

ANÁLISE DE UM ORC REGENERATIVO E SUA APLICAÇÃO NA ENERGIA SOLAR

André Felipe Vieira da Cunha (UFPE) - andre.fvcunha@ufpe.br

Sandino Lamarca Santos Souza (UFPE) - sandino.lamarca@gmail.com

Resumo:

O presente trabalho analisa ciclos regenerativos orgânicos, objetivando sua aplicação na energia solar. Foram realizadas simulações de um ciclo regenerativo orgânico com até 4 extrações, a fim de analisar o comportamento da eficiência máxima e do trabalho gerado na turbina. Utilizou-se o R134a como fluido orgânico, usado em ciclos de temperaturas baixas. Dados de temperatura de evaporação entre 60 °C e 100 °C e de temperaturas de superaquecimento iguais a 120 °C, 200 °C e 300 °C foram testados para análise do ciclo. Assim, foi possível verificar o comportamento do trabalho e eficiência máxima em função do número de extrações, temperatura de superaquecimento e temperatura de evaporação. Os modelos e simulações foram através do software Engineering Equation Solver (EES) e, os resultados, analisados em Excel. Concluiu-se que a eficiência máxima aumenta com o aumento da temperatura de evaporação e do número de extrações, entretanto diminui com o aumento da temperatura de superaquecimento, já o trabalho da turbina cresce ao aumentar as temperaturas de evaporação e superaquecimento, mas decresce com o incremento das extrações.

Palavras-chave: *Energia Solar, Ciclo Rankine orgânico regenerativo, Fluido refrigerante R134a*

Área temática: *Conversão Térmica com Concentradores*

Subárea temática: *Equipamentos e sistemas de conversão heliotérmica para eletricidade*

ANÁLISE DE UM ORC REGENERATIVO E SUA APLICAÇÃO NA ENERGIA SOLAR

André Felipe Vieira da Cunha – andre.fvcunha@ufpe.bre-mail

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Energia Nuclear (DEN)

Sandino Lamarca Santos Souza – sandino.lamarca@gmail.com

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Departamento de Engenharia Mecânica (DEMEC)

Resumo. *O presente trabalho analisa ciclos regenerativos orgânicos, objetivando sua aplicação na energia solar. Foram realizadas simulações de um ciclo regenerativo orgânico com até 4 extrações, a fim de analisar o comportamento da eficiência máxima e do trabalho gerado na turbina. Utilizou-se o R134a como fluido orgânico, usado em ciclos de temperaturas baixas. Dados de temperatura de evaporação entre 60 °C e 100 °C e de temperaturas de superaquecimento iguais a 120 °C, 200 °C e 300 °C foram testados para análise do ciclo. Assim, foi possível verificar o comportamento do trabalho e eficiência máxima em função do número de extrações, temperatura de superaquecimento e temperatura de evaporação. Os modelos e simulações foram através do o software Engineering Equation Solver (EES) e, os resultados, analisados em Excel. Concluiu-se que a eficiência máxima aumenta com o aumento da temperatura de evaporação e do número de extrações, entretanto diminui com o aumento da temperatura de superaquecimento, já o trabalho da turbina cresce ao aumentar as temperaturas de evaporação e superaquecimento, mas decresce com o incremento das extrações.*

Palavras-chave: Energia Solar, Ciclo Rankine orgânico regenerativo, Fluido refrigerante R134a.

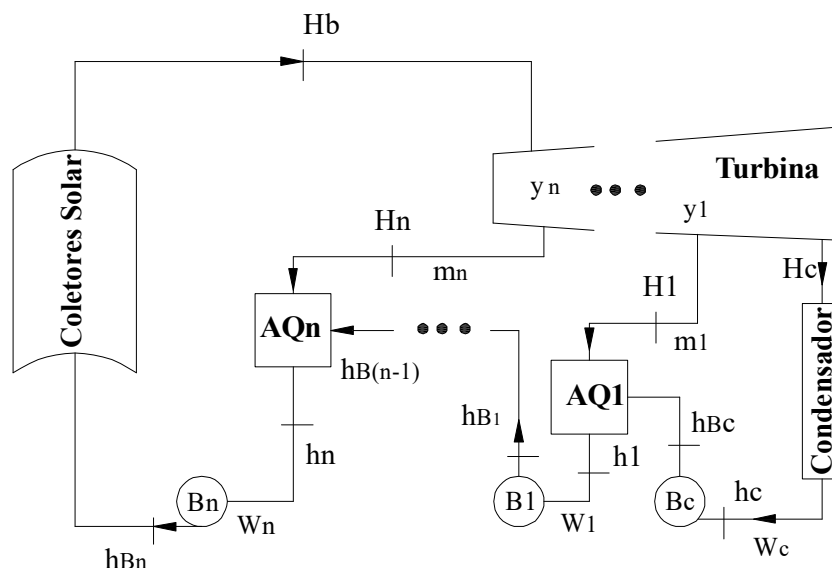
1. INTRODUÇÃO

O ciclo Rankine orgânico é uma das melhores tecnologias para converter fontes de energia de baixa ou média temperatura em eletricidade. Os principais problemas do uso do ciclo orgânico Rankine são: a baixa eficiência energética, as limitações no aumento do trabalho da saída, a seleção do fluido de trabalho, o efeito ambiental e a combinação de temperatura entre fluxos quentes e frios em trocadores de calor (Habibi *et al.*, 2018).

A eficiência térmica média do sistema ORC varia de 0,02 a 0,11; pequenos sistemas inferiores a 5 kW têm menor eficiência térmica. A eficiência térmica do sistema ORC depende dos componentes do sistema, do fluido de trabalho, das condições de operação da fonte de calor, do dissipador de calor e do ciclo (Imran *et al.*, 2014). Para solucionar estes problemas de baixa eficiência térmica, foram introduzidas diferentes configurações em relação ao ciclo Rankine orgânico, incluindo ciclo orgânico com pré-aquecedor médio, ciclo regenerativo, ciclo de evaporador duplo e ciclo com ejetor (Habibi *et al.*, 2018).

Sendo uma derivação do ciclo Rankine, o ciclo regenerativo faz o uso do reaquecimento do fluido após a saída do condensador, aumentando a temperatura média da fonte de calor e que se traduz, por sua vez, em um aumento da sua eficiência termodinâmica, comparado ao ciclo Rankine convencional. O reaquecimento do fluido de trabalho é obtido através da troca térmica através de pequenas frações de vapor liberados pela turbina ao longo do processo de expansão.

A Fig. 1 ilustra um ciclo regenerativo com “n” extrações parciais de vapor ao longo da turbina conectados a aquecedores de água de alimentação, de contato direto (aquecedores de mistura). Como observado, o ciclo regenerativo é formado pelo conjunto de coletores solares (em substituição de uma caldeira), turbina, condensador, aquecedores de mistura de contato direto e bombas.



2. MODELO DE EQUAÇÕES

As equações para o trabalho (turbina) e eficiência do ciclo regenerativo são baseadas em Vieira da Cunha e Fraidenraich (2012). Elas demonstram os balanços de energia e massa de cada componente do ciclo ilustrado na Fig. (1). Para o trabalho por unidade de massa (referente a vazão mássica na saída dos coletores), considerando “n” extrações (w_t [kJ/kg]) utiliza-se a expressão:

$$w_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_b} = (H_b - H_c) + y_n(H_c - H_n) + \dots + y_1(H_c - H_1) \quad (1)$$

onde $\dot{m}_b$ é a vazão mássica total através dos coletores [kg/s], $\dot{W}_t$ a potência da turbina [W], H_n é a entalpia na saída das extrações da turbina, H_b a entalpia na saída da caldeira e H_c a entalpia na entrada do condensador e y_i é a fração mássica da i-ésima extração. A fração mássica y_i é a razão entre a vazão mássica extraída ($\dot{m}_i$) e a vazão mássica na entrada dos coletores ($\dot{m}_b$), ou seja, $y = \dot{m}_i / \dot{m}_b$. Para o caso da segunda extração em diante, a fração mássica é calculada por:

$$y_i = \frac{(h_i - h_{B(i-1)})}{(H_i - h_{B(i-1)})} \left(1 - \sum_{j=i+1}^n y_j \right) \quad (2)$$

onde h_j é a entalpia na saída do i-ésimo aquecedor e h_B é a entalpia na saída de cada bomba. A fração mássica para a primeira extração ($i=1$) é expressa por:

$$y_1 = \frac{(h_1 - h_{Bc})}{(H_1 - h_{Bc})} \left(1 - \sum_{j=i+1}^n y_j \right) \quad (3)$$

O calor total por unidade de massa (referenciado pela massa total nos coletores - m_b) do conjunto de coletores (q_b [J/kg]) e do condensador (q_c [J/kg]) é diretamente proporcional à diferença de entalpia ou seja:

$$q_b = H_b - h_{Bn} \quad \text{e} \quad q_c = (h_c - H_c) \left(1 - \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (4)$$

A eficiência do ciclo regenerativo é expressa pela razão do trabalho líquido e o calor absorvido nos coletores (q_b), ambos por unidade de massa que do ciclo (m_b):

$$\eta_t = \frac{w_t - \sum_{i=1}^n [(1 - \sum_{j=i+1}^n y_j) |w_{Bi}|] - |w_{Bc}| (1 - \sum_{j=1}^n y_j)}{q_b} \quad (5)$$

onde w_t e w_B são o trabalho da turbina e da bomba, respectivamente, por unidade de massa (m_b) [J/kg]. O trabalho das bombas pode ser calculado pela multiplicação da diferença de pressão que estão sujeitas pelo respectivo volume específico do fluido da região (Wylen, 1993).

3. FLUIDOS ORGÂNICOS

Os fluidos orgânicos podem ser classificados de acordo com sua faixa de temperatura: Baixa, Média ou Alta temperatura. Os fluidos orgânicos de baixa temperatura operam abaixo de 150 °C e são geralmente utilizadas para recuperação de energia geotérmica ou rejeitos térmicos de baixa qualidade. Nessa faixa podem ser encontradas máquinas que operam entre 80 °C a 150 °C e outras de 60 °C a 120 °C.

Os fluidos orgânicos de média temperatura operam entre 150 °C e 300 °C e são geralmente utilizadas para recuperação de calor de combustão de produtos de biomassa. Já os fluidos orgânicos de alta temperatura operam acima de 300 °C e são ideais para recuperação de calor de máquinas térmicas (a gás ou diesel) e outros rejeitos térmicos de melhor qualidade. Essas máquinas geralmente operam com temperaturas na ordem de 350 °C, necessitando um fornecimento de energia térmica na ordem de 900 kWe para produzir 165 kWe. (Velez, 2012)

Em aplicações comerciais encontram-se os seguintes fluidos orgânicos: Amônia (R-717); R-134a (HFC), usado em plantas de potência geotérmicas; R-245fa (HFC) para baixas temperaturas; N-pentano, utilizado na planta comercial ORC com energia solar em Nevada, EUA; Solkatherm (SES36) que é uma mistura azeotrópica; Tolueno, para recuperação a temperaturas mais elevadas; Hidrocarbonetos (HCs), Hidrofluorcarbonos (HFCs), Hidrofluoroéteres (HFEs) e OMTS (octamethyltrisiloxane). (Velez, 2012)

Algumas características são importantes para escolha de um fluido orgânico em Ciclo Rankine Orgânico ORC, tais como: (a) Curva de vapor saturado com inclinação zero ou positiva (ds/dT). Nestes casos os fluidos são denominados

como fluidos isentrópicos ou secos; (b) Elevado calor latente de vaporização; (c) Baixo volume específico (na fase líquido-vapor); (d) Elevado calor específico; (e) Parâmetros críticos moderados (temperatura e pressão); (f) Pressões de operação (condensação e vaporização) entre 1 e 25 bar, respectivamente; (g) Boas propriedades de transferência de calor (baixa viscosidade, elevada condutividade térmica, etc.); (h) Boa estabilidade térmica e química (estável a altas temperaturas); (i) Boa compatibilidade com outros materiais (não corrosivo, etc.); (j) Boas características de segurança; (k) Baixo impacto ambiental (Baixo Potencial de Destruição da Camada de Ozônio - ODP e Baixo Potencial de Aquecimento Global - GWP); e (l) Baixo custo e disponibilidade. (Velez, 2012)

A Fig. 2 mostra o diagrama da temperatura (T) versus entropia (s) da água e de alguns fluidos orgânicos: R113, R245fa, R134a, n-pentano e n-butano. Nele observamos as faixas de temperaturas de operação desses fluidos em um ciclo Rankine, ponto abaixo do ponto crítico. O R134a, por exemplo, possui a faixa de operação inferior ao da água, uma temperatura máxima de 100 °C (Silva, 2015). Os fluidos que possuem a linha de vapor saturado muito próximo de uma linha vertical são chamados de fluidos isentrópicos.

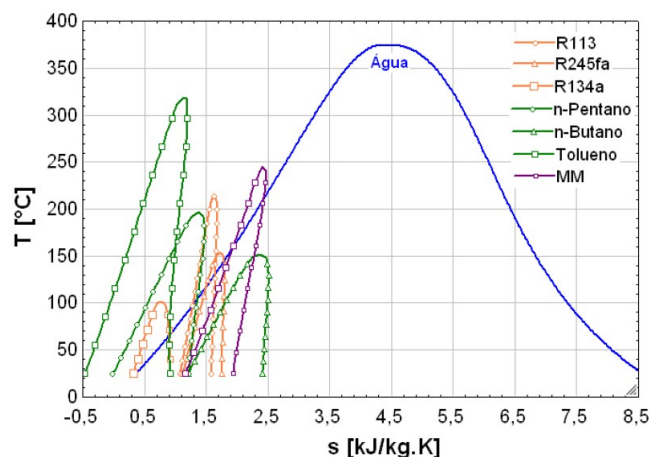


Figura 2 – Diagrama Temperatura versus Entropia da água e alguns fluidos orgânicos.

Observa-se também que o comportamento do diagrama temperatura versus entropia dos fluidos orgânicos são diferentes do diagrama da água, devido a inclinação da linha de vapor saturado (ds/dT) ser zero ou possuir um valor negativo. Consequentemente, uma expansão na turbina no ciclo Rankine, o fluido entra na fase de vapor e após uma expansão isentrópica, deixa a turbina no estado de vapor, diferente da água que na extração da turbina o fluido se encontra em estado bifásico.

Bha e Zhao (2013) fazem uma revisão de fluidos de trabalho utilizados no ciclo Rankine orgânico, sob a ênfase da influência das propriedades termodinâmicas e físicas e o desempenho no ciclo orgânico Rankine. Realizam também uma comparação das aplicações dos fluidos orgânicos puros e mistos através das características operacionais das máquinas de expansão.

Baral e Kim (2014) analisaram 15 (quinze) fluidos orgânicos termodinamicamente num Ciclo Rankine Orgânico, avaliando as performances e aptidões de cada fluido. Desses 15 (quinze) fluidos, o RC318 e o R123 ofereceram um desempenho muito atrativo, mas requerem precauções ambientais devido ao alto poder de depleção da camada de ozônio e alto poder de aquecimento global. Já os fluidos R134a e R245fa foram os mais apropriados para os Sistemas de Cogeração Solar com Ciclos Rankines Orgânicos de baixa e média temperatura. A escolha destes fluidos orgânicos, adequados para plantas ORC, forma baseados em características desejáveis, tais como; baixa temperatura e pressão críticas adequadas; baixo volume específico, baixa viscosidade e tensão superficial; alta condutividade térmica; estabilidade térmica adequada; não corrosivo; não tóxico e compatível com o material da turbina e óleo lubrificante.

Análises de Lakew e Bolland (2010), Sauret e Rowlands (2011) e, Gu e Sato (2002) também enfatizam que o fluido R134a é um bom fluido de trabalho e atende os requisitos apresentados. Estes três últimas citações de trabalhos consideram também o uso do fluido orgânico R134a em ciclos Rankine operando em condições supercríticas, ou seja, acima das condições do ponto crítico (Temperatura e Pressão críticas).

Após a análise realizada acerca dos possíveis fluidos orgânicos que poderiam ser utilizados, optou-se pelo R134a pela sua aceitação na literatura e suas boas características termofísicas e ambientais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As simulações realizadas foram baseadas em modelos elaborados no programa computacional Engineering Equation Solver (EES). É um software capaz de resolver equações em geral e utilizado em termodinâmica, com uma base de dados de propriedades termofísicas de fluidos. Para cada número de extrações um modelo diferente e para cada modelo, a simulação consiste em varrer todas as eficiências possíveis extraídas ao longo dos diversos pontos de extração da turbina. O valor de eficiência máxima é que é considerado como o ponto ótimo do ciclo. Para os modelos de

ciclos com mais de duas extrações, são extraídas combinações de valores das pressões de extração da turbina e apenas a combinação que fornece o valor máximo de eficiência é considerado.

As simulações revelam que há um valor máximo de eficiência em função dos pontos de extração da turbina, considerando os outros parâmetros como constantes. A Fig. 3 mostra dois gráficos de eficiência em função das pressões de extração da turbina para o fluido orgânico R134a com temperatura de evaporação de 85 °C, temperatura de superaquecimento de 140 °C e pressão de condensação de 1.000 kPa, para o ORC orgânico com uma e duas extrações respectivamente. Observa-se nos dois casos a existência única de um valor máximo do valor da eficiência considerando os valores de P1, pressão de extração, para o ciclo de uma extração e das possíveis combinações entre P1 e P2 no ciclo com duas extrações. P1 e P2 são as pressões das extrações (ciclo regenerativo de duas extrações) e que correspondem as pressões dos aquecedores de mistura 1 e 2, respectivamente. O aquecedor de mistura 1 (um) representa o aquecedor mais próximo do condensador, como ilustrado na Fig. 1.

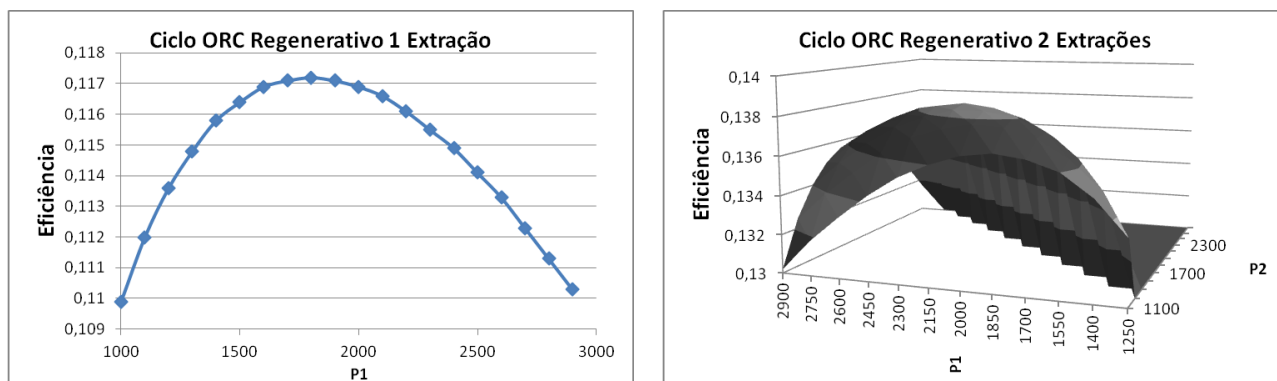


Figura 3 – Eficiência do ciclo ORC regenerativo em função das pressões de extração da turbina para o ciclo com uma e duas extrações.

As propriedades termofísicas do R134a geradas pelo programa EES foram comparadas com os dados fornecidos por Huber e McLinden (1992), com valores de diferença relativa inferiores a 1%. A temperatura crítica do R134a é de 101,08 °C e trata-se de um fluido utilizado para sistemas de baixa temperatura. A pressão de condensação utilizada para o Ciclo Rankine orgânico e Regenerativo orgânico foi de 1.000 kPa, que corresponde a uma temperatura de saturação aproximada de 40 °C.

As temperaturas de evaporação (T_{ev}) do ciclo variaram no intervalo entre 60 °C e 100 °C, enquanto que para a temperatura de superaquecimento (T_{sup}) foram adotados os seguintes valores 120 °C, 140 °C, 160 °C, 180 °C, 200 °C e 300 °C. Não se estendeu para valores de superaquecimento superior a 300 °C pois observa-se que a eficiência do ciclo cai quando se aumenta a temperatura de superaquecimento. Gráficos para temperaturas de superaquecimento de 140 °C a 180 °C não foram incluídas neste artigo pela limitação de espaço e por não representar um comportamento diferente ao esperado quando se muda a temperatura de superaquecimento de 120 °C para 200 °C.

As Fig. 4, 5 e 6 analisam o comportamento do trabalho da turbina para os ciclos Rankine convencional e ORC regenerativo com até quatro extrações em função da temperatura de evaporação (T_{ev}) e superaquecimento (T_{sup}). Ressalta-se que o valor do trabalho é no ponto de eficiência máxima do ciclo.

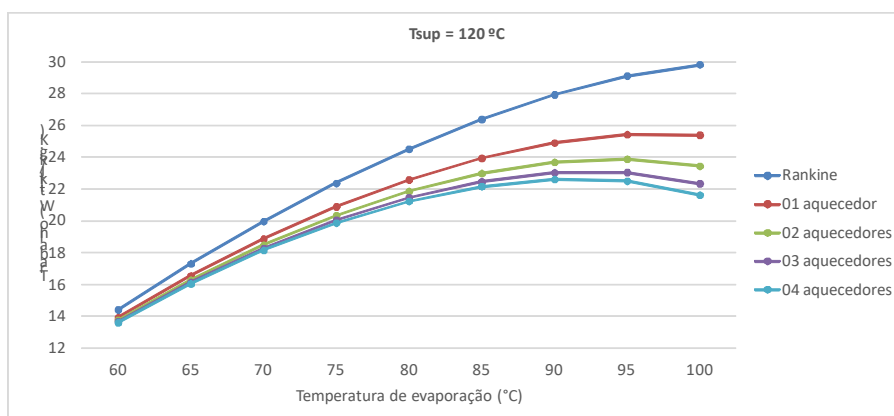


Figura 4 – Trabalho da Turbina do ORC regenerativo R134a até 4 extrações com superaquecimento de 120 °C.

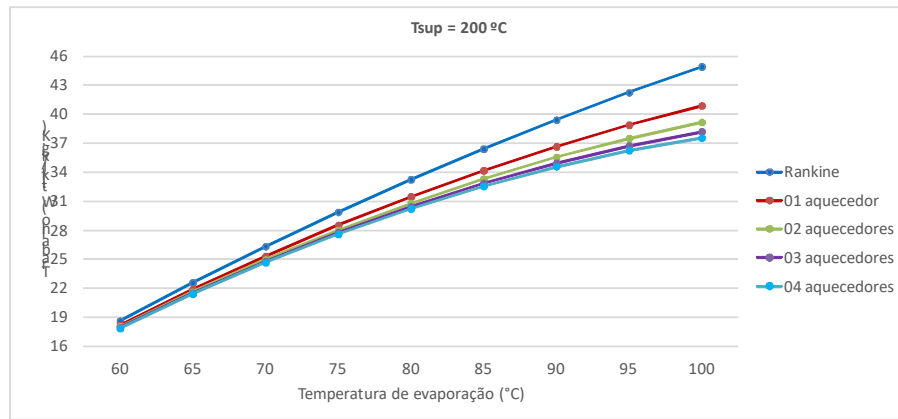


Figura 5 – Trabalho da Turbina do ORC regenerativo R134a até 4 extrações com superaquecimento de 200 °C.

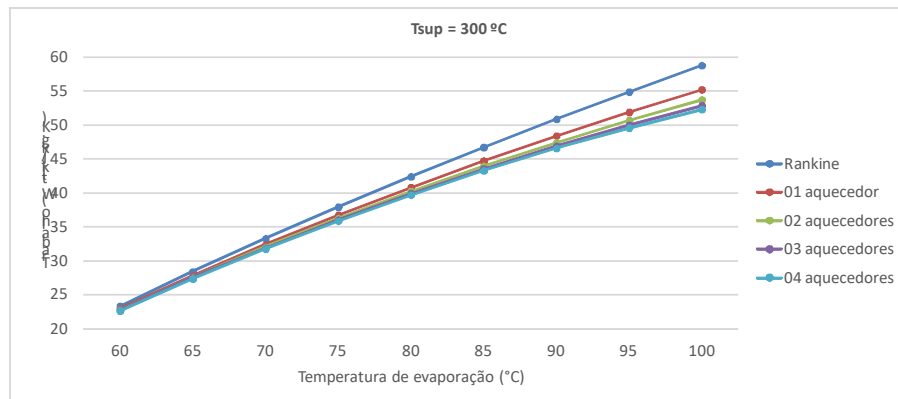


Figura 6 – Trabalho da Turbina do ORC regenerativo R134a até 4 extrações com superaquecimento de 300 °C.

Pode-se notar que para baixas temperaturas de superaquecimento (T_{sup}), como o caso da Fig. 4, o trabalho aumenta com a temperatura de evaporação (T_{ev}), até atingir um valor máximo e em seguida começa a reduzir. Para T_{sup} mais altas, Fig. 4 e 5, ocorre uma linearização das curvas de trabalho que continuam crescendo até a T_{ev} encontrar o seu valor máximo. Também se percebeu que para altos valores de T_{sup} , o valor do trabalho varia pouco em relação ao número de extrações.

As Fig. 7, 8 e 9, apresentam o comportamento da eficiência em função do número de extrações e da temperatura de evaporação (T_{ev}) para temperaturas de superaquecimento (T_{sup}) de 120 °C, 200 °C e 300 °C, respectivamente. Conforme se aumenta T_{ev} , a distância vertical entre cada curva vai se distanciando, tornando-se visível que quando se aumenta a temperatura de evaporação, a eficiência também aumenta, sem haver um valor de máximo.

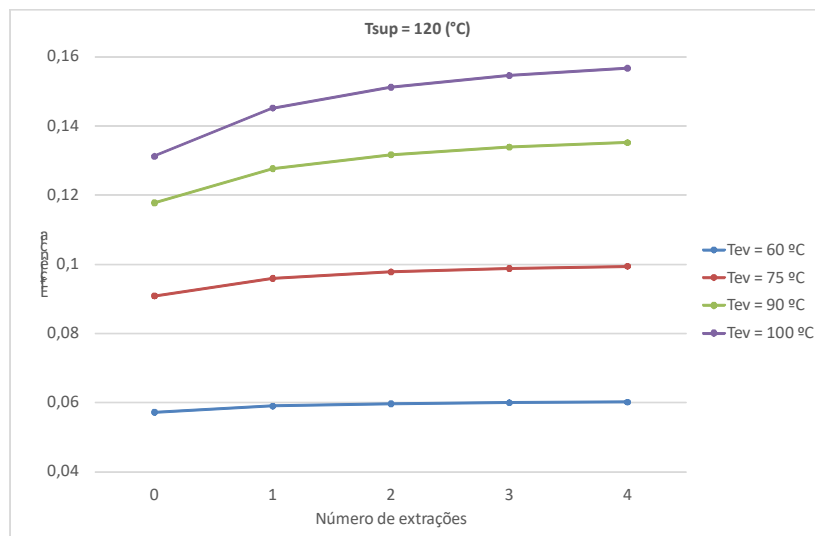


Figura 7 – Eficiência do ORC regenerativo R134a até 4 extrações com superaquecimento de 120 °C.

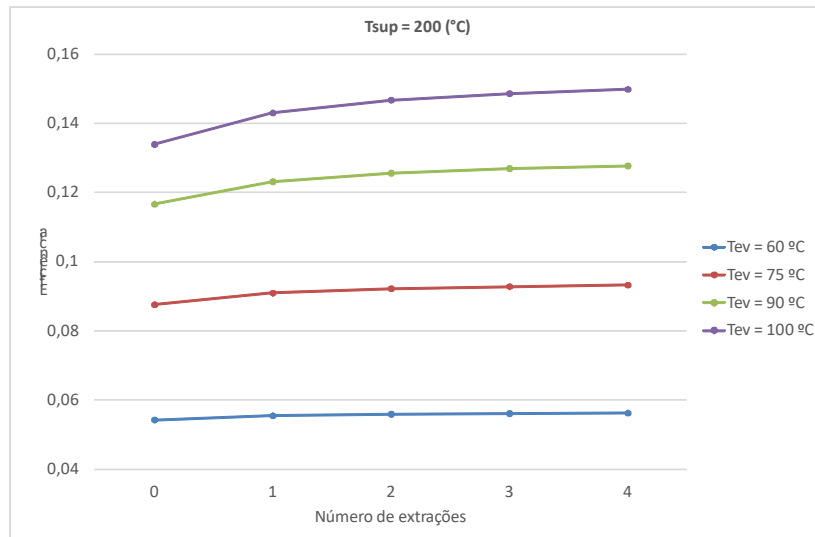


Figura 8 – Eficiência do ORC regenerativo R134a até 4 extrações com superaquecimento de 200 °C.

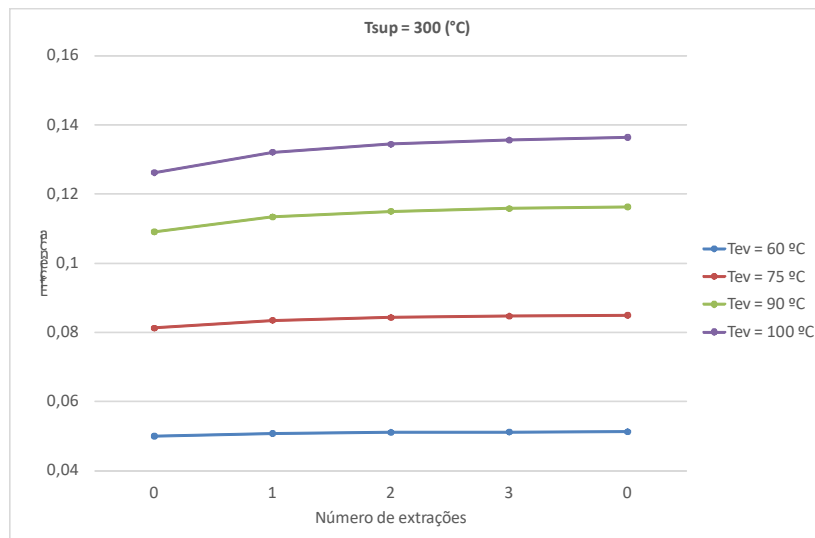


Figura 9 – Eficiência do ORC regenerativo R134a até 4 extrações com superaquecimento de 300 °C.

Os gráficos das Fig. 6 a 9 tornam visível o aumento da eficiência do ciclo regenerativo com o aumento do número de extrações. Para os três casos (temperatura de superaquecimento 120 °C, 200 °C e 300 °C), a eficiência possui um pequeno aumento, em torno de aproximadamente 5%, para situações de baixa temperatura de evaporação ($T_{ev} = 60$ °C e 75 °C). Na Fig. 7, há um aumento de aproximadamente 11 % na primeira extração, com $T_{ev} = 100$ °C, e de aproximadamente 5 % na segunda; e para $T_{ev} = 60$ °C o aumento da eficiência é de aproximadamente 3 % pra a primeira extração e de 1 % para a segunda.

Observa-se também que o incremento na eficiência é maior até a segunda extração, não sendo tão atrativo o ganho de eficiência após a terceira extração, sendo notado para temperatura de evaporação acima dos 75 °C.

Pode-se concluir com os gráficos da Fig. 4 a 9 que, do ponto de vista do trabalho da turbina, é interessante utilizar um alto valor para T_{sup} , caso esteja utilizando um ciclo regenerativo, pois assim se obtém um trabalho mais alto, porém o ciclo não estaria funcionando na eficiência máxima, pois as extrações diminuem o trabalho gerado pela turbina. No momento em que a eficiência é máxima para o ciclo com 1 extração na turbina, $T_{sup} = 120$ °C e $T_{ev} = 100$ °C, o trabalho total é de $W_t = 25,38$ kJ/kg.K. Enquanto que na Fig. 6, em que a $T_{sup} = 300$ °C, tem-se que $W_t = 55,16$ kJ/kg.K, ou seja, mais que o dobro do trabalho realizado. Entretanto, a eficiência no primeiro caso é de 14,52 % e de 13,21 % no segundo (ver Fig. 7 e 9), ou seja, embora o ciclo esteja realizando mais que o dobro do valor de trabalho, ele não está trabalhando na sua eficiência máxima.

Em um ciclo regenerativo com vapor superaquecido, a irreversibilidade dos aquecedores de mistura deriva da mistura de um líquido sub-resfriado com um fluido bifásico, saturado ou superaquecido. Segundo Bejan (1988), devido a essas irreversibilidades, a eficiência do ciclo regenerativo depende da distribuição dos aquecedores de mistura, principalmente da diferença de temperatura entre os dois aquecedores adjacentes. Haywood (1949) afirma que a diferença de entalpia na saída de um aquecedor de mistura e no adjacente deve ser constante para obter uma

produtividade máxima. A teoria de Haywood, apesar de ser apenas aproximada, sua simplicidade e capacidade de ilustrar os principais aspectos do problema faz com que valha a pena uma introdução útil ao assunto.

O problema de determinar a alocação ideal de um número finito de estágios é um tópico importante em projetos de usinas com turbinas a vapor. Souza (1980) conduziu uma análise gráfica de desempenho desse ciclo regenerativo com várias extrações visando uma "carnotização" do ciclo de Rankine. Em sua análise, ele observa que após 3 aquecedores de mistura é obtido um pequeno aumento na eficiência do ciclo.

Uma investigação sobre as afirmações de Haywood (1949) foi realizada para verificar quando a eficiência do ciclo regenerativo é máxima. A primeira hipótese a ser analisada é se a variação de entalpia antes e após o aquecedor de mistura, assim como para o condensador são constantes, ou seja, possui valores iguais. Observando a referência do ciclo da fig. 1, essa hipótese é verificar se $H_c - h_c = H_1 - h_1 = H_2 - h_2 = \dots = H_n - h_n$. A segunda hipótese é analisar se as variações de entalpia na saída de cada aquecedor de mistura adjacente são iguais e se a variação de entalpia na saída do último aquecedor com a entalpia na saída do condensador é um múltiplo da variação de entalpia dos aquecedores adjacentes.

Os resultados analisados mostram que a variação de entalpia através do aquecedor de mistura ($H_i - h_i$) aumenta com a temperatura de evaporação. Para temperatura de evaporação entre 60 °C e 85 °C os dados indicam que a diferença relativa entre dois aquecedores é menor do que 10 %, para temperatura de evaporação mais elevada, entre 85 °C e 100 °C atingiram valores máximos de 30 %. A tab 1 mostra a variação relativa máxima da variação de entalpia através do aquecedor de mistura em função da temperatura de evaporação e superaquecimento para o ciclo regenerativo orgânico R134a de duas e quatro extrações.

Tabela 1 – Aumento de entalpia através do aquecedor: variação relativa máxima entre aquecedores de mistura

Temp. Evap.	Temp Superaquecimento / 02 extrações			Temp Superaquecimento / 04 extrações		
	120 °C	200 °C	300 °C	120 °C	200 °C	300 °C
60 °C	2,6 %	1,4 %	0,6 %	4,8 %	2,9 %	1,1 %
70 °C	4,7 %	2,5 %	1,2 %	8,0 %	5,3 %	2,2 %
80 °C	5,9 %	3,9 %	2,0 %	10,0 %	8,0 %	3,6 %
90 °C	11 %	5,8 %	3,0 %	20,0 %	12 %	5,4 %
100 °C	18 %	8,4 %	4,3 %	30,0 %	18 %	8,0 %

Os dados obtidos e mostrados em forma de desvio relativo na tab. 1 indicam que a hipótese de Haywood (1949) que o aumento de entalpia através do aquecedor de mistura constante para que a eficiência seja máxima é evidenciado para cada temperatura de evaporação e superaquecimento. Desvios relativos maiores ocorrem apenas para temperaturas de evaporação acima de 85 °C e temperatura de superaquecimento de 120 °C e 200 °C. Os melhores valores relativos apresentados são para temperatura de superaquecimento de 300 °C, indicando que temperatura de superaquecimento alta também é importante para uma uniformidade da entalpia ao longo do aquecedor.

Outra suposição realizada na análise analítica de Haywood (1949) é considerar uma distribuição uniforme entre os aquecedores de mistura. Foi observado que a variação de entalpia entre os aquecedores são constantes, assim como também a diferença de entalpia entre o condensador e o primeiro aquecedor. É notado também que a diferença de entalpia na saída da turbina e a entalpia do líquido saturado na caldeira (campo de coletores), dividido pelo número de aquecedores é praticamente igual à diferença de entalpia entre cada aquecedor. A tab 2 mostra os resultados de valores máximos encontrados na comparação entre cada trecho de aquecedores adjacentes e trecho primeiro aquecedor-condensador, para ciclo regenerativo orgânico R134a de duas e quatro extrações.

Tabela 2 – Diferença de entalpia entre aquecedores: variação relativa máxima.

Temp. Evap.	Temp Superaquecimento / 02 extrações			Temp Superaquecimento / 04 extrações		
	120 °C	200 °C	300 °C	120 °C	200 °C	300 °C
60 °C	1,8 %	2,8 %	1,9 %	3,0 %	4,9 %	1,6 %
70 °C	3,1 %	4,3 %	5,6 %	3,1 %	5,1 %	7,1 %
80 °C	4,0 %	5,1 %	7,4 %	5,2 %	5,9 %	7,4 %
90 °C	5,0 %	7,2 %	9,1 %	5,7 %	9,2 %	13,3 %
100 °C	5,9 %	9,6 %	11,0 %	9,4 %	12,1 %	15,4 %

Assim como a tab. 1, a tab. 2 informa que para temperatura de evaporação abaixo de 85 °C a diferença relativa de entalpia entre aquecedores adjacentes é menor do que 8 %, podendo atingir 15 % em temperaturas de evaporação maiores. Isto demonstra que a distribuição dos aquecedores no ciclo regenerativo deve apresentar uma uniformidade para que o seu rendimento seja máximo. Neste caso, diferentemente da tab. 1 a diferença de entalpia apresenta melhores resultados, ou seja, uma distribuição mais constante, quanto menor for a temperatura de superaquecimento e de evaporação.

De forma geral, uma maneira de se obter uma eficiência próxima do valor máximo para um ciclo regenerativo orgânico com R134a é dividir a diferença de entalpia entre o líquido saturado na pressão de condensação (saída do condensador) e de evaporação (Caldeira) e dividir pelo número de extrações da turbina (números de aquecedores de mistura). Desta forma, pode-se encontrar a pressão de extração considerando líquido saturado na saída do aquecedor de

mistura. Esta condição resultará em uma diferença de temperatura uniforme ao longo do aquecedor de mistura, ou seja, diferenças de entalpia entre entrada e saída dos aquecedores são praticamente iguais.

5. CONCLUSÃO

Os ciclos regenerativos orgânicos já são aplicados na área de energia solar, mas sob condições de ciclo convencional, sem extração, ou apenas com uma extração. Com objetivo de um melhor entendimento do comportamento do ciclo regenerativo orgânico foram realizadas simulações deste ciclo com até 4 extrações da turbina, utilizando como fluido de trabalho o R134a, fluido para temperaturas baixas. As temperaturas de evaporação foram conduzidas entre 60 °C e 100 °C, enquanto a temperatura de superaquecimento foi considerada 120 °C, 200 °C e 300 °C. Assim, foi possível verificar o comportamento do trabalho por unidade de massa na eficiência máxima e os valores eficiência máxima em função do número de extrações da turbina, temperatura de superaquecimento e temperatura de evaporação.

Após obter as eficiências máximas e os trabalhos totais para cada ciclo (Rankine sem extrações, com 1, 2, 3 e 4 extrações) com o fluido de trabalho R134a, percebeu-se que a baixas temperaturas de superaquecimento a eficiência tem seu valor máximo. Para temperaturas de superaquecimento mais elevadas, 300 °C, não há uma variação de eficiência significativa quando aumenta-se o número de extrações da turbina.

Da mesma forma foi possível visualizar em temperaturas de superaquecimento baixas, 120 °C, há uma condição de trabalho máximo da turbina que não caracteriza que seja no ponto máxima eficiência, em que a temperatura de evaporação é 100 °C.

De forma geral, o fluido orgânico R134a possui melhor rendimento com altas temperaturas de evaporação e baixas temperaturas de superaquecimento. A eficiência cresce com o aumento do número de extrações, entretanto esse aumento é mais significativo para a primeira extração. E o trabalho total é máximo quando se aumenta a temperatura de superaquecimento e diminui o número de extrações.

Verificou-se também que uma forma para obter eficiência próxima do valor máximo do ciclo regenerativo é dividir a diferença de entalpia entre o líquido saturado na pressão de condensação e de evaporação pelo número de extrações da turbina (números de aquecedores de mistura). Sabendo-se que na saída do aquecedor tem-se condição de líquido saturado, determina-se a pressão pela entalpia calculada. Isto resulta em uma diferença de entalpia uniforme entre os aquecedores de mistura.

Agradecimentos

Os autores agradecem o Centro de Energias Renováveis (CER) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) pela infraestrutura para desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bao, Junjiang and Zhao, Li, 2013, A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, pp.325–342.
- Baral, S. e Kim, C. K., 2014, Thermodynamic Modeling of the Solar Organic Rankine Cycle with Selected Organic Working Fluids for Cogeneration. *Distributed Generation & Alternative Energy Journal*, v. 29, n. 3, pp. 7-34.
- Bejan, A., 1988, “Advanced Engineering Thermodynamics”, Ed. John Wiley & Sons, United States of America.
- Gang, Pei; Jinh, Li and Jie, Ji, 2010, Analysis of low temperature solar thermal electric generation using, regenerative Organic Rankine Cycle, *Applied Thermal Engineering*, 30, pp. 998–1004.
- Gu, Zhaolin e Sato, Haruki, 2002. Performance of supercritical cycles for geothermal binary design. *Energy Conversion and management*, vol. 43, no 7, p. 961-971
- Habibi, Hamed; Chitsaz, Ata; Javaherdeh, Koroush; Zoghi, Mohammad and Ayazpour, Mojtaba, 2018. Thermo-economic analysis and optimization of a solar driven ammonia-water regenerative Rankine cycle and LNG cold energy. *Energy*, vol. 149, pp 147-160
- Haywood, R. W. ,1949, “A Generalized Analysis of the Regenerative Steam Cycle for Finite Number of heaters”, *Proc. Inst. Mech. Eng.*, Vol. 161, pp. 157-162.
- He, Ya-Ling; Mei, Dan-Hua; Tao, Wen-Quan; Yang, Wei-Wei and Liu, Yang,i-Liang,2012, Simulation of the parabolic trough solar energy generation system with Organic Rankine Cycle, *Apply energy*, 97, pp. 630-641.
- Huber, M. L. e McLinden, M. O., 1992. Thermodynamic Properties of R134a: (1,1,1,2-tetrafluoroethane). In: *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. The Dupont Oval Logo, The miracles of scienceTM, and Suva, Índia: Purdue University.
- Imran, Muhammad; Park, B.S.; Kim, H.J.; Lee, D.H.; Usman, M. and Heo, M., 2014. Thermo-economic optimization of Regenerative Organic Rankine Cycle for waste heat recovery applications. *Energy Conversion and Management*, vol. 87, p. 107-118.
- Lakew, Amlaku Abie e Bolland, Olav., 2010. Working fluids for low-temperature heat source. *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, no 10, p. 1262-1268.

- Sauret, Emilie e Rowlands, Andrew S., 2011. Candidate radial-inflow turbines and high-density working fluids for geothermal power systems. *Energy*, vol. 36, no 7, p. 4460-4467.
- Silva, L. S., 2015. Análise de ciclos regenerativos em centrais térmicas solares considerando a máxima eficiência do ciclo. Trabalho de Conclusão de Curso, Eng Mecânica, UFPE.
- Souza, Zulcy de, 1980. Elementos de Máquinas Térmicas, Ed. Campus, São Paulo-SP.
- Velez, F., Segovia, J.J., Martin, M.C., Antolin, G., Chejne, F. and Quijano, A., 2012. A Technical, economical, and Market review of organic Rankine cycles for conversion of low grade heat of power generation. *Renewable and Sustainable Reviews*, vol.16, pp 4175 - 4189.
- Vieira da Cunha, A. F.; Fraidenraich, N., 2012. Análise Do Rendimento Ótimo De Um Ciclo Regenerativo Com Uma, Duas e Três Extrações da Turbina, CONEM 2012.
- Wylen, Gordon J. and Sonntag, Richard E., 1993. “Fundamentos da Termodinâmica Clássica”, 3o edição, Ed. Edgard Blucher, São Paulo, SP.

ANALYSIS OF A REGENERATIVE ORC AND ITS APPLICATION IN SOLAR ENERGY

Abstract. *The present work analyzes organic regenerative cycles, aiming at its application in solar energy. Simulations of an organic regenerative cycle with up to 4 extractions were carried out in order to analyze the behavior of maximum efficiency and the work generated in the turbine. R134a was used as an organic fluid, used in low temperature cycles. Evaporation temperature data between 60 °C and 100 °C and superheat temperatures equal to 120 °C, 200 °C and 300 °C were tested for cycle analysis. Thus, it was possible to verify the work behavior and maximum efficiency depending on the number of extractions, overheating temperature and evaporation temperature. The models and simulations were made using the Engineering Equation Solver (EES) software and the results were analyzed in Excel. It was concluded that the maximum efficiency increases with the increase of the evaporation temperature and the number of extractions, however it decreases with the increase of the superheat temperature, since the work of the turbine grows by increasing the evaporation and superheat temperatures, but decreases with the increase in extractions.*

Key words: *Solar Energy, Regenerative Organic Rankine Cycle, R134a Refrigerant*