taxa total de

$$\dot{E}^{tot} = 4,1352 \text{ kJ/s.}$$

A medição da temperatura da água, na entrada e saída obteve o valor de: $T_{in} = 30,1^\circ\text{C}$ e um $T_{out} = 35,5^\circ\text{C}$.

Na análise exergética, tanto no evaporador, quanto no trocador de calor, ambos os resultados foram convertidos para taxa de exergia. Os fluxos de exergia encontrados em ambos os processos são apresentados na tab. 2.

Tabela 2: Fluxo de exergia dos processos no evaporador e no trocador de calor de tubo duplo.

Evaporador	Trocador de calor
------------	-------------------

e [kJ/kg]	-6,7528	0,5752
$\dot{E}$ [kJ/s]	-0,2485	0,0401

A eficiência exergética também apresentou um aumento pelo uso da cogeração, neste caso da ordem de 16,33%.

Eficiência exergética analisada apenas para o sistema de refrigeração:

$$\epsilon = 6,00\%$$

Para a unidade de cogeração, obteve-se:

$$\epsilon = 6,98\%$$

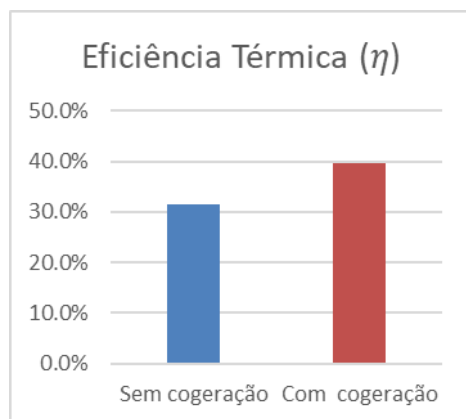


Figura 6 : Comparação da eficiência energética com e sem cogeração.

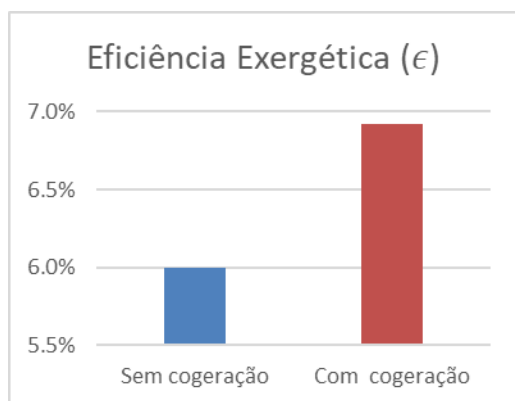


Figura 7: Comparação da eficiência de Segunda Lei.

Conclusões

Foi feito uma análise da eficiência de uma unidade afim de obter informações como: quantidade de calor dissipado, eficiências termodinâmicas, comparação da unidade operando de maneira individual e em cogeração. Esse trabalho proporciona a sugestão de implantação de uma unidade de microgeração de energia a partir de um motor de

combustão acoplado a um sistema convencional de refrigeração por compressão.

Através dos resultados analisados, pode-se perceber que a taxa de energia gerada pela combustão do motor é de $19,423 \frac{kJ}{s}$. Esse calor é responsável por acionar um compressor do tipo aberto. O rendimento de Primeira lei que envolve o calor de entrada do motor a Diesel foi de 31,52%.

Com propósito de reaproveitar o calor da combustão para aquecer a água que estava inicialmente a 30,1° C pode-se perceber que na saída do trocador de calor, com efetividade de 52,3%, houve um aumento na temperatura na ordem de 5,4°C tendo assim, um aumento na eficiência da unidade de aproximadamente 25% como apresentado a figura 6.

Em seguida, foi feita a análise da eficiência exergética e pode-se notar um aumento de 16,33% com o uso da microgeração, conforme apresentado na figura 7.

A cogeração tem uma grande importância no setor industrial, uma vez que reutiliza a energia através do calor proveniente da queima de um combustível. Além disso, é uma energia limpa, diminui os impactos ambientais e há uma redução dos gases poluentes.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq pelo apoio financeiro durante as pesquisas e a UFPB por todo o suporte dado, incluindo a disponibilização dos espaços e laboratórios para montagem dos experimentos.

Referências

COGEN EUROPE. What is cogeneration?. Disponível em <<https://www.cogeneurope.eu/knowledge-centre/what-is-cogeneration>> Acesso em: 27 de dezembro de 2018;

Barbeli, Marcelo Carlos. A COGERAÇÃO DE ENERGIA E SUA IMPORTÂNCIA DO PONTO DE VISTA TÉCNICO, ECONÔMICO E AMBIENTAL. <<http://www.fatece.edu.br/arquivos/arquivos%20revista/s/empreendedorismo/volume4/12.pdf>> Acesso em: 27 de dezembro de 2018;

Michael J. Moran [et al.]; Princípios de termodinâmica para engenharia, 7ª edição, tradução Gisele Maria Ribeiro Vieira, Paulo Pedro Kenedi, Fernando Ribeiro da Silva – Rio de Janeiro – LTC, 2014.

Borgnakke, C; Sonntag, R. E. Fundamentos da termodinâmica. São Paulo: E.Bluncher, 2009.

Bejan, A. Advanced engineering thermodynamics, 2ª edição, J. Wiley: New York, 1997.

Çengel, Yunus A, Transferência de calor e massa: uma abordagem prática; tradução Luiz Felipe Mendes de Moura; revisão técnica: Kamal A.R. Ismael – São Paulo: Mc Graw-Hill, 2009.

Potter, M. C.; Scott, E. P. Termodinâmica. São Paulo: Thomson, 2016.



6ª Escola de
de Refrigeraç

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.

VI Escola de Verão de Refrigeração
15 - 18 Março 2021, São Carlos, SP, Evento Virtual