

APLICAÇÃO DE CICLO RANKINE ORGÂNICO PARA APROVEITAMENTO DE CALOR RESIDUAL NUMA CALDEIRA DE BIOMASSA DE UMA INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

Humberto Aguiar de Souza Filho (PIBIC/FA), Marcio Higa (Orientador),
e-mail: hbasf@hotmail.com; mhiga@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá / Centro de Tecnologia/Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento do CNPq/CAPES: [3.05.04.08-2](#)

Palavras-chave: Ciclo Rankine Orgânico, Recuperação de calor residual, Exergia.

Resumo:

Ciclos Rankine Orgânicos (CROs) são ciclos termodinâmicos aplicáveis na recuperação de calor residual de baixa temperatura para a geração de potência. Dentre as principais fontes de calores residuais estão gases de exaustão de geradores de vapor, o que possibilita a aplicação de um CRO numa caldeira de biomassa de uma indústria de papel e celulose. Foram selecionados três fluidos de trabalho aplicados em três arranjos diferentes para integração do CRO na saída do gerador de vapor variando a temperatura de fornecimento de calor ao CRO. Além disso, em virtude de uma das configurações apresentar temperatura de trabalho na ordem de 300°C, investigou-se também a aplicação de um ciclo Rankine convencional, com água como fluido de trabalho. Os resultados mostraram que aplicando o CRO, o fluido que gerou mais potência foi o Tolueno, no entanto, este ciclo teve resultado inferior ao ciclo Rankine tradicional com água.

Introdução

Tendo em vista o aumento das demandas energéticas no mundo, torna-se cada vez mais necessário aumentar não apenas a produção de energia como também a eficiência nos métodos produtivos. Nesse aspecto, a recuperação de energia desperdiçada em processos ganha apreciável interesse. A pesquisa realizada simula a aplicação de Ciclos Rankine Orgânicos (CROs) com intuito de recuperar calor residual no processo de geração de vapor numa usina de papel e celulose, variando-se os fluidos de trabalho utilizados e a disposição dos componentes na planta industrial a fim de verificar a melhor configuração de trabalho.

Ciclos Rankine convencionais utilizam água como fluido de trabalho, para isto, é necessário que o referido fluido atinja alta pressão e temperatura. Já os CROs utilizam em geral fluidos refrigerantes no lugar de água, já que estes podem ser evaporados a temperaturas bem inferiores, que podem ser conseguidas com fontes de calor residual.

A fim de selecionar os fluidos de trabalho candidatos a aplicação foram seguidos parâmetros recomendados por Quolin et al. (2013). Desse modo, acabou-se por selecionar os fluidos R245fa, R600 e Tolueno.

Materiais e métodos

Os aspectos quantitativos de transferência de calor e geração de potência foram avaliados com a Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica para volumes de controle. Para a utilização dos gases de combustão, os cálculos levaram em conta que o gerador de vapor produz 37,5 kg/s de vapor saturado a 6300 kPa. Assim, a eficiência energética do ciclo é obtida por meio da Eq. (1), enquanto as eficiências exergéticas foram avaliados pelas Eq. (2), (3) e (4).

$$\eta_{cycle} = \frac{W_{net}}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_C}{Q_H} \quad (1)$$

$$\mathcal{E}_{Work} = \frac{\dot{W}_{net}}{\dot{E}_{x\ in}} \quad (2)$$

$$\epsilon_{Total} = \frac{W_{net} + (\Delta E_x)_{water} + (\Delta E_x)_{air}}{E_{x,in}} \quad (3)$$

$$\epsilon_{ORC} = \frac{W_{net}}{\dot{E}_{x,ORC}} \quad (4)$$

As diferentes configurações propostas variam de acordo com a disposição dos componentes. Na configuração 1 (Figura 1), o CRO utiliza os gases residuais após o seu uso no pré-aquecedor de ar a 168°C. Já na configuração 2 (Figura 2), o CRO utiliza os gases após a sua utilização no economizador a 230°C, antes do pré-aquecedor de ar, enquanto na configuração 3, o CRO é integrado após a saída da caldeira a 458°C, antes do pré-aquecedor de ar, enquanto a condensação do fluido orgânico a 232°C fornece calor para o economizador no pré-aquecimento da água.

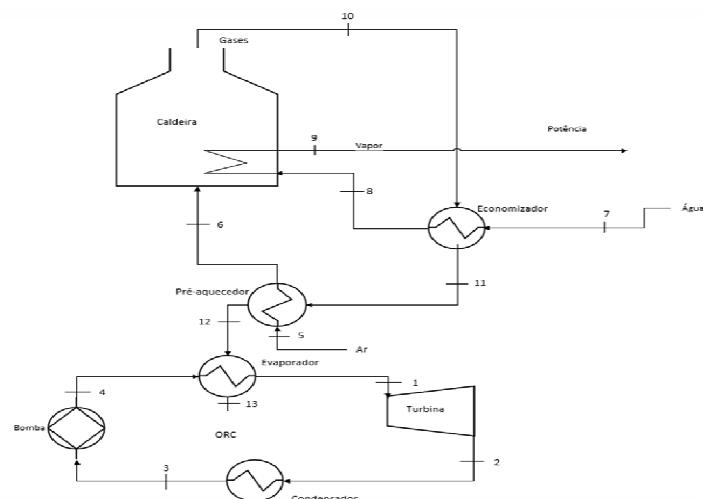


Figura 1 – Configuração 1: CRO integrado após pré-aquecedor de ar.

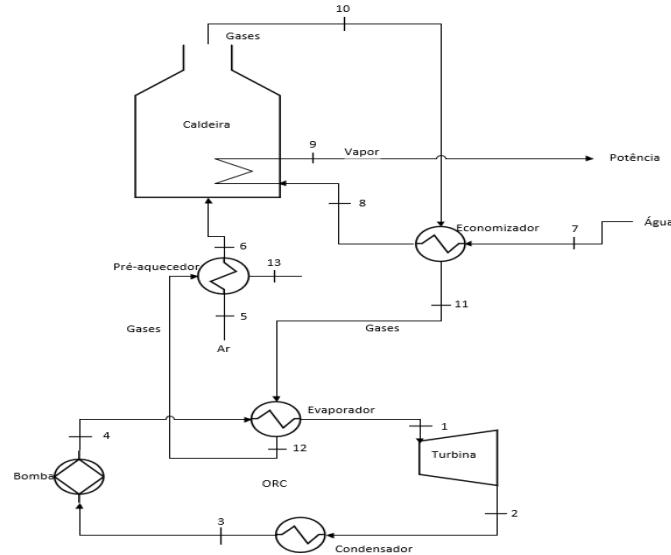


Figura 2 – Configuração 2: CRO integrado entre pré-aquecedor e economizador.

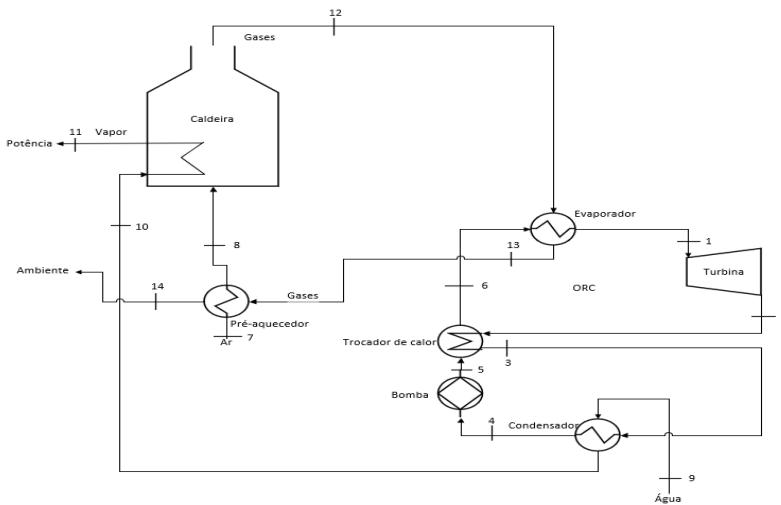


Figura 3 – Configuração 3: CRO integrado após saída da caldeira e condensador-economizador combinados.

Resultados e Discussão

Os resultados energéticos e exergéticos estão na Tabela (1). Com respeito as Configurações 1 e 2, verifica-se que não houve diferença significativa na geração de potência, entre os fluidos R245fa e R600. Desta forma, seria vantajoso utilizar o R245fa que não é inflamável ao invés do R600, inflamável, mas a vazão mássica do R245fa foi maior do que do R600. Quanto a geração de potência, a Configuração 2 gerou mais potência que a 1 em virtude de apresentar temperatura de evaporação maior do que a 1, mas, pode-se verificar que, a Configuração 3 gerou ainda mais potência, o que se explica devido a sua temperatura de evaporação, que é a mais alta.

No entanto, o tolueno é inflamável e a vazão mássica requerida foi a maior obtida.

Tabela 1: Resultados de potência líquida gerada, vazão mássica requerida no CRO, eficiências energética e exergéticas avaliadas.

	Configuração 1		Configuração 2		Configuração3	
Fluido de trabalho	R245fa	R600	R245fa	R600	Toluene	Water
W_{net} (kW)	232	231	508	498	810	1144
m_{ORC} (kg/s)	7.7	4.1	16.8	9.1	54.0	8.7
η_{cycle}	13.6	13.6	14.1	13.8	5.1	7.0
ϵ_{Work}	1.6	1.6	4.2	4.1	4.7	6.6
ϵ_{Total}	51.1	51.1	53.1	53.0	57.0	58.9
ϵ_{ORC}	43.0	39.8	36.1	32.7	67.5	70.0

Como a Configuração 3 utiliza gases de combustão com 458°C, pode aquecer o fluido de trabalho do ciclo de potência a temperaturas na ordem de 300°C, o que viabiliza a aplicação da água. Neste caso, a potência gerada foi superior ao arranjo com Tolueno, com vazão mássica bem inferior à do mesmo, assim como as eficiências energética e exergéticas obtidas também foram superiores. Desta forma, além da menor vazão mássica, a água não apresenta os riscos à segurança do Tolueno, portanto este seria o ciclo mais vantajoso.

Conclusões

Conclui-se que o R245fa se mostrou uma ótima opção como fluido de trabalho quando se leva em conta segurança e fatores ambientais, sendo possível gerar potências na ordem de 500 kW para a dada usina. Já o Tolueno pode gerar mais potência (810 kW), mas deve-se lembrar do fato de ser perigoso e/ou prejudicial ao meio ambiente. Constatou-se também que, embora CROs sejam alternativas interessantes na recuperação de calor residual, deve-se estudar outras possibilidades na configuração do sistema, o que pode viabilizar a aplicação de um ciclo Rankine convencional. Neste estudo, a Configuração 3 foi a que gerou mais potência e apresentou as melhores condições operacionais quanto a segurança e meio ambiente.

Agradecimentos

Agradeço a Fundação Araucária pelo suporte financeiro, ao meu orientador Prof Dr. Márcio Higa por ter prontamente ajudado sempre e a minha família que sempre me incentiva em minhas funções como estudante.

Referências

QUOILIN, S., BROEK, M., DECLAYE, S., DEWALLEF, P., LEMORT, V., 2013. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.22, p.168–186.