

3.05.02 - Engenharia Mecânica / Engenharia Térmica.

## **ANÁLISE DO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO GÁS DE ATERRO ATRAVÉS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA COMBINADOS A CICLOS RANKINE ORGÂNICOS**

Lucas de Souza Silva<sup>1\*</sup>, Joaquim Eugênio Abel Seabra<sup>2</sup>

1. Estudante da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP
2. FEM-UNICAMP – Departamento de Energia / Prof. Dr. e Orientador.

### **Resumo:**

Este trabalho avaliou o desempenho da utilização do gás de aterro como combustível de um motor de combustão interna (MCI) acoplado a Ciclos Rankine Orgânicos (ORCs). Foram analisados os arranjos de ORC simples, composto por evaporador, turbina de estágio único, condensador e bomba, e de ORC com recuperação de calor, com um recuperador e os equipamentos da configuração anterior. As eficiências destas configurações foram avaliadas, determinando-se os rendimentos dos ciclos de potência e do acoplamento MCI e ORC, bem como as irreversibilidades termodinâmicas presentes. Os equacionamentos e simulações foram realizados com o auxílio do software Engineering Equation Solver (EES), através do qual foram desenvolvidas análises da Primeira Lei da Termodinâmica, que se refere ao balanço energético, e da Segunda Lei, referente ao balanço de exergia e identificação das irreversibilidades dos ciclos. Para cada arranjo, foram analisados diferentes fluidos de trabalho e parâmetros de operação.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade; Termodinâmica; Ciclos de Potência.

**Apoio financeiro:** Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

**Trabalho selecionado para a JNIC pela instituição:** Pró-Reitoria de Pesquisa (PRP) da UNICAMP.

### **Introdução:**

Historicamente, os problemas vinculados aos resíduos sólidos urbanos (RSU) se agravaram a partir da Revolução Industrial, com o crescimento econômico e populacional vultosos sem a devida preocupação com danos ambientais e sem planejamentos municipais adequados (RIBEIRO, 2011). De acordo com estimativas da UNEP (2009), em 2006, o montante total de RSU gerado globalmente atingiu o patamar de 2,0 bilhões de toneladas, representando uma taxa de crescimento anual de 7% desde 2003, aproximadamente 6 vezes superior à taxa de crescimento populacional de 2003.

Nesse sentido, o projeto de Ciclos Rankine Orgânicos (ORCs) combinados com motores de combustão interna (MCI) é uma alternativa para o melhor aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos. A degradação desses resíduos leva à formação de biogás, que pode ser utilizado como combustível para alimentar esses motores, enquanto que os gases quentes liberados na exaustão do motor podem ser aproveitados como fonte de calor para o ORC.

Com o aproveitamento deste tipo de gás, pode-se gerar energia elétrica para uma demanda regional como ocorre nos aterros Bandeirantes e São João no estado de São Paulo. Já a utilização de fluidos orgânicos, como hidroclorofluorcarbonos (HCFC), benzeno, R134a, R11, entre outros, tem se tornado mais comum devido a fatores como: pressão e temperatura críticas moderadas; boas propriedades de transferência de calor; são em geral não corrosivos, visto que o processo de expansão na turbina termina na região de vapor; possuem estabilidade térmica e química; e representam uma fonte de baixos impactos ambientais.

Vale ainda mencionar que, em comparação com a água, os fluidos orgânicos são vantajosos quando a máxima temperatura é menor e/ou a planta de potência é pequena, fornecendo maiores eficiências globais do ciclo (Tchanche et al., 2011).

Desse modo, o objetivo desse trabalho foi avaliar a eficiência global (de 1ª e 2ª Lei da Termodinâmica) de sistemas de motores de combustão interna combinados com ORCs para a geração de energia elétrica a partir do gás de aterro. Diferentes fluidos de trabalho, configurações e condições de operação dos ORCs foram analisadas, buscando identificar aquelas que levariam às maiores eficiências.

### **Metodologia:**

Este trabalho analisou o aproveitamento energético do gás de aterro através de um MCI combinado a duas possibilidades de arranjo de ORCs: ORC simples (Figura 1), composto por evaporador, turbina de estágio único, condensador e bomba, e de ORC com recuperação de calor (Figura 2), com um recuperador, além dos equipamentos da configuração anterior. O MCI foi modelado como um motor GE Jenbacher 3125 operando em carga plena (Manual General Electric®, 2006), alimentado com gás de aterro com 35% de CO<sub>2</sub> e 65% de CH<sub>4</sub> e 70,1% de excesso de ar. O equacionamento do balanço de energia para o motor envolveu os parâmetros potência produzida, a taxa de rejeição de calor que acompanha os gases de exaustão e a água de resfriamento do motor, mais as perdas de calor na carcaça, bem como as entalpias dos reagentes e produtos da combustão. O calor aproveitado pelo ORC, tanto no simples como no arranjo com recuperador, é oriundo do resfriamento

dos gases de exaustão do motor que saem a 430°C e, após fornecerem energia ao fluido de trabalho do ORC, atingem 120°C na saída do evaporador dos ciclos das figuras 1 e 2.

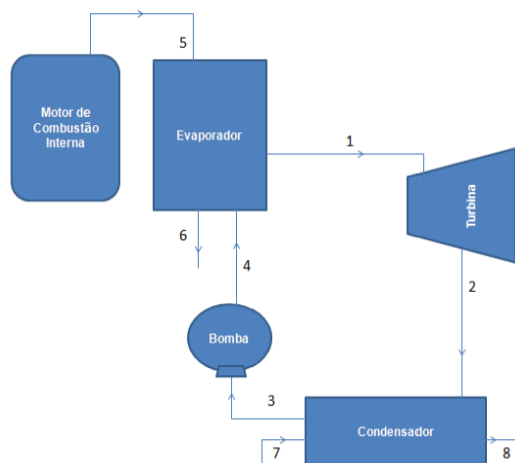


Figura 1: ORC simples.

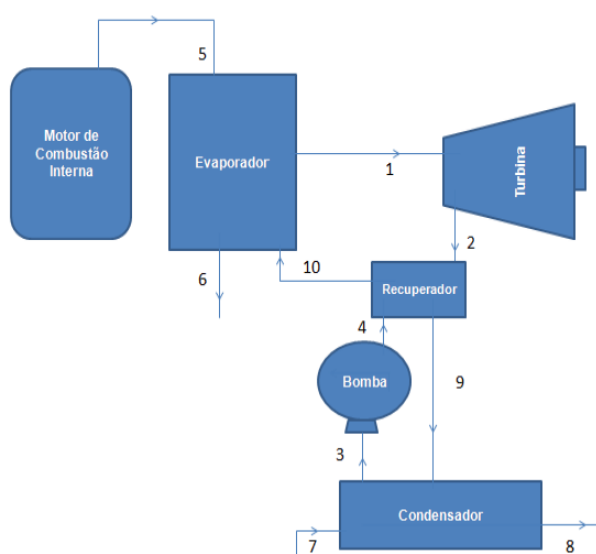


Figura 2: ORC com recuperador.

Para a modelagem, a bomba e a turbina foram adotadas como tendo eficiências isentrópicas de 80% e 70%, respectivamente. No sentido de avaliar o desempenho dos ORCs, para cada fluido variou-se a pressão superior ( $P_1$ ) entre a pressão crítica de cada fluido e a de saturação na temperatura de entrada da bomba. Variou-se também a temperatura máxima ( $T_1$ ), considerando-se o fato de que deve ser menor que a temperatura de entrada dos gases de exaustão no evaporador.

Para a etapa de seleção dos fluidos orgânicos, selecionou-se um representante de cada um dos três grupos mais relevantes de fluidos: como representante dos fluidos úmidos, escolheu-se a amônia; para os isentrópicos, o R134a; e o isobutano, como o representante dos secos. Contudo, para essa seleção, foram considerados aspectos como: não proibição para utilização por regulamentações nacionais, grande diferença de entalpia na turbina (maior energia produzida/maior eficiência do ciclo) e simples manuseio a temperatura ambiente.

Por fim, a partir do software Engineering Equation Solver (EES), foi realizado um balanço de energia em cada equipamento de ambos os ciclos, de modo a se determinar as eficiências dos ORCs para cada fluido de trabalho. Também foram determinadas as exergias de fluxo em cada ponto do ciclo com o intuito de se determinar as principais perdas termodinâmicas.

### Resultados e Discussão:

Diante da modelagem realizada, pôde-se avaliar a eficiência dos ORCs em função da temperatura máxima do ciclo, ou seja, a temperatura do fluido de trabalho na saída do evaporador, para diferentes níveis de pressão no próprio evaporador.

Comparando-se os três fluidos testados no ORC simples, a amônia apresentou as maiores eficiências do ORC, visto que esse fluido de trabalho apresenta a maior pressão crítica (cerca de 11333 kPa). O aumento da pressão e da temperatura máximas implicou um aumento da eficiência do ORC no caso da amônia. Para o R134a e o isobutano, houve um crescimento inicial da eficiência para temperaturas mais baixas. Contudo, ela decresceu com o aumento da temperatura máxima do ORC. Com relação à pressão máxima do ciclo,

observou-se que se elevando este parâmetro, houve um incremento na eficiência do ORC similarmente ao caso da amônia.

No ORC com recuperador, ocorreu um aumento da eficiência conforme se aumentaram a temperatura e a pressão máximas do ciclo para os três fluidos em estudo. No caso do ORC simples, pôde-se observar esse comportamento do ciclo somente no caso da amônia. Vale ressaltar também que o incremento do componente recuperador de calor, aumentou a eficiência do ORC para os três fluidos.

Sobre as condições ótimas encontradas durante os estudos, as tabelas 1 e 2 apresentam os valores de  $P_1$  e  $T_1$  que maximizam as eficiências do ORC e do conjunto ORC e MCI.

Tabela 1: Condições ótimas do ORC simples.

Fluido	$P_1$ (kPa)	$T_1$ (°C)	$\eta_{ciclo}$ (%)	$\eta_{global}$ (%)
R134a	4000	180,3	9,6	45,4
Isobutano	3600	169,9	11,7	45,9
Amônia	10000	417	17,5	47,2

Tabela 2: Condições ótimas do ORC com recuperador.

Fluido	$P_1$ (kPa)	$T_1$ (°C)	$\eta_{ciclo}$ (%)	$\eta_{global}$ (%)
R134a	4000	305,1	18,3	47,3
Isobutano	3600	291,1	21,4	48
Amônia	10000	417	23,5	48,5

Pela análise das tabelas acima, nota-se que a amônia apresentou as maiores eficiências tanto no ORC simples como no ORC com recuperação de calor, o que pode ser explicado principalmente pela maior pressão crítica deste fluido de trabalho em comparação ao R134a e ao isobutano.

Com relação às irreversibilidades termodinâmicas nos equipamentos de cada configuração de ORC, as tabelas de 3 a 5 sumarizam os resultados relativos às destruições exergéticas para as condições ótimas de  $P_1$  e  $T_1$  para cada fluido.

Tabela 3: Destruições exergéticas no ORC simples e com recuperador para o R134a.

Equipamento	ORC simples (kW)	ORC com recuperador (kW)
Evaporador	204,8	33,9
Turbina	32,8	45,7
Recuperador	-	115,4
Condensador	53,5	14,4
Bomba	2,1	2,7
<b>Total</b>	<b>293,2</b>	<b>212,1</b>

Tabela 4: Destruições exergéticas no ORC simples e com recuperador para o isobutano.

Equipamento	ORC simples (kW)	ORC com recuperador (kW)
Evaporador	187,9	35
Turbina	42,3	55
Recuperador	-	76,6
Condensador	40,9	13,7
Bomba	2,6	3
<b>Total</b>	<b>273,7</b>	<b>183,3</b>

Tabela 5: Destruições exergéticas no ORC simples e com recuperador para a amônia.

Equipamento	ORC simples (kW)	ORC com recuperador (kW)
Evaporador	98	49,5
Turbina	44,5	59,8
Recuperador	-	39,7
Condensador	75,9	12,5
Bomba	1,6	2,2
<b>Total</b>	<b>220</b>	<b>163,7</b>

Ao se analisar as tabelas 3, 4 e 5, o evaporador foi o equipamento que apresentou as maiores irreversibilidades no ORC simples para os três fluidos de trabalho. No ORC com recuperação de calor, o recuperador foi o componente com as maiores destruições exergéticas para o R134a e o isobutano. Contudo, para a amônia, a turbina foi o equipamento que apresentou as maiores perdas. Vale ressaltar também as menores destruições exergéticas totais no ORC com recuperador em comparação com o ORC simples para os três fluidos de trabalho.

### Conclusões:

A aplicação da combinação de um ORC com um motor de combustão interna é uma solução viável para o aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos e geração de energia para aplicações locais. Nesse sentido, a utilização do gás de aterro representa um melhor aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos que, muitas vezes, contribuem somente para a poluição ambiental, através de lixões, por exemplo.

Em relação ao desempenho dos ORCs, para as condições adotadas neste estudo, a amônia apresentou o melhor desempenho em ambos os ciclos devido à maior faixa de operação de pressões que se estende até cerca de 11000 kPa no evaporador. Contudo, para mesmas pressões de operação de cada fluido, o isobutano apresentou o melhor desempenho. Para a condição ótima com amônia, os pontos de maior destruição exérgica foram o evaporador e o condensador no ORC simples. Já no ORC com recuperador, a turbina e o evaporador apresentaram as maiores irreversibilidades.

### Referências bibliográficas

- [1] General Electric®, GE Jenbacher, EUA, 05/10/2006.
- [2] SHAPIRO, Howard N. et al. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2015.
- [3] VAJA, I.; GAMBAROTTA, A. Internal Combustion Engine (ICE) bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs). **Energy**, v. 35, n. 2, p. 1084-1093, fev. 2010.
- [4] TCHANCHE, B. F. et al. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles – A review of various applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 8, p. 3963-3979, 2011.
- [5] INCROPERA F. P.; **Fundamentals of heat and mass transfer**, J. Wiley & Sons, USA, 2011.
- [6] F-CHART SOFTWARE. **Engineering Equation Solver (EES)**. [s.l.] F-CHART SOFTWARE, 2016.
- [7] SILVA, Diego Luís Izidoro. **Recuperação de calor residual de baixa qualidade em usinas termelétricas de ciclo combinado**. 2016. 157 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.
- [8] RIBEIRO, D.V. A Política Nacional de Resíduos Sólidos e Uso Indiscriminado de Resíduos pela Sociedade Brasileira. **Conexão Academia - A revista científica sobre resíduos sólidos**, v.1, p. 25-30, set. 2011.
- [9] **UNEP. Developing Integrated Solid Waste Management Plan- Training manual, Volume 1: Waste Characterization and Quantification with Projection for Future**. Osaka/Shiga, Japan: United Nations Environment Programme, Division of Technology, Industry and Economics, International Environmental Technology Centre, 2009.