

Análise Exergoeconômica de um sistema de trigerção de energia operando com um Ciclo Rankine Orgânico

Thiago de Souza Figueredo ^[1], João Luiz de Medeiros Neto ^[2], Adriano da Silva Marques ^[3], Carlos Antônio Cabral dos Santos ^[4]

[1] thiagosf_89@hotmail.com. [2] eng.joaomedeiros@gmail.com. UFPB/PPGEM. [3] adriano.marques@ufrpe.br. UFRPE/UACSA.

[4] carloscabralsantos@yahoo.com.br/UFPB/PPGEM

RESUMO

Neste trabalho são apresentados os resultados das análises energética, exergetica e exergoeconômica de um sistema de trigerção de energia que é composto por um Ciclo Rankine Orgânico (*Organic Rankine Cycle – ORC*), um Sistema de Refrigeração por Absorção (SRA) de simples efeito e um aquecedor térmico. O sistema proposto é acionado pelo calor residual de um processo industrial. Foi desenvolvido um código computacional na plataforma EES (*Engineering Equation Solver*) para solucionar o equacionamento termodinâmico e exergoeconômico de cada equipamento. Foi utilizado o método SPECO (*Specific Exergy Costing – Custo Específico da Exergia*) para a avaliação exergoeconômica. A avaliação permitiu diagnosticar quais equipamentos necessitam de otimização por ordem de prioridade. Os resultados mostram que a maior destruição de exergia acontece no gerador de vapor do ORC (56% do total), seguido pelo condensador que apresentou uma destruição de exergia de 33%. De modo contrário, a bomba e o expansor apresentaram desempenhos melhores, com baixos valores de destruição de exergia. Os resultados da avaliação exergoeconômica também indicam que o gerador de vapor e o condensador do ORC necessitam ser otimizados antes de qualquer outro equipamento, pois obtiveram os menores valores do fator exergoeconômico (f_k) e os valores mais altos do custo relativo específico (r_k).

Palavras-chave: Ciclo Rankine Orgânico. Refrigeração por Absorção. Análise Exergetica. Exergoeconomia. Método SPECO.

ABSTRACT

This work presents the results of the energetic, exergetic and exergoeconomic evaluation of a trigeneration system which is composed of an Organic Rankine Cycle (ORC), a simple effect Absorption Refrigeration System (SRA) and a boiler. The proposed system is driven by the residual heat of an industrial process. A computational code was developed on the EES (Engineering Equation Solver) platform to solve the thermodynamic and exergoeconomic equation of each equipment. The SPECO method (Specific Exergy Costing) was used for the exergoeconomic evaluation. Results indicated which equipment needs optimization in order of priority. The results show that the greatest destruction of exergy occurs in the ORC steam generator (56% of the total), followed by the condenser that presented an exergy destruction of 33%. Conversely, the pump and expander performed better, with low exergy destruction values. The results of the exergoeconomic evaluation also indicate that the steam generator and condenser from ORC need to be optimized before any other equipment, as they obtained the lowest values of the exergoeconomic factor (f_k) and the highest values of the specific relative cost (r_k).

Keywords: *Organic Rankine Cycle. Absorption Refrigeration. Exergetic Analysis. Exergoeconomics. SPECO method.*

1 Introdução

O cenário energético brasileiro sofreu com os apagões no início dos anos 2000 e, recentemente, também sentiu a ameaça de uma crise energética motivada pelo baixo nível dos reservatórios hídricos. A segurança energética de um país é um assunto de suma importância, fazendo-se necessária a busca por fontes alternativas e o uso mais eficiente das fontes disponíveis.

Nessa direção, a cogeração de energia, que trata da “produção” combinada de calor e energia, é um tema bem amadurecido e aplicado na prática. Outra modalidade de “produção” combinada é a trigeração de energia, cujos produtos podem ser: calor, energia elétrica e água gelada para climatização.

Chang *et al.* (2015) analisaram o desempenho experimental de um expansor *scroll* de unidade aberta em um sistema de ciclo Rankine orgânico (ORC). O expansor utilizado em nossa pesquisa foi um compressor de ar do tipo *scroll*, sem óleo, com uma relação de volume interno de 4,05. Os resultados experimentais deste estudo estão divididos em duas partes principais: a primeira parte concentra o desempenho experimental no superaquecimento fixo na entrada do expansor, em relação a várias diferenças de pressão do sistema e velocidades de rotação do expansor. A segunda parte envolve vários superaquecimentos na entrada do expansor, que operou com velocidade rotacional fixa e diferença de pressão operacional de 5 bar e 6 bar. Quando o ciclo foi operado sob condições fixas de superaquecimento, verificou-se que a eficiência máxima do ciclo, a eficiência do expansor e a potência do expansor foram 9,44%, 73,1% e 2,3 kW, respectivamente.

Mohammadi *et al.* (2017) estudaram um sistema híbrido composto por uma turbina a gás, um ciclo Rankine orgânico (ORC) e um sistema de refrigeração por absorção de vapor, cuja finalidade era produzir frio, aquecimento e energia elétrica residencial. Os resultados mostraram que a planta proposta podia produzir 30 kW de potência, 8 kW de resfriamento e quase 7,2 toneladas de refrigeração (TR), com uma eficiência de 67,6%. Já Anvari, Taghavifar e Parvishi (2017) propuseram um ciclo combinado de refrigeração, aquecimento e geração de energia elétrica, composto por três seções de turbina a gás e um gerador de vapor para recuperação de calor, ciclo Rankine orgânico regenerativo e um ciclo de refrigeração por absorção de vapor. O principal

objetivo da investigação foi abordar os aspectos termodinâmicos e exergoeconômicos de um ciclo de trigeração, a partir de uma nova perspectiva, de modo que a viabilidade econômica e termodinâmica de incorporar o ciclo Rankine orgânico regenerativo e o ciclo de refrigeração por absorção, para o ciclo da turbina a gás, fosse analisado. Os resultados indicaram que: a) a adição do ciclo Rankine orgânico regenerativo às turbinas a gás e aos geradores de vapor de recuperação de calor ocasionou um aumento de 2,5% da eficiência do ciclo; b) a adição do ciclo de refrigeração por absorção à turbina a gás e recuperação de calor do gerador de vapor do ciclo Rankine Orgânico Regenerativo causaria um aumento de 0,75% na eficiência exergética de todo o ciclo.

Rahbar *et al.* (2016) fizeram uma revisão abrangente da literatura sobre o ORC, explorando assuntos como: diferentes configurações, aplicações diversas, seleção do fluido de trabalho, modelagem matemática e estudo experimental dos dispositivos de expansão. Alcântara *et al.* (2019) apresentaram uma análise energética e financeira de um sistema de geração de energia, no qual eletricidade, vapor e água gelada são produzidos simultaneamente, usando gás natural como fonte de entrada. O sistema consiste em um motor de combustão interna, uma unidade doméstica de recuperação de calor, um *chiller* de absorção LiBr- H₂O, para produzir água gelada, e uma caldeira de recuperação para produzir vapor. Neste sistema, os gases de escape produzidos pelo motor são usados para acionar o *chiller* de absorção, através de um trocador de calor, e também para acionar uma caldeira de recuperação. De acordo com os resultados finais, e considerando a carga total do motor, o sistema geral de trigeração apresentou um fator de utilização de energia de 74%, com produção média de eletricidade, refrigeração e aquecimento de 214,1 kW, 35,7 kW e 162,1 kW, respectivamente. Para a análise financeira, foram utilizados os métodos do valor presente líquido (VPL), a taxa interna de retorno (TIR) e a *simple payback*, com base em uma taxa de juros de 6,4% e um período de projeto de dez anos.

Silva *et al.* (2019) estudaram um sistema de cogeração aplicado ao prédio da reitoria de um campus universitário. Tal análise compreendeu um motor alternativo como o principal motor, uma caldeira reserva, um tanque de acumulação e um *chiller* de absorção de efeito único para remover o excesso de calor. A principal vantagem do uso desse tipo de sistema é que o aumento da temperatura de

produção de água fria melhora o desempenho geral da eficiência do sistema, pois o calor residual está a uma temperatura mais baixa. Esta solução foi aplicada no prédio da reitoria da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em João Pessoa, Nordeste do Brasil, onde a demanda por temperaturas frias é intensa e o consumo de energia é extremamente alto, uma vez que a umidade relativa anual média e a temperatura do bulbo seco é de cerca de 75% e 27 °C, respectivamente.

Dai (2019) realizou uma pesquisa experimental, com a finalidade de investigar o desempenho da resposta dinâmica de um sistema de ORC em microescala, acionado por fontes de calor de baixa qualidade, em diferentes cargas. Foi feita uma modificação com a máquina de expansão no módulo ORC e sua eficiência isentrópica, sob condições de carga variável. A produção máxima de eletricidade e a eficiência isentrópica do expensor foi de 120 W e 43%, respectivamente, para condição estacionária.

Souza (2019) propôs um sistema de cogeração para atender às demandas elétricas e térmicas parciais de um edifício em uma universidade pública. Esse sistema proposto compreendeu um motor de combustão interna, um ciclo Rankine orgânico, uma torre de resfriamento e um sistema de refrigeração por absorção. Os desempenhos do sistema baseados nos pontos de vista energético e exergético, operando sob dois modos distintos, ORC Simples (ORC-S) e ORC Combinado (ORC-C), foram comparados, levando em consideração a disponibilidade de energia dos gases do motor. Os modelos termodinâmicos para ambos os modos foram desenvolvidos com base na primeira e na segunda lei da termodinâmica, considerando parâmetros de entrada, como temperatura de entrada e saída do expensor, razão de pressão e temperatura de saída do tanque de armazenamento de água fria. Foi utilizado o método SPECO para a análise exergoeconômica do sistema, que usa um expensor *scroll* e opera com o R-134a, como fluido de trabalho, e o par água/amônia, para o sistema de refrigeração por absorção de simples efeito. Os resultados mostram que o modo ORC-C pode atender de 18,9% a 37,5% da demanda de eletricidade, enquanto o modo ORC-S pode atender de 12,4% a 24,5% desse tipo de demanda. A análise termodinâmica relatou que o ORC-C permitiu um aumento de 33,6% na produção de energia mecânica, um aumento de aproximadamente 4,5% para 34,5% em eficiência energética, além da

eficiência exergética em 40% e redução na exergia destruída. Do ponto de vista exergoeconômico, o custo específico da água gelada teve uma leve influência no custo total dos produtos, enquanto o custo específico da água quente teve uma forte influência no custo total dos produtos (variação de aproximadamente 46% para uma fonte de calor distinta).

Diante disso, o presente estudo propõe uma modelagem e análise exergoeconômica de um sistema de trigerção, com ênfase no Ciclo Rankine Orgânico integrado, a fim de avaliar os componentes que precisam de uma atenção maior, a fim de buscar um melhor rendimento exergoeconômico.

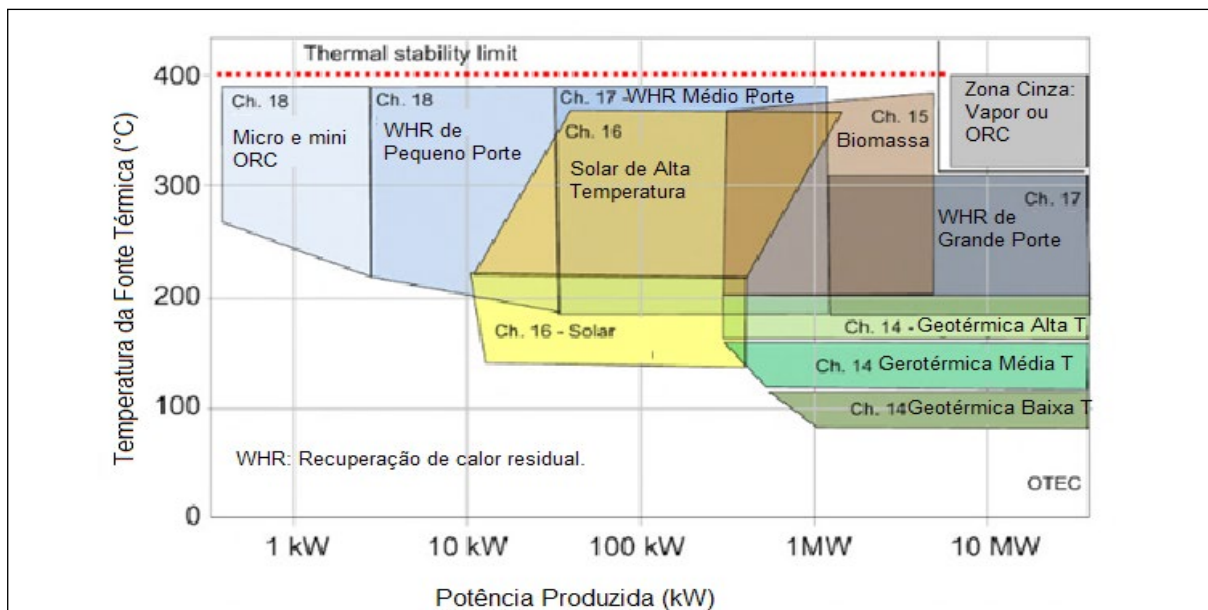
2 Referencial teórico

O interesse em trigerção de energia tem crescido, graças à preocupação referente aos aumentos dos preços dos combustíveis fósseis e do aquecimento global. Esse sistema é uma versão mais aprimorada do sistema de cogeração, no qual há apenas dois produtos, sejam calor e energia elétrica ou “frio” e energia elétrica. Já o sistema de trigerção gera três produtos, a partir de uma única fonte de calor: potência elétrica por um ciclo Rankine; água gelada, através de um *chiller* de absorção; e água quente, através de um trocador de calor.

Dependendo da temperatura da fonte quente, o ciclo Rankine pode utilizar diferentes fluidos de trabalho. No caso de baixas temperaturas, utilizam-se fluidos orgânicos e, por isso, o Ciclo Rankine Orgânico (*Organic Rankine Cycle ORC*) vem sendo amplamente utilizado em processos de recuperação de calor residual de processos térmicos.

Bracco *et al.* (2017) apresentam uma variedade de fontes térmicas para produção de energia elétrica, conforme descrito na Figura 1. Observa-se que, para recuperação de calor residual, é considerada de pequeno porte a faixa de 5 kW até 50 kW. É importante notar que, mesmo para baixas temperaturas, no caso das geotérmicas, é possível obter potências da ordem de Mega Watts. Outra questão a ser avaliada com relação ao fluido de trabalho é a complexidade e os altos investimentos para operar com turbinas a vapor em comparação com sistemas operando com fluidos orgânicos, a temperaturas e pressões mais baixas que o ciclo Rankine convencional.

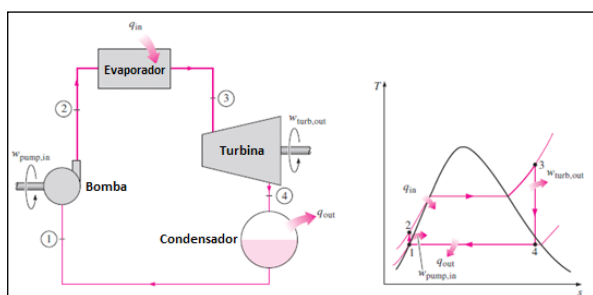
Figura 1 – Representação dos campos de aplicação do ORC em função da temperatura da fonte térmica e potência elétrica de saída



Fonte: Traduzido de Bracco et al. (2017).

O Ciclo Rankine Orgânico é semelhante ao Ciclo Rankine Convencional. Possui quatro processos ideais: compressão isentrópica na bomba, adição de calor à pressão constante, expansão isentrópica em uma turbina ou expensor e, por fim, condensação à temperatura constante (CENGEL; BOLES, 2006). Esses processos são ilustrados na Figura 2.

Figura 2 – Representação do Ciclo Rankine e o Diagrama T-s da água

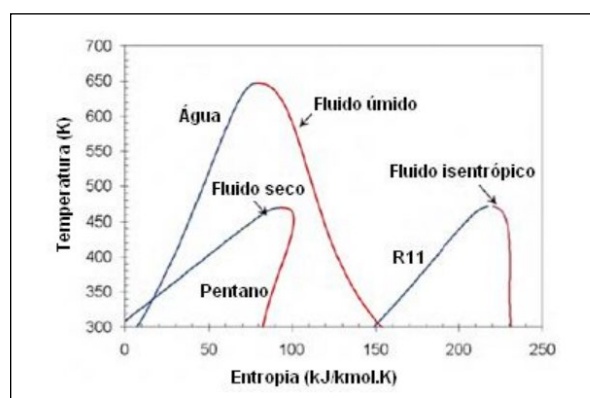


Fonte: Cengel e Boles (2006).

Na Figura 3, observa-se que o comportamento da água se encaixa na classificação dos fluidos úmidos. Entre os fluidos orgânicos, destacam-se os hidrocarbonetos Tolueno, N-Pentano, N-Butano, que são fluidos secos; os refrigerantes R245fa e o R134a, representando os fluidos isentrópicos; e o R32 e a Amônia, representando os fluidos úmidos. A utilização de fluidos secos e isentrópicos elimina a necessidade

de operação com vapor superaquecido, tendo em vista que o expensor alimentado com vapor saturado de fluido orgânico ainda descarrega vapor saturado. Bracco (2017) apresenta todos os critérios de projeto e seleção de equipamentos para sistemas ORC bem como suas aplicações.

Figura 3 – Classificação dos fluidos de acordo com a linha de saturação de vapor

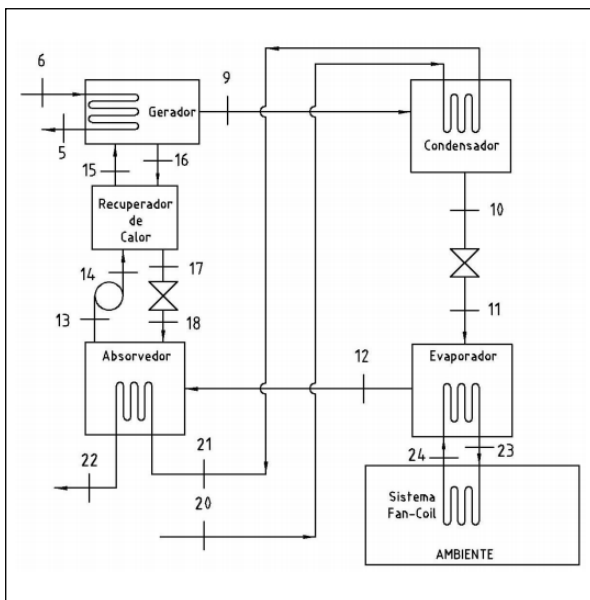


Fonte: Silva (2015).

O *chiller* de absorção é o responsável pelo fornecimento de água gelada para climatização em um sistema de trigerção de energia. Herold, Radermacher e Klein (2016) descrevem o funcionamento, que se dá a partir de um processo físico-químico, no qual os vapores de um refrigerante podem ser absorvidos, em

grande quantidade, por um líquido ou solução salina, devido às suas afinidades químicas. Essa absorção ocorre até um ponto de saturação, momento em que o líquido fica com sua capacidade de absorção bastante reduzida. Para que o ciclo funcione continuamente, se faz necessária a recuperação da concentração inicial do fluido refrigerante, no líquido absorvente, através do aquecimento da mistura rica (com alta concentração de refrigerante). A Figura 4 apresenta um sistema de refrigeração por absorção e seus componentes.

Figura 4 – Componentes do sistema de refrigeração por absorção



Fonte: Gramignia (2013).

Para o fornecimento de água quente, utiliza-se um trocador de calor de placas; a água aquecida no trocador é armazenada em um aquecedor térmico para ser direcionada ao seu devido uso, que pode ser banho, cozinha, entre outros.

Lazzaretto e Tsatsaronis (2006) apresentam uma metodologia para realizar a análise exergoeconômica em sistemas térmicos, para definir e calcular as eficiências exergéticas e a relação dos fluxos de exergia, associados aos custos monetários do sistema proposto. Essa metodologia é baseada no método SPECO (*Specific Exergy Costing*), ou Custo de Exergia Específica.

Tsatsaronis (2007) estabelece definições e nomenclaturas para os estudos exergoeconômicos. Segundo esse autor, Exergoeconomia é o ramo da engenharia que combina avaliação termodinâmica, baseada em análise exergética, com princípios

econômicos, em nível dos componentes do sistema, a fim de fornecer informações úteis para a etapa de projeto e operação do referido sistema, as quais não podem ser obtidas por análise energética ou econômica convencional.

Em Lazzaretto e Tsatsaronis (2006), o método SPECO é definido em três passos: primeiro são identificados os fluxos de exergia, depois são definidos os insumos e produtos de acordo com o propósito do componente, e, por fim, o último passo é a formulação das equações de custos, associados aos fluxos de exergia.

Em geral, havendo um número de fluxos de exergia saindo de um componente, haverá o mesmo número de variáveis e somente uma equação de balanço de custos, sendo assim, haverá a necessidade de se complementar o número de equações para que este se iguale ao número de incógnitas, o que é feito por meio das equações auxiliares. O método SPECO resolve essa questão através dos princípios P (relacionado aos produtos) e F (relacionado aos insumos). Os produtos e insumos são definidos com base no propósito e função dos equipamentos.

No Princípio P, cada unidade de exergia é fornecida a um fluxo associado ao produto no mesmo custo médio, chamado \bar{c} . Como cada fluxo, ao qual a exergia é fornecida, corresponde a um fluxo de saída, o número de equações auxiliares fornecidas por esse princípio é igual ao número de saída decrescida de 1.

O Princípio F determina que o custo específico associado a este fluxo é igual ao custo médio específico do fluxo de entrada e de saída. Com isso, obtêm-se uma equação auxiliar para cada remoção de exergia, sendo o número de equações auxiliares sempre igual ao número de fluxos de exergia saindo do volume de controle do componente (\dot{V}), associados à definição de insumo.

3 Método da pesquisa

Descrição do sistema proposto

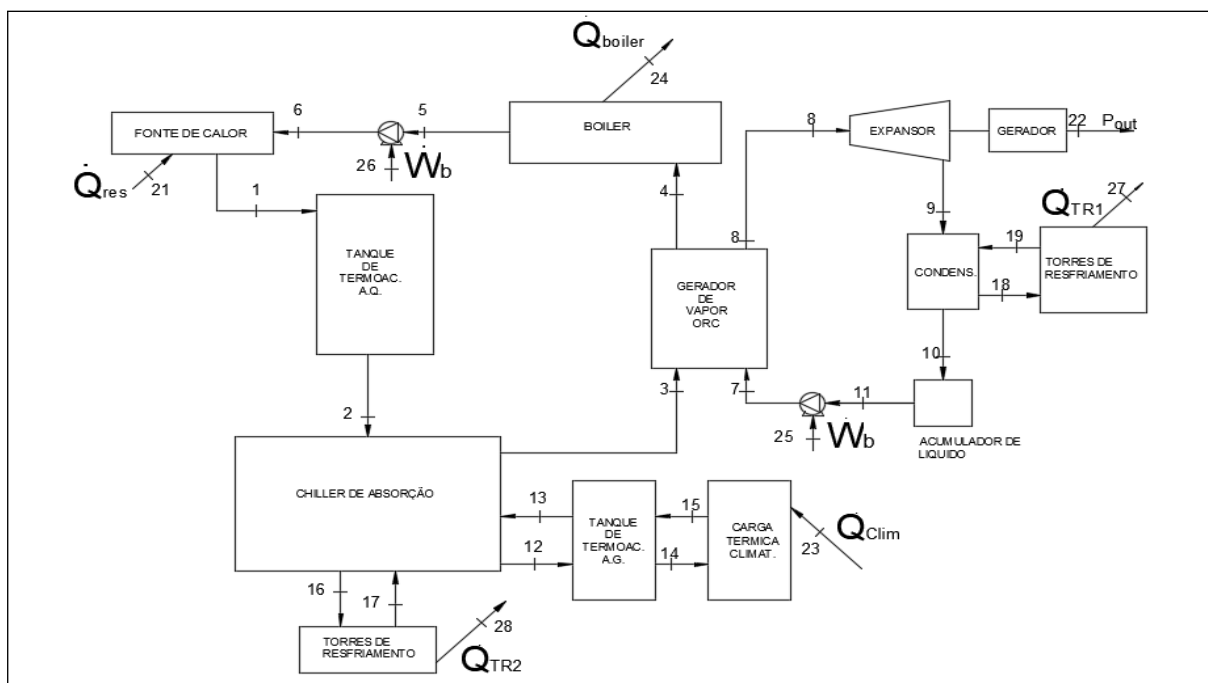
A unidade de trigerção proposta neste trabalho é composta por: sistema de refrigeração por absorção de vapor de simples efeito, um sistema ORC e componentes auxiliares: tanque de termoacumulação e torre de resfriamento.

A Figura 5 apresenta o diagrama esquemático do objeto de estudo, no qual a água quente proveniente do termoacumulador entra no sistema de refrigeração por

absorção, que fornecerá água gelada para o sistema de climatização, depois segue para o gerador de vapor do ORC, que produz energia elétrica, e, então, para o trocador de calor do *boiler*, reiniciando o ciclo ao

passar pela bomba de circulação. O ciclo de água quente é fechado, e os componentes estão acoplados em série.

Figura 5 – Diagrama esquemático do sistema de trigeração proposto



Fonte: Figueredo (2019).

Modelagem exérgica

Foram utilizadas as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Todos os processos são internamente reversíveis;
- Os volumes de controle operam em regime permanente;
- Os efeitos de energia cinética e potencial são desprezados;
- As perdas de carga são consideradas desprezíveis, com relação ao objeto de estudo como um todo;
- A troca de calor com o ambiente foi desprezada;
- Foi considerada expansão isentálpica nas válvulas de expansão.

O estudo energético e exérgico do sistema foi realizado, utilizando-se as equações de balanço de massa (Equação 1), balanço de energia (Equação 2) e taxa de geração de entropia (Equação 3), para cada volume de controle em separado, que é determinado pelas fronteiras de cada equipamento da unidade proposta.

$$\frac{dm}{dt} = \sum_e \dot{m}_e - \sum_s \dot{m}_s \quad (1)$$

$$\frac{dE_{v.c.}}{dt} = \dot{Q}_{v.c.} - \dot{W}_{v.c.} + \sum \dot{m}_e (h_e) - \sum \dot{m}_s (h_s) \quad (2)$$

$$\frac{dS_{v.c.}}{dt} = \sum \dot{m}_e (S_e) - \sum \dot{m}_s (S_s) + \dot{S}_{ger} + \sum \frac{\dot{Q}_{v.c.}}{T} \quad (3)$$

Modelagem exergoeconômica – SPECO

Diferentes abordagens foram apresentadas, na literatura, para análises exergoeconômicas de sistemas que trabalham com conversão de energia. Neste trabalho, foi escolhido o método SPECO, que utiliza como parâmetros: a exergia de cada fluxo de entrada e saída para os volumes de controle, o custo específico de exergia, eficiência exergética e as equações auxiliares para se igualar o número de variáveis com o de equações no sistema linear.

O Quadro 1 exhibe as equações utilizadas para obtenção dos custos específicos dos sistemas térmicos.

Quadro 1 – Equações de custo exergético

Equação	Custo associado
$\dot{C}_e = c_e \dot{E}_e = c_e \dot{m}_e e_e$	Ao fluxo exergético de entrada
$\dot{C}_s = c_s \dot{E}_s = c_s \dot{m}_s e_s$	Ao fluxo exergético de saída
$\dot{C}_w = c_w \dot{W}$	À transferência de Trabalho
$\dot{C}_q = c_q \dot{E}_q = c_q \cdot q \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)$	À transferência de Calor

Fonte: Adaptado de Lazzaretto e Tsatsaronis (2006).

Em que:

c_e , c_s , c_w e c_q representam o custo médio por unidade de exergia;

\dot{C}_e , \dot{C}_s , \dot{C}_w e \dot{C}_q são os fluxos de custos associados aos fluxos de exergia, e;

e_e e e_s denotam as exergias específicas do fluido na entrada e na saída do componente em estudo.

A equação primitiva para o desenvolvimento do balanço de custos exergéticos de cada equipamento é:

$$\sum (c_s E_s)_k + c_{w,k} \dot{W}_k = c_q E_q + \sum (c_e E_e)_k + \dot{Z}_k \quad (4)$$

A taxa de custo com despesas totais é composta pelas parcelas de aquisição dos componentes operação e manutenção.

$$Z_k = Z^{CI} + Z^{OM} \quad (5)$$

A avaliação de desempenho exergético dos equipamentos é feita utilizando-se o conceito de eficiência exergética, que é a relação entre a exergia dos produtos e a exergia dos combustíveis:

$$\epsilon = \frac{E_p}{E_f} \quad (6)$$

A taxa de exergia destruída é determinada pela diferença entre a exergia dos insumos e a exergia dos produtos:

$$E_F = E_P + E_D \quad (7)$$

O parâmetro que indica o aumento relativo no custo médio por unidade de exergia entre o combustível e o produto é:

$$r_k = \frac{c_p - c_f}{c_f} \quad (8)$$

Valores altos de r_k indicam a necessidade de otimização de custos com menor esforço do que outro componente com menor valor. No caso de otimização, deve-se minimizar o valor da diferença relativa do custo do componente principal, em vez de minimizar o custo médio do produto por unidade de exergia.

Outro parâmetro importante na avaliação de custos pelo método SPECO é o fator exergoeconômico, utilizado para determinação da viabilidade de investimento de cada equipamento:

$$f_k = \frac{\dot{Z}}{c_f \cdot E_D + \dot{Z}} \quad (9)$$

Este parâmetro compara a taxa de custos de investimentos com a taxa de custo da exergia destruída. Baixos valores de f_k indicam que o custo da irreversibilidade é significativo, em comparação com o custo de investimento no equipamento. Para otimizar o equipamento, é necessário trabalhar para redução das irreversibilidades.

O Quadro 2 apresenta o balanço exergoeconômico, para o volume de controle de cada equipamento do ciclo, bem como suas respectivas equações auxiliares.

Quadro 2 – Balanço Exergoeconômico dos componentes

Balanço de Custos	
Equação	Componente
$\dot{C}_8 - \dot{C}_7 = \dot{C}_3 - \dot{C}_4 + \dot{Z}_{Gerador}$	Gerador de Vapor ORC
$P_{Out} = \dot{C}_8 - \dot{C}_9 + \dot{Z}_{Exp+Ger}$	Expansor + Gerador Elétrico
$\dot{C}_{18} - \dot{C}_{19} = \dot{C}_9 - \dot{C}_{11} + \dot{Z}_{C+AL}$	Condensador + Acumulador de Líquido
$\dot{C}_7 - \dot{C}_{12} = \dot{W}_B + \dot{Z}_B$	Bomba ORC
$\dot{Q}_{TR1} = \dot{C}_{18} - \dot{C}_{19} + \dot{Z}_{TR1}$	Torre de Resfriamento 1
$\dot{Q}_{Boiler} = \dot{C}_4 - \dot{C}_5 + \dot{Z}_{Boiler}$	Boiler
$\dot{C}_6 - \dot{C}_5 = \dot{W}_{BAO} + \dot{Z}_{BAO}$	Bomba Água Quente
$\dot{C}_1 - \dot{C}_6 = \dot{Q}_{Res} + \dot{Z}_{Fonte}$	Fonte de Calor Residual
$\dot{Q}_{Clim} = \dot{C}_2 - \dot{C}_3 + \dot{Z}_{Clim}$	Sistema de Climatização

Fonte: Elaborado pelos autores.

Foram determinados os estados termodinâmicos para cada ponto do ciclo, representando os fluxos de entrada e saída por volume de controle. No Quadro 3,

estão os dados de entrada utilizados no EES para a avaliação dos parâmetros energéticos e exergéticos do sistema.

Quadro 3 – Dados de entrada para obtenção dos parâmetros energéticos e exergéticos do sistema

Variável	Referência	Valor	Unidade
Fluido Orgânico	ElectraTherm (2015)	R245fa	-
Temperatura de entrada da água quente no gerador de vapor ORC	ElectraTherm (2015)	83	°C
Temperatura de saída da água do condensador ORC	ElectraTherm (2015)	35	°C
Temperatura de entrada da água no condensador ORC	ElectraTherm (2015)	29,5	°C
Pressão de saída da bomba do ciclo de água quente	Figueredo (2019)	1,6	Bar
Pressão de entrada do fluido orgânico no expansor	Ng <i>et al.</i> (1990)	8,5	Bar
Razão de pressão do expansor	Ng <i>et al.</i> (1990)	5,03	-
Eficiência isentrópica do expansor	Tang <i>et al.</i> (2015)	87	%
Eficiência do gerador elétrico ligado ao ORC	Guimarães <i>et al.</i> (2016)	95	%
Eficiência da bomba do ORC	Lin (2008)	60	%
Potência elétrica na saída do gerador	ElectraTherm (2015)	20	kWe
Vazão mássica de água no Boiler	Figueredo (2019)	10,4	kg/min
Temperatura de saída do Boiler	Figueredo (2019)	70	°C
Temperatura de entrada da água quente no gerador de vapor do SRA	Johnson Controls (2016)	88	°C
Carga térmica do evaporador SRA	Johnson Controls (2016)	176	kJ/s
Calor cedido ao gerador de vapor do SRA	Johnson Controls (2016)	251	kJ/s
Temperatura da água gelada na saída do evaporador SRA	Johnson Controls (2016)	7	°C
Temperatura de retorno da água gelada ao evaporador SRA	Johnson Controls (2016)	12,5	°C

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os dados de entrada para a análise exergoeconômica incluem a tarifa de energia elétrica e os custos relacionados aos fluxos de água quente

e água gelada. No Quadro 4, estão apresentados os dados de entrada relacionados aos parâmetros econômicos.

Quadro 4 – Dados de entrada para obtenção dos parâmetros exergoeconômicos

Parâmetro	Referência	Quantidade	Unidade
Tarifa de energia elétrica	Figueredo (2019)	0,149	\$
Custo unitário da energia elétrica fornecida à bomba	Figueredo (2019)	0,149	\$
Custo do Calor de Rejeito fornecido à água do Ciclo de água quente	Figueredo (2019)	0,000	\$
Custo unitário da energia elétrica produzida pelo ORC	Figueredo (2019)	0,149	\$
Custo unitário da água gelada	Medeiros Neto (2018)	0,0240	\$/MJ
Custo unitário da água quente	Souza (2019)	0,0260	\$/MJ
Taxa anual de juros	Tuon (2019)	4,250	%
Vida útil do sistema	Shokati <i>et al.</i> (2015)	20	anos
Número de horas de operação por ano	Shokati <i>et al.</i> (2015)	7446	h/ano
Fator de manutenção	Shokati <i>et al.</i> (2015)	6	%

Fonte: Elaborado pelos autores.

4 Resultados da pesquisa

Na Tabela 1, estão apresentados os resultados dos estados termodinâmicos de cada fluxo indicado no objeto de estudo. Esses resultados são pré-requisitos para a análise termodinâmica e de custo exergético.

Tabela 1 – Resultados da análise termodinâmica

Fluxo	Fluido	Vazão (kg/s)	P (bar)	T (°C)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg.K)
1	Água	12,60	1,52	88,02	368,60	1,170
2	Água	12,60	1,44	88,00	347,60	1,169
3	Água	12,60	1,37	83,00	318,20	1,111
4	Água	12,60	1,30	76,00	288,90	1,027
5	Água	12,60	1,24	69,00	276,40	0,943
6	Água	12,60	1,60	66,00	236,50	0,906
7	R-245fa	5,05	8,50	27,92	306,30	1,125
8	R-245fa	5,05	8,50	78,00	301,30	1,339
9	R-245fa	5,05	1,69	78,00	237,30	1,342
10	R-245fa	5,05	1,69	28,68	236,00	1,130
11	R-245fa	5,05	1,69	27,68	29,61	1,125
12	Água	7,60	2,00	7,00	52,65	0,106
13	Água	7,60	2,00	12,50	29,64	0,188
14	Água	7,60	2,00	7,01	52,67	0,106
15	Água	7,60	2,00	12,51	146,80	0,188
16	Água	18,60	2,00	35,00	123,70	0,505
17	Água	18,60	1,90	29,50	146,70	0,429
18	Água	16,80	0,95	35,00	123,70	0,505
19	Água	16,80	1,00	29,50	123,70	0,429

Fonte: Elaborado pelos autores.

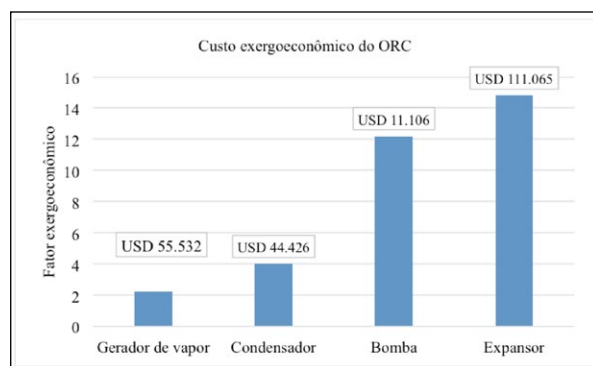
4.1 Resultados da análise exergética

A análise exergética dos equipamentos do Ciclo Rankine Orgânico mostrou que a maior destruição de exergia ocorreu no gerador de vapor (56% do total), seguido pelo condensador, que apresentou uma destruição de exergia de 33% do total. Já a bomba e o expansor apresentaram um melhor desempenho, com menores valores de destruição de exergia.

4.2 Resultados da análise exergoeconômica

Na Figura 6, estão apresentados os valores do fator exergoeconômico de cada um dos equipamentos do Ciclo Rankine Orgânico. Os menores valores de f_k estão presentes no gerador de vapor e no condensador, o que indica a necessidade de otimização no sentido de reduzir as irreversibilidades em ambos os equipamentos. No gráfico também estão os custos de aquisição de cada equipamento (USD – *United States Dollar*).

Figura 6 – Resultados do fator exergoeconômico para os equipamentos do ORC



Fonte: Elaborada pelos autores.

Os maiores valores do custo relativo (r_k) foram apresentados no gerador de vapor e no condensador do Ciclo Rankine Orgânico, o que reforça a necessidade de atenção especial no projeto desses equipamentos. Como era de se esperar, a bomba de recirculação e o expansor apresentaram os melhores desempenhos de custo específico da unidade proposta.

5 Conclusão/Recomendações

O método SPECO demonstrou ser uma excelente ferramenta de análise de sistemas térmicos, por

associar os custos monetários aos fluxos de exergia. Assim, é possível enxergar, através de uma definição correta de insumos e produtos, quais componentes custam mais e precisariam de otimização.

O sistema proposto é um sistema de trieração de energia, que atende a demandas de energia elétrica, calor para processo e frio para climatização. O sistema opera com um ciclo Rankine Orgânico, o que justifica um aumento da eficiência global da unidade. A carga térmica fornecida pela fonte de calor é de 1103 kW, da qual 47,53% são revertidos em energia elétrica, água gelada e água quente. Com isso, é possível concluir que, energeticamente, o sistema proposto é viável, já que o calor fornecido seria desperdiçado.

A análise exergética mostrou que a maior destruição de exergia se deu no gerador de vapor, sendo 56% do total; o condensador apresentou uma destruição de exergia menor, porém ainda alta (33% do total), já a bomba e o expansor apresentaram valores menos expressivos.

Na análise exergoeconômica, os equipamentos que apresentaram valores baixos do fator exergoeconômico foram o gerador de vapor e o condensador; já os valores desse parâmetro para o expansor e a bomba foram mais altos, o que é bom para a unidade. O gerador de vapor e o condensador também apresentaram os maiores valores do custo relativo (r_k), reforçando a necessidade de estudos mais aprofundados em ambos os equipamentos para se buscarem formas de se reduzir suas ineficiências. Como sugestão para trabalhos futuros, cita-se: redução na área de troca de calor em ambos os equipamentos, estudo de outros materiais para fabricação dos trocadores de calor, mudança na geometria de troca térmica, avaliação de outros fluidos refrigerantes e avaliação de isolamento térmico.

REFERÊNCIAS

ALCÂNTARA, S. C. S.; OCHOA, A. A. V.; COSTA, J. A. P.; MICHIMA, P. S. A.; SILVA, H. C. N. Natural gas based trigeneration system proposal to an ice cream factory: An energetic and economic assessment. **Energy Conversion and Management**, v. 197, p. 111860, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111860>.

ANVARI, S.; TAGHAVIFAR, H.; PARVISHI A. Thermo-economical consideration of Regenerative organic Rankine cycle coupling with the absorption chiller systems incorporated in the trigeneration system. **Energy Conversion and Management**,

v. 148, p. 317-329, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.05.077>.

BRACCO, R. *et al.* Micro-Organic Rankine Cycle systems for domestic cogeneration. *In: MACCHI, E.; ASTOLFI, M. (ed.). Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems: Technologies and Applications.* Amsterdã: Elsevier, 2017. p. 637-668. DOI: <https://doi.org/10.1016/C2014-0-04239-6>.

CENGEL, Y.; BOLES, M. **Thermodynamics: An Engineering Approach.** 6. ed. New York: Mcgraw-Hill, 2006.

CHANG, J.-C.; HUNG, T.-C.; HE, Y.-L.; ZHANG, W. Experimental study on low-temperature organic Rankine cycle utilizing scroll type expander. **Applied Energy**, v. 155, p. 150-159, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.118>.

DAI, B.; ZHU, K.; WANG, Y.; SUN, Z.; LIU, Z. Evaluation of organic Rankine cycle by using hydrocarbons as working fluids: Advanced exergy and advanced exergoeconomic analyses. **Energy Conversion and Management**, v. 197, 111876, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111876>.

ELECTRATHERM. **6500 Specification Sheet.** Catálogo do fabricante. [2015]. Disponível em: https://electratherm.com/wp-content/uploads/2015/03/SS-6500-POWER-_interactive.pdf. Acesso em: 30 abr. 2019.

FIGUEREDO, T. S. **Análise Exergoeconômica de um sistema de trigerção de energia operando sob um ciclo Rankine Orgânico, acoplado a um Chiller de Absorção de Simples Efeito.** 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

GRAMIGNIA, L. **Modelagem e avaliação de um sistema de refrigeração por absorção para residências e instalações de pequeno porte.** 2013. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, 2013.

GUIMARÃES, H. N.; OLIVEIRA, F. P. Z.; BARBOSA, B. G.; MARTINS NETO, J. H.; BARBIERI, P. E. L. Análise Exergética de um sistema de trigerção integrado com ciclo de Rankine e energia solar. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR*, 6., Belo Horizonte, 2016. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABENS, 2016.

HEROLD, K. E.; RADERMACHER, R.; KLEIN, S. A. **Absorption Chillers and Heat Pumps.** 2. ed. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2016.

JOHNSON CONTROLS. **YORK® Commercial & Industrial HVAC 2016.** Catálogo de produtos. 2016. Disponível em: https://www.johnsoncontrols.com/nl_nl/-/media/jci/be/netherlands/products/files/be_york_chillers_and_heatpumps_en_2016.pdf. Acesso em: 7 maio 2019.

LAZZARETTO, A.; TSATSARONIS, G. SPEC0: A systematic and general methodology for calculating efficiencies and costs in thermal systems. **Energy**, New York, v. 31, n. 8-9, p. 1257-1289, 2006 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2005.03.011>.

LIN, C. **Feasibility of using power steering pumps in small-scale solar thermal electric power systems.** 2008. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto de Tecnologia de Massachusetts, Massachusetts, 2008.

MEDEIROS NETO, J. L. **Análise comparativa das metodologias de estudo exergoeconômico para um sistema de refrigeração por absorção de vapor de duplo efeito.** 2018. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

MOHAMMADI, A.; KASAEIAN, A.; POURFAYAZ, F.; AHMADI, M. H. Thermodynamic analysis of a combined gas turbine, ORC cycle and absorption refrigeration for a CCHP system. **Applied Thermal Engineering**, v. 111, p. 397-406, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.098>.

NG, K. C.; BONG, T. Y.; LIM, T. B. A thermodynamic model for the analysis of screw expander performance. **Heat Recovery Systems and CHP**, v. 10, n. 2, p. 119-133, 1990. DOI: [https://doi.org/10.1016/0890-4332\(90\)90166-H](https://doi.org/10.1016/0890-4332(90)90166-H).

RAHBAR, K.; MAHMOUD, S.; AL-DADAH, R. K.; MOAZAMI, N.; MIRHADIZADEH, S. A. Review of organic Rankine cycle for small-scale applications. **Energy Conversion and Management**, v. 134, p. 135-155, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.12.023>.

SHOKATI, N.; RANJBAR, F.; YARI, M. Exergoeconomic analysis and optimization of basic, dual-pressure and dual-fluid ORCs and Kalina geothermal power plants: A comparative study. **Renewable**

Energy, v. 83, p. 527-542, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.04.069>.

SILVA, A. L. **Análise termodinâmica de sistemas de geração do tipo Rankine orgânico acoplados a concentradores solares**. In: ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2015, Santo André, SP. **Resumos** [...]. Santo André, SP: Universidade Federal do ABC, 2015.

SILVA, H. C. N.; DUTRA, J. C. C.; COSTA, J. A. P.; OCHOA, A. A. V.; SANTOS, C. A. C.; ARAÚJO, M. M. D. Modeling and simulation of cogeneration systems for buildings on a university campus in Northeast Brazil – A case study. **Energy Conversion and Management**, v. 186, p. 334-348, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.02.062>.

SOUZA, R. J. **Análise Exergoeconômica da produção combinada de potência e frio utilizando ciclo Rankine Orgânico e sistema de Refrigeração por Absorção**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2019.

TANG, H.; WU, H.; WANG, X.; XING, Z. Performance study of a twin-screw expander used in a geothermal organic Rankine cycle power generator. **Energy**, v. 90, part 1, p. 631-642, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.07.093>.

TSATSARONIS, G. Definitions and nomenclature in exergy analysis and exergoeconomics. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 249-253, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2006.07.002>.

TUON, L. Copom reduz juros para 4,25%, mas indica que o ciclo de cortes acabou. **Exame**, 5 fev. 2020. Disponível em: <https://exame.com/economia/copom-reduz-juros-para-425-mas-indica-que-ciclo-de-cortes-acabou/>. Acesso em: 29 jun. 2020.