

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

ANÁLISE TÉCNICA E ECONÔMICA DA INTEGRAÇÃO DA TECNOLOGIA DE CONCENTRAÇÃO SOLAR DE POTÊNCIA DE MÉDIA TEMPERATURA COM CICLO RANKINE ORGÂNICO

Diego Luís Izidoro Silva, diegolisilva@live.com¹

Victor Andrés Patiño Mantilla, victor_pama@hotmail.com¹

Júlian Camilo Restrepo Lozano, jcrestrepol@hotmail.com¹

Osvaldo José Venturini, osvaldo@unifei.edu.br¹

José Carlos Escobar Palacio, jocesobar@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Avenicda BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-Minas Gerais, Brasil

Resumo: Nas últimas décadas, a procura mundial por energia para atender o consumo da população cresceu constantemente e, conseqüentemente, a geração de eletricidade por meio de combustíveis fósseis aumentou. Isto desencadeou vários problemas ambientais, como a poluição do ar, o aquecimento global e a destruição da camada de ozônio. A demanda mundial por energia deverá continuar crescendo. Devido à dependência das fontes de energia baseadas em carbono, as emissões de CO₂ e outros gases de efeito estufa na atmosfera aumentam cada vez mais, e tais recursos também são esgotáveis. A fim de minimizar os impactos negativos no meio ambiente causados pela utilização de combustíveis fósseis e o seu uso inadequado, é necessário o uso de fontes de energia mais "limpas" e processos de conversão de energia mais eficientes. Nesse contexto, a energia solar tem ganhado destaque mundial. A energia do sol pode ser aproveitada tanto para gerar energia elétrica quanto para gerar energia em forma de calor, sendo pesquisadas e desenvolvidas diferentes tecnologias. Entre as alternativas, a tecnologia conhecida como Concentrated Solar Power (CSP) mostra grande potencial, para num futuro se posicionar como fonte pioneira de geração de eletricidade. Neste artigo, uma análise técnica e econômica do potencial de geração de eletricidade por meio de cilindros parabólicos é realizada. Nessa tecnologia, um fluido é utilizado no sistema para absorver a radiação direta do Sol que é concentrada num ponto ou área por espelhos refletores. Para a conversão em energia elétrica é utilizado um ORC (ciclo Rankine orgânico). O ORC é similar ao ciclo Rankine convencional, porém utiliza compostos orgânicos como fluidos de trabalho, o que lhe confere maior flexibilidade e a possibilidade de ser utilizado em diferentes níveis de temperatura e associados a diferentes fontes de calor. Primeiramente, foram definidas as condições de operação do sistema solar. Os parâmetros como radiação do projeto e múltiplo solar são calculados e otimizados para gerar a temperatura necessária para o sistema ORC ser mais eficiente. Em seguida uma análise do ORC com diferentes fluidos foi realizada. Por fim uma análise econômica do sistema conjunto foi realizada. Os resultados mostram que é possível converter a energia térmica em energia elétrica com bons níveis de eficiência e custos razoáveis.

Palavras-chave: ciclo Rankine orgânico, concentrador solar, conversão de energia.

1. INTRODUÇÃO

A dependência do uso intensivo dos recursos no renováveis do planeta aumenta o índice de emissões para o ambiente e a progressiva proliferação dos gases de efeito estufa. Visando a melhorar o gerenciamento desses recursos, a maioria dos países do mundo chegaram a acordos para mitigar esses efeitos. O uso de fontes renováveis vem-se desenvolvendo positivamente nos últimos anos e assim, a sua integração na geração de energia elétrica para fornecer as necessidades energéticas das pessoas. Uma dessas fontes é a energia solar, é a forma de energia disponível em maior quantidade em nosso planeta, sendo também uma da forma mais instável em seu uso. A energia heliotérmica é gerada da conversão de irradiação solar em calor, onde as temperaturas podem alcançar valores elevados (acima de 1000 °C). De acordo com o *Global Status Report* (REN21, 2015), a geração de energia heliotérmica no ano de 2014 no mundo foi de 4,4 GW, tendo um aumento de 27% da quantidade gerada no ano anterior de 3,4GW em usinas elétricas com tecnologia de concentração solar ou CSP (REN21, 2015). A energia heliotérmica pode ser captada em diferentes faixas de temperaturas a partir de várias tecnologias, sendo: cilindro parabólico, torre central, disco parabólico e refletores

lineares de Fresnel. As três primeiras tecnologias estão compostas por: coletor, receptor, armazenamento, transporte e, por último, um conversor (ciclo) de potência (Karni, 2011). O objetivo do presente estudo é avaliar o uso da energia solar como fonte de calor para o ciclo Rankine orgânico (*Organic Rankine Cycle* - ORC). O ORC é útil e muito eficiente quando se tem energia térmica a baixas e médias temperaturas (de 80°C até cerca 400°C). Nessa faixa de temperatura, utilizar um fluido orgânico no ciclo Rankine ao invés de água é mais viável economicamente. Assim, neste trabalho um sistema de captação de energia solar é utilizado para coletar energia térmica e transferir para o ORC onde esta energia é convertida em elétrica. O sistema integrado Solar/ORC é então analisado técnica e economicamente.

2. CONCENTRADOR SOLAR CILINDRO PARABÓLICO

Das tecnologias CSP, o concentrador solar cilindro parabólico é o mais usado no mundo. Eles são formados por espelhos de vidro delgado ou de vidro espesso, formando uma calha cilíndrica com uma linha focal no centro onde é alocado um receptor que geralmente é um tubo no vácuo que absorve as altas temperaturas concentradas pelo cilindro, e aquece um fluido de trabalho, conhecido como fluido de transferência de calor (*Heat Transfer Fluid* - HTF). Dependendo do fluido utilizado, podem ser alcançadas temperaturas superiores a 400°C. O fluido é bombeado para passar por um trocador de calor que posteriormente entra num ciclo termodinâmico para a conversão de energia elétrica. O aumento da eficiência dos sistemas heliotérmicos é baseado na análise e otimização de quatro fatores: coleta da irradiação solar, conversão em calor, transporte e armazenamento do calor e conversão final em eletricidade. Na coleta da irradiação encontra-se a mais importante etapa para o aproveitamento final de energia, assim torna-se necessário para estes sistemas realizar o seguimento do sol, e posicionar o equipamento sempre perpendicular aos raios solares. Plantas de geração com esta tecnologia começam pelo campo solar, que é um arranjo de vários coletores cilindro parabólico que, orientados na direção Norte-Sul ou Sul-Norte dependendo da localização da planta, rastreiam o Sol em seu movimento diário na direção Leste-Oeste. Na Tabela 1 são apresentadas as maiores usinas termelétricas de cilindro parabólico.

Tabela 1. Usinas heliotérmicas cilindro parabólico maiores de 100 MW adaptado de Tian *et al.* (2013).

Nome	Potência (MW)	País	Armazenamento térmico
Solar Energy Generating Systems	354	EUA	Sem informação
Solana Generating Station	280	EUA	Sais fundidas (6 horas de armazenagem)
Genesis Solar	250	EUA	Sem informação
Ashalim Power Station	250	Israel	Sem informação
Solnova	150	Espanha	Sem informação
Andasol	150	Espanha	Sais fundidas (7,5 horas de armazenagem)
Palma del Rio Solar	100	Espanha	Sem informação

O coletor cilindro parabólico está composto principalmente por:

- Calha refletor cilindro parabólico
- Receptor ou tubo absorvedor
- Sistema de rastreamento solar de 1 eixo
- Estrutura

3. CICLO RANKINE ORGÂNICO

O ORC possui a mesma configuração do ciclo Rankine convencional, mas ao invés de água, usa substâncias orgânicas com baixos pontos de ebulição como fluidos de trabalho (Bao *et al.*, 2013). Nos últimos anos, o ORC tornou-se popular nos processos de geração de energia devido ao fato de possibilitar o aproveitamento de calor à baixa temperatura (Schuster *et al.*, 2009). O ORC utiliza um fluido de trabalho orgânico. Ele oferece vantagens em relação ao ciclo Rankine convencional com água, já que utiliza fontes de calor a baixas e médias temperaturas com alta eficiência.

A configuração básica do ORC consiste de quatro equipamentos principais: bomba, evaporador (ou gerador de vapor), turbina (ou expansor) e condensador. A figura 1 mostra um esquema com os principais componentes do ciclo. Entre as vantagens apresentadas pelos sistemas ORC estão (F. Tchanche *et al.*, 2014):

- a) Adaptabilidade a várias fontes de calor;
- b) Tecnologia bem desenvolvida;
- c) Menor complexidade e menos manutenção;
- d) Possibilidade de uso em pequenas escalas;
- e) Sistema de geração distribuída;
- f) Baixos custos de investimento e manutenção.

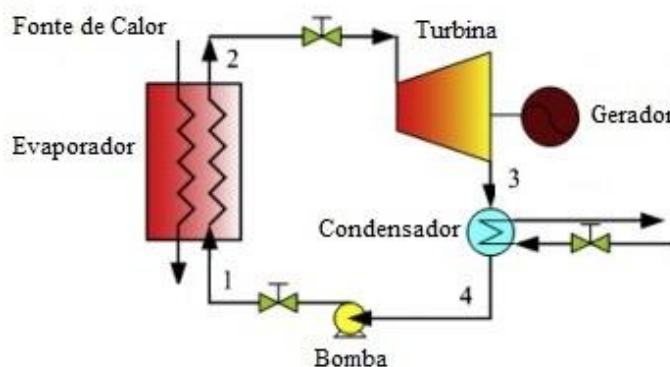


Figura 1. ORC básico, adaptado de Li *et al.* (2014)

Os ciclos Rankine orgânicos podem utilizar diferentes fluidos de trabalho, a fim de explorar as fontes de calor para produzir trabalho útil (Vaja *et al.*, 2009). A seleção de fluido de trabalho é muito importante para o desempenho do ORC, uma vez que influencia diretamente a eficiência do sistema, o tamanho e concepção dos componentes, a estabilidade, a segurança, os impactos ambientais (Schuster *et al.*, 2009), as condições gerais de funcionamento e a viabilidade econômica (Chen *et al.*, 2010).

No entanto, a escolha do fluido mais adequado depende de vários fatores, incluindo a temperatura da fonte de calor e o tamanho da planta (Pasetti *et al.*, 2014). As propriedades termofísicas ótimas do fluido dependem integralmente da temperatura da fonte quente (Carcasci *et al.*, 2014).

O ORC tem sido aplicado para a geração de energia a partir de diferentes fontes de energia, incluindo calor residual industrial, energia solar, energia geotérmica, energia de biomassa e energia dos oceanos (Bao *et al.*, 2013). Entre as fontes de calor residual incluem-se motores de combustão interna e turbina a gás (Feng *et al.* 2015).

A tecnologia ORC tem potencial para facilitar o abastecimento de energia elétrica em áreas não conectadas, a auto produção de energia, a dessalinização da água do mar para consumo humano, ou mesmo o aumento da eficiência energética no setor industrial (Vélez *et al.*, 2012).

A versatilidade bem como a possibilidade do uso para diferentes gamas de temperatura permite ao ORC a utilização como um ciclo secundário, integrado a processos de plantas já existentes ou como um ciclo principal, podendo atuar com produção combinada de calor e energia elétrica (Combined Heat and Power - CHP) (Vélez *et al.* 2012). A Figura 2 mostra um diagrama das possibilidades de aplicação do ORC.

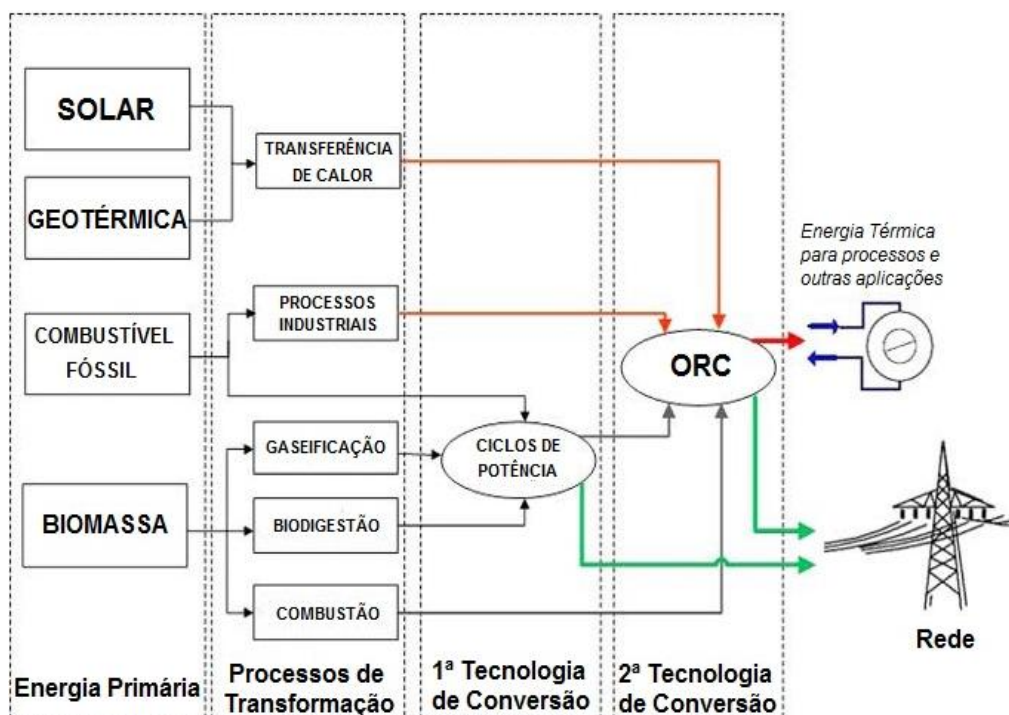


Figura 2. Diagrama das possíveis aplicações do ORC de acordo com a fonte de energia, adotado de Vélez *et al.* (2012)

4. METODOLOGIA

O trabalho foi desenvolvido inicialmente com o programa SAM. Este *software* baseia-se na modularidade do programa *TRaNsient SYstems Simulation* (TRNSYS) que é amplamente usado para simular aplicações de energia solar e especificamente analisar sistemas com coletor calha cilindro-parabólico, como é explicado por Patnode (2006).

Para modelar sistemas com coletor calha cilindro-parabólico o *software* sugere duas opções de modelos os quais são um modelo físico e outro empírico. A diferença é que o segundo modelo tem medições das estações de geração de energia solar (*Solar Energy Generation Stations* - SEGS) e possui as equações para calcular as propriedades do fluido térmico (Poghosyan *et al.*, 2015).

Após a simulação do campo solar, o ORC foi simulado utilizando a ferramenta *Coolprop* (Bell *et al.*, 2014) em conjunto com o Microsoft Excel. Por meio do *Coolprop*, são fornecidas as propriedades de mais de 100 fluidos conhecidos. Para esta simulação foram escolhidos cinco fluidos: benzeno, ciclohexano, ciclopentano, m-xileno e tolueno. Estes fluidos foram escolhidos devido a bons resultados em trabalhos anteriores para os mesmos níveis de temperatura em questão.

A figura 3 mostra o diagrama esquemático do sistema ORC integrado aos coletores solares.

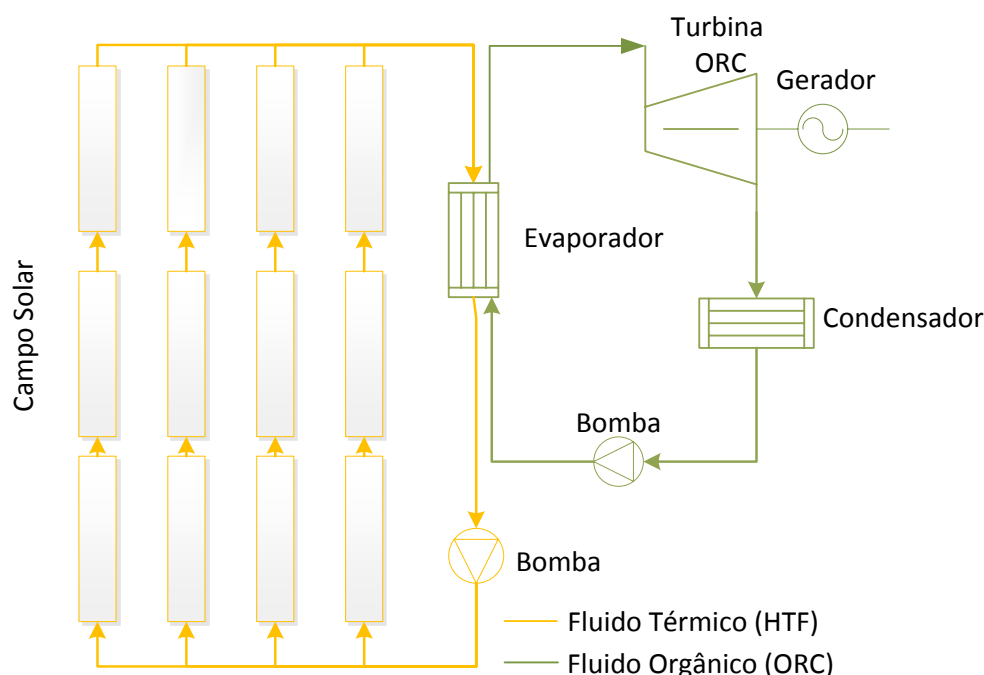


Figura 3. Diagrama esquemático do sistema integrado ORC/Solar

4.1. Simulação dos coletores solares

Para a simulação no SAM, é necessário escolher uma localidade. Na biblioteca de dados climatológicos do programa, estão disponíveis mais de vinte localidades para o Brasil. Neste trabalho foram feitas as simulações para o município de Bom Jesus de Lapa, estado da Bahia. De acordo com Burgi (2013), que avaliou o potencial da tecnologia CSP no Brasil, essa cidade se encontra numa região com irradiação média acima de $2000 \text{ W}_h/\text{m}^2/\text{ano}$, valor alto e por isso recomendado para instalação de plantas solares. Esse critério foi o mesmo utilizado nos trabalhos de (Burgi, 2013) e (Szklo, 2014). A irradiação normal direta (DNI) mínima recomendada para projetos de CSP varia desde (1700 até $2400 \text{ W}_h/\text{m}^2/\text{ano}$) (Malagueta, 2014).

A tabela 2 mostra os dados que foram utilizados para definir os parâmetros na localização e fonte no SAM. Para o dimensionamento, também é necessário definir a irradiação do projeto e o múltiplo solar. A irradiação do projeto é a irradiação em W/m^2 para a qual é dimensionada a área de abertura dos espelhos para operar a etapa de potência. Para as simulações foi adotado o valor de radiação média diária de $718 \text{ W}_h/\text{m}^2$, resultado das iterações do modelo SAM.

O Múltiplo Solar é adimensional, sendo a proporção da área do campo solar construído em relação à área do campo solar necessário para acionar o bloco de potência com as condições da irradiação de projeto. Neste trabalho foi definido o múltiplo solar igual a 1, para realizar comparações foi variado o múltiplo solar, o campo vai ser dimensionado sem sistema auxiliar gerador de energia e sem armazenamento térmico. Segundo Malagueta (2014), uma das recomendações técnicas para selecionar a irradiação de projeto é que seja calculada perto da máxima radiação direta incidente. Se a localidade se encontra mais distante da linha do Equador, em sistemas de rastreamento em um eixo, caso

do cilindro parabólico, a energia que incide por metro quadrado será menor que a irradiação solar direta (DNI), e de acordo com esses fatores a estimativa pode se realizar tendo em conta as condições principais da planta.

Tabela 2. Dados de localização e climatológicos para a cidade Bom Jesus de Lapa

Informação da localidade	Cidade	Bom Jesus de Lapa
	Estado	Bahia
	Fuso horário	GMT -3
	Elevação	458 m
	Fuente dos dados	SWERA
	Latitude	13,27 °N
	Longitude	43,42 °E
	ID da Estação	832880
Dados climatológicos anuais	Irradiação normal direta (DNI)	6,02 kWh/m ² /dia
	Irradiação horizontal difusa	1,84 kWh/m ² /dia
	Temperatura Média	26,1 °C
	Velocidade média do vento	1.6 m/s

No design do campo solar, foi selecionado o fluido térmico (HTF): Hitec Solar Salt (60% NaNO₃ e 40%KNO₃) disponível na biblioteca do SAM, para as simulações do projeto em questão. Foram calculadas as propriedades termodinâmicas do fluido térmico para obter os valores das entalpias nas temperaturas de trabalho. Para as condições simuladas, o fluido térmico entra no condensador a 400°C e sai a 250°C (a temperatura não pode ser abaixo de 238°C para não haver problema de solidificação do fluido). A tabela 3 mostra as propriedades desse fluido para os valores de temperaturas adotados. Esta tabela foi obtida pelas equações fornecidas no manual de referência SAM para sistemas CSP e pela monografia de Milani (2014) (National Renewable Energy Laboratory 2009).

Tabela 3. Propriedades do fluido térmico Hitec Solar Salt.

Temperatura	°C	250	400
Capacidade térmica	J/kg°C	1486	1512
Massa específica	kg/m ³	1931	1836
Viscosidade	Pa.s	0,47	0,61
Viscosidade cinemática	m ² s x 10 ³	0,24	0,33
Condutividade térmica	W/m°C	0,49	0,519
Entalpia	kJ/kg	366,13	590,96

4.2. Simulação do ORC

O ciclo Rankine orgânico foi simulado na configuração básica do sistema, mostrado na figura 1. Os equipamentos básicos do sistema são: evaporador, turbina, condensador de bomba. Para esta simulação foram escolhidos cinco fluidos: benzeno, ciclohexano, ciclopentano, m-xileno e tolueno. As seguintes condições foram adotadas nas simulações dos sistemas:

- O sistema foi considerado com fluxo constante em regime permanente e as quedas de pressão nos trocadores de calor e tubulações foram desprezadas (as variações de pressão são admitidas apenas na turbina e na bomba);
- As variações de energia cinética e potencial foram desprezadas;
- As eficiências isentrópicas da bomba e da turbina foram assumidas como 90% e 70%, respectivamente;
- As efetividades dos trocadores de calor (evaporador e condensador), foram assumidas como 80%;
- A temperatura de condensação (T_{con}) mínima foi definida como 35°C;
- A pressão de condensação (P_{con}) mínima para os fluidos foi definida como 5 kPa;
- O *pinch point* (ΔT_{pp}) mínimo admitido para o evaporador foi de 10°C e para o condensador, 5°C;
- A temperatura máxima de evaporação para o benzeno foi definida em 263°C, para o ciclohexano, de 268°C, para o ciclopentano, 210°C, para o m-xileno, 330°C e para o tolueno, 300°C.
- A temperatura de referência para o cálculo da exergia foi definida em 298 K.
- O fluido deixa o condensador no estado de líquido saturado, o fluido sai do evaporador no estado de vapor saturado.

Para o cálculo das propriedades termodinâmicas dos fluidos foi utilizada a ferramenta Coolprop (Bell *et al.*, 2014). A vazão mássica de fluido de trabalho foi calculada por meio da equação 1, levando em conta as entalpias de entrada e saída da fonte quente e a efetividade do evaporador. Com o valor da vazão de fluido, foram calculados a taxa de transferência de calor no evaporador ($\dot{Q}_{evap}$) e no condensador ($\dot{Q}_{cond}$), a potência consumida na bomba ($\dot{W}_{bomba}$), a potência mecânica gerada na turbina ($\dot{W}_{turb}$), a potência elétrica no gerador ($\dot{W}_{ger}$), a potência líquida do sistema ($\dot{W}_{liq}$), o trabalho reverso (bwr), e a eficiência térmica do ciclo (η_{ciclo}). Para esses cálculos foram utilizadas as equações 2 a 9.

$$\dot{m}_{ft} = \frac{\dot{m}_{fq}(h_A - h_B)\varepsilon_{evap}}{(h_2 - h_1)} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m}_{ft}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{m}_{ft}(h_3 - h_4) \quad (3)$$

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{m}_{ft}(h_1 - h_4) \quad (4)$$

$$\dot{W}_{turb} = \dot{m}_{ft}(h_2 - h_3) \quad (5)$$

$$\dot{W}_{ger} = \eta_{ger}\dot{W}_{turb} \quad (6)$$

$$\dot{W}_{liq} = \dot{W}_{ger} - \dot{W}_{bomb} \quad (7)$$

$$bwr = \frac{\dot{W}_{bomb}}{\dot{W}_{turb}} \quad (8)$$

$$\eta_{ciclo} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{Q}_{fq}} = \frac{\dot{W}_{liq}}{\dot{m}_{fq}(h_A - h_B)} \quad (9)$$

4.3. Análise econômica

Das simulações realizadas com as ferramentas do SAM, foram calculados os custos do campo solar com o custo do fluido térmico. Esse valor é estimado pela NREL na tabela 3, que é baseado no custo do concentrador solar SkyTrough. Definido como \$170/m², e o custo do HTF \$70/m² (Kurup *et al.*, 2015). A área total utilizada na planta foi considerada em 5 acres, sendo que 4 acres é a área necessária para o campo solar, isto é um total de 16.187,44 m². A 4 apresenta os custos totais dos equipamentos utilizados no campo solar por m² de campo

Tabela 4. Custos totais estimados do campo solar instalado por m².

Descrição dos equipamentos	Custo (US\$/m ²)
Transporte	2
Suportes do Receptor	5
Cabeamento elétrico	5
Suportes do Refletor	5
Fundações	9
Unidade e controle	19
Receptores	22
Refletor	44
Estrutura	49
Outros	10
Total	170

Para os cálculos econômicos do ORC, para as estimativas de custo foi utilizada a metodologia presente em (Turton *et al.* 2012), que utiliza a Técnica de Custeio de Módulo (*Module Costing Technique - MCT*) para o cálculo dos custos de investimento para um projeto de uma planta industrial. Esta técnica é geralmente aceita como a melhor para estimar os custos preliminares de uma planta, quando não se tem disponíveis os custos exatos dos equipamentos.

Os custos base dos equipamentos (C_B^0) são calculados por meio da equação 10, onde A refere-se à capacidade do equipamento, que para a bomba e turbina trata-se da potência e para os trocadores, a área de troca de calor. Os coeficientes K são relativos ao tipo de equipamento utilizado. Por meio da equação 11, calcula-se o custo do módulo total do equipamento, já levando em conta fatores diversos como tipo de material, pressão de trabalho, custos de instalação, etc. Os coeficientes B são relativos ao tipo de equipamento. Os fatores F_{MOD} , F_M e F_P são relacionados ao material e a pressão de trabalho. Por fim, atualiza-se o custo, utilizando a equação 12, com o CEPCI (*Chemical Engineering Plant Cost Index*), que é um Índice para correção de preços devido à inflação. Os custos são calculados com base no ano de 2001, portanto, é necessário usar o índice para corrigir o valor.

$$\log_{10} C_B^0 = K_1 + K_2 \cdot \log_{10} A + K_3 \cdot (\log_{10} A)^2 \quad (10)$$

$$C_{MOD} = C_B^0 F_{MOD} = C_B^0 (B_1 + B_2 F_M F_P) \quad (11)$$

$$C_{ORC,dez/2015} = \frac{CEPCI_{dez/2015}}{CEPCI_{2001}} C_{ORC,2001} \quad (12)$$

O passo seguinte na análise econômica é calcular o custo de investimento total anual (C_{IA}), com base no custo total do sistema ORC/solar ($C_{ORC,dez/2015}$) conforme equação 13.

$$C_{IA} = \frac{i(1+i)^t}{(1+i)^t - 1} C_{ORC,dez/2015} \quad (13)$$

Para a taxa de juros foram (i) considerados valores de 2% a 14%. O tempo de vida útil da planta (t) foi definido como 30 anos.

Por último, foi calculado o Custo Nivelado de Energia (*Levelized Cost of Energy* – LCOE). Este custo é definido como a soma dos custos de investimento (C_i) com todos os gastos de operação e manutenção (O&M) ao longo de toda a vida útil da planta dividido pelo valor acumulado de energia gerada por este investimento (Pawel 2014). Para o cálculo do LCOE, foi utilizada a equação 14. Os custos de investimento e de operação e manutenção anuais foram considerados, assim como a energia gerada, a qual é calculada pelo produto da potência líquida do sistema ($\dot{W}_{liq}$) pelas horas de operação anuais (H_A).

$$LCOE = \frac{C_{IA} + O\&M_A}{\dot{W}_{liq} H_A} \quad (14)$$

Os custos anuais de operação e manutenção ($O\&M_A$) foram assumidos como 3% do custo de investimento anual (C_{IA}). A quantidade de horas anuais de operação (H_A) foi definida como 8000 horas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base na metodologia descrita no tópico anterior, a figura 4 mostra a variação de potência líquida gerada pelo ORC para diferentes pressões de evaporação para cada um dos cinco fluidos analisados.

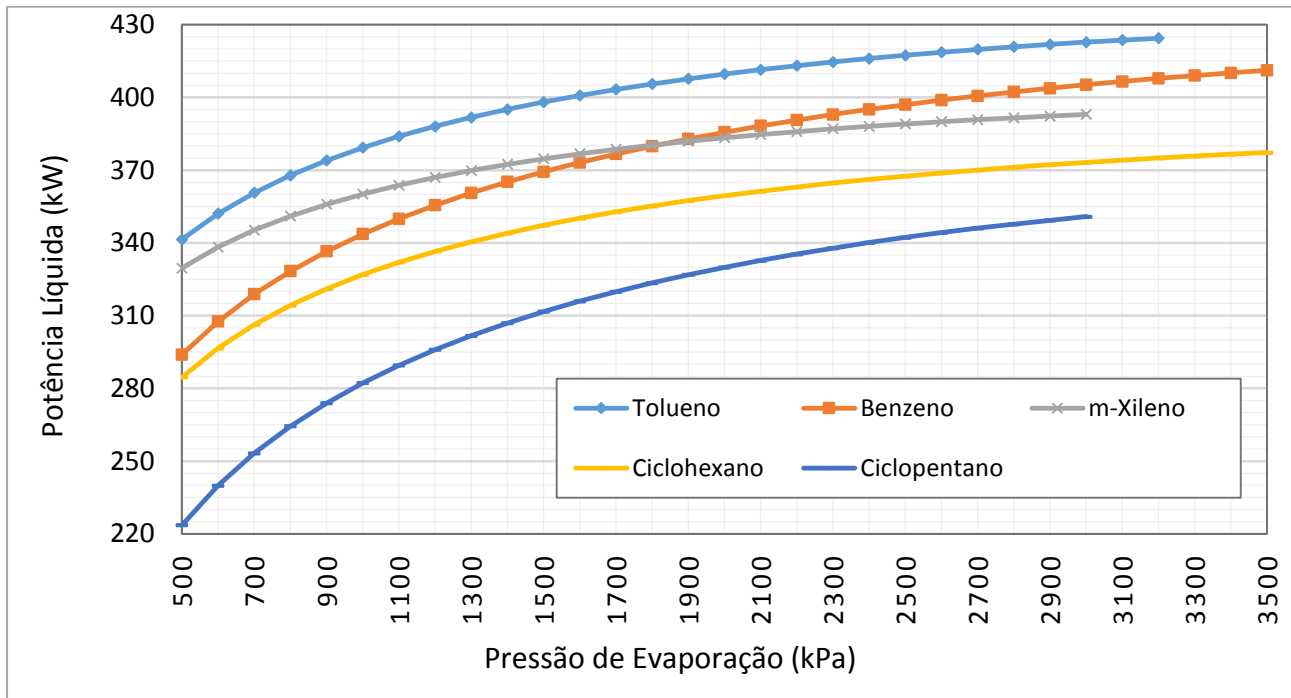


Figura 4. Potência líquida do ORC para os fluidos analisados em função da pressão de evaporação

A tabela 5 mostra as eficiências e potências máximas alcançadas para cada fluido de trabalho operando no sistema integrado Solar/ORC.

Tabela 5. Melhores resultados da análise termodinâmica para cada fluido

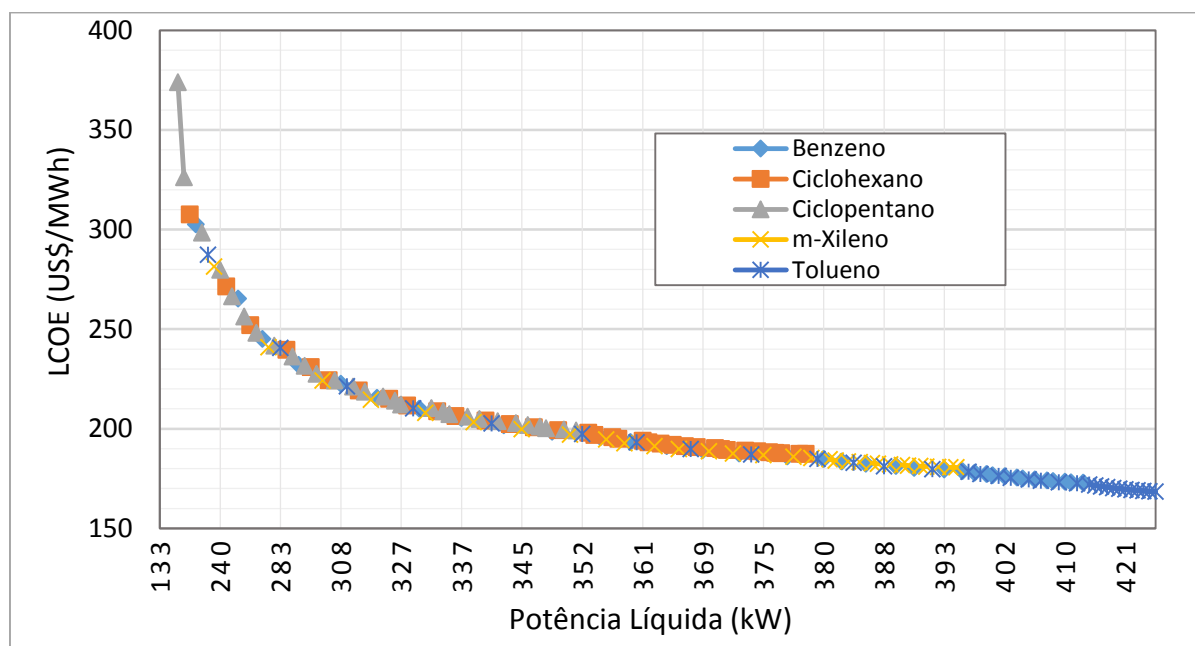
Fluido	Pevap (kPa)	Pcond (kPa)	Tevap (°C)	Tcond (°C)	m'fluido (kg/s)	BWR	Wliq (kW)	Eficiência
Tolueno	3268	6	300	35	2,7	2,6%	424,9	16,8%
Benzeno	3530	20	263	35	3,0	3,1%	411,5	16,2%
m-Xileno	3001	5	330	54	2,6	2,5%	393,0	15,5%
Ciclohexano	3508	20	268	35	2,8	3,5%	377,3	14,9%
Ciclopentano	3062	62	210	35	3,4	4,0%	351,7	13,9%

Com base na figura 4, observa-se que o tolueno apresentou os melhores valores de eficiência térmica para as diferentes pressões de evaporação simuladas. O ciclopentano apresentou os piores resultados. A medida que a pressão aumenta, a eficiência do ciclo também aumenta. Assim, os melhores resultados para o tolueno foram obtidos com pressão de evaporação de 3.268 kPa, com uma temperatura de 300°C no evaporador. A eficiência para o caso foi de 16,8% e a potência líquida gerada foi de 425 kW. Em segundo lugar, aparece o benzeno com eficiência de 16,2% e potência de 412 kW.

Levando em consideração a eficiência apenas dos coletores solares, que, de acordo com o SAM é de 68,4%, a eficiência global do sistema integrado solar/ORC operando com tolueno é de 11,5%.

Quanto à análise econômica, o custo do campo solar foi estimado em 2,75 milhões de dólares e o custo do HTF (fluido térmico) foi de 1,13 milhões. Já o ORC, apresentou custos de 1,36 milhões para o tolueno, totalizando um custo de 5,24 milhões para todo o sistema integrado. O sistema de coletores solares representa, portanto, quase 75% do custo total da planta.

A figura 5 mostra a variação dos valores de LCOE para os fluidos analisados em função da potência líquida para uma taxa de juros anuais de 10% para o investimento. Os valores de LCOE foram calculados para todo o sistema solar/ORC.

**Figura 5. Valor de LCOE para o ORC para os fluidos analisados para uma taxa de juros de 10%**

Com base na figura 5, observa-se que tolueno e benzeno também apresentaram os menores valores para o Custo Nivelado de Energia (LCOE). No entanto, assim como na eficiência, o tolueno tem ligeira vantagem. Com uma potência líquida de 425 kW, o LCOE para o todo o sistema integrado solar/ORC é de 168,42 US\$/MWh para uma taxa de juros de 10%. Para um cenário mais favorável (taxa de 2%), o LCOE é de 70,89 US\$/MWh. Estes valores são relativamente altos em comparação com outras fontes de energia. No entanto, o sistema ainda pode ser otimizado para que os resultados sejam melhores. Além disso, as suas tecnologias analisadas estão em constante desenvolvimento, o que implica numa redução de preços a médio prazo. Levando em consideração esses dois fatos e considerando uma situação econômica favorável, além de incentivos governamentais, a tecnologia ORC/solar pode ser uma opção interessante para geração alternativa (e limpa) de energia.

6. CONCLUSÕES

Neste artigo é apresentado o dimensionamento de um campo solar com concentrador solar de calhas cilíndricas parabólicas para alimentar um Ciclo Rankine orgânico (ORC). Foram desenvolvidas simulações com as ferramentas do modelo SAM, para o design do mesmo, após o dimensionamento foi desenvolvido a modelagem do ORC integrado para

o sistema de geração de energia elétrica. Foi simulado um campo solar com área de 16 mil m² e foram analisados cinco fluidos orgânicos para o ORC (tolueno, benzeno, m-xileno, ciclohexano e ciclopentano). O fluido térmico do campo solar foi admitido estar a uma temperatura de 400°C na entrada do evaporador do ORC e 250°C na saída. Nestas condições, os melhores de eficiência e potência líquida e de custos foram apresentados pelo tolueno para uma temperatura de evaporação de 300°C. A eficiência do ORC foi para o caso de 16,8% com geração de uma potência líquida de 425 kW. A eficiência global do sistema integrado foi de 11,5%.

O custo do campo solar foi estimado em 2,75 milhões de dólares e o custo do HTF (fluido térmico) foi de 1,13 milhões. Já o ORC, apresentou custos de 1,36 milhões para o tolueno, totalizando um custo total de 5,24 milhões para todo o sistema. O sistema de coletores solares representa, portanto, quase 75% do custo total da planta. Os valores de LCOE para o sistema foram de 168,42 US\$/MWh para uma taxa de juros anuais de 10% para o investimento, a qual representa um custo elevado se comparado com outras formas de geração de energia elétrica. O sistema, no entanto, pode ser otimizado e os resultados podem ser melhorados. Por fim, a tecnologia solar/ORC ainda é alvo de desenvolvimento e representa uma potencial alternativa para a geração de energia para o futuro, num cenário econômico melhor e com possíveis incentivos governamentais.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento do Ensino Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo apoio financeiro para a execução deste trabalho.

8. REFERÊNCIAS

- Bao, Junjiang, and Li Zhao. 2013. "A Review of Working Fluid and Expander Selections for Organic Rankine Cycle." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 24 (August): 325–342. doi:10.1016/j.rser.2013.03.040.
- Bell, Ian H, Jorrit Wronski, Sylvain Quoilin, and Vincent Lemort. 2014. "Pure and Pseudo-Pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp." *Industrial & Engineering Chemistry Research* 53 (6): 2498–2508. doi:dx.doi.org/10.1021/ie4033999.
- Burgi, Adriano Salvi. 2013. "AVALIAÇÃO DO POTENCIAL TÉCNICO DE GERAÇÃO ELÉTRICA TERMOSSOLAR NO BRASIL A PARTIR DE MODELAGEM EM SIG E SIMULAÇÃO DE PLANTAS VIRTUAIS Adriano." *Dissertação M. Sc. PPE*.
- Carcasci, Carlo, Riccardo Ferraro, and Edoardo Miliotti. 2014. "Thermodynamic Analysis of an Organic Rankine Cycle for Waste Heat Recovery from Gas Turbines." *Energy* 65 (February): 91–100. doi:10.1016/j.energy.2013.11.080.
- Chen, Huijuan, D. Yogi Goswami, and Elias K. Stefanakos. 2010. "A Review of Thermodynamic Cycles and Working Fluids for the Conversion of Low-Grade Heat." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (9) (December): 3059–3067. doi:10.1016/j.rser.2010.07.006.
- F. Tchanche, Bertrand, M. Pétrissans, and G. Papadakis. 2014. "Heat Resources and Organic Rankine Cycle Machines." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 39 (November): 1185–1199. doi:10.1016/j.rser.2014.07.139. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032114005917>.
- Feng, Yongqiang, Yaning Zhang, Bingxi Li, Jinfu Yang, and Yang Shi. 2015. "Sensitivity Analysis and Thermoeconomic Comparison of ORCs (organic Rankine Cycles) for Low Temperature Waste Heat Recovery." *Energy* 82 (March): 664–677. doi:10.1016/j.energy.2015.01.075.
- Karni, Jacob. 2011. "Solar Energy: The Thermoelectric Alternative." *Nature Materials* 10 (7): 481–482. doi:10.1038/nmat3057.
- Kurup, Parthiv, Craig S Turchi, Parthiv Kurup, and Craig S Turchi. 2015. "Parabolic Trough Collector Cost Update for the System Advisor Model (SAM) Parabolic Trough Collector Cost Update for the System Advisor Model (SAM)" (November).
- Li, Saili, and Yiping Dai. 2014. "Thermo-Economic Comparison of Kalina and CO₂ Transcritical Power Cycle for Low Temperature Geothermal Sources in China." *Applied Thermal Engineering* 70 (1) (September): 139–152. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.04.067.
- Malagueta, Diego Cunha. 2014. "AVALIAÇÃO DE ALTERNATIVAS PARA INTRODUÇÃO DA GERAÇÃO ELÉTRICA TERMOSSOLAR NA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA." *Igarss 2014* (1): 1–5. doi:10.1007/s13398-014-0173-7.2.
- National Renewable Energy Laboratory, NREL. 2009. "Solar Advisor Model Reference Manual for CSP Trough Systems" (July).
- Pasetti, Marco, Costante M. Invernizzi, and Paolo Iora. 2014. "Thermal Stability of Working Fluids for Organic Rankine Cycles: An Improved Survey Method and Experimental Results for Cyclopentane, Isopentane and N-Butane." *Applied Thermal Engineering* 73 (1) (December): 764–774. doi:10.1016/j.applthermaleng.2014.08.017.
- Patnode, Am. 2006. "Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants." *University of Wisconsin-Madison*: 5–271.
- Pawel, Ilja. 2014. "The Cost of Storage – How to Calculate the Levelized Cost of Stored Energy (LCOE) and Applications to Renewable Energy Generation." *Energy Procedia* 46: 68–77. doi:10.1016/j.egypro.2014.01.159.
- Poghosyan, V, and Mohamed I Hassan. 2015. "Techno-Economic Assessment of Substituting Natural Gas Based

- Heater with Thermal Energy Storage System in Parabolic Trough Concentrated Solar Power Plant.” *Renewable Energy* 75: 152–164. doi:10.1016/j.renene.2014.09.025.
- REN21. 2015. “Key Findings.” *Global Status Report*: 1–33. doi:SAIREC, South Africa International Renewable Energy Conference.
- Schuster, a., S. Karellas, E. Kakaras, and H. Spliethoff. 2009. “Energetic and Economic Investigation of Organic Rankine Cycle Applications.” *Applied Thermal Engineering* 29 (8-9) (June): 1809–1817. doi:10.1016/j.applthermaleng.2008.08.016. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431108003645>.
- Szklo, Alexandre Salem. 2014. “Análise Paramétrica De Uma Planta Csp-Iscc De Trigeração Para Um Hospital Em Bom Jesus Da Lapa.”
- Tian, Y., and C.Y. Zhao. 2013. “A Review of Solar Collectors and Thermal Energy Storage in Solar Thermal Applications.” *Applied Energy* 104 (April): 538–553. doi:10.1016/j.apenergy.2012.11.051. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261912008549>.
- Turton, Richard, Richard C Bailie, Wallace B Whiting, Joseph A Shaeiwitz, and Debansu Bhattacharyya. 2012. *Analysis, Synthesis, and Design of Chemical Processes Fourth Edition*. 4th ed. Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.
- Vaja, Iacopo, and Agostino Gambarotta. 2010. “Internal Combustion Engine (ICE) Bottoming with Organic Rankine Cycles (ORCs).” *Energy* 35 (2) (February): 1084–1093. doi:10.1016/j.energy.2009.06.001.
- Vélez, Fredy, José J. Segovia, M. Carmen Martín, Gregorio Antolín, Farid Chejne, and Ana Quijano. 2012. “A Technical, Economical and Market Review of Organic Rankine Cycles for the Conversion of Low-Grade Heat for Power Generation.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16 (6) (August): 4175–4189. doi:10.1016/j.rser.2012.03.022.

9. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE INTEGRATION OF SOLAR POWER CONCENTRATION TECHNOLOGY OF MEDIUM TEMPERATURE WITH ORGANIC RANKINE CYCLE

Diego Luís Izidoro Silva, diegolisilva@live.com¹

Victor Andrés Patiño Mantilla, victor_pama@hotmail.com¹

Júlian Camilo Restrepo Lozano, jcrestrepol@hotmail.com¹

Osvaldo José Venturini, osvaldo@unifei.edu.br¹

José Carlos Escobar Palacio, jocesobar@unifei.edu.br¹

¹Universidade Federal de Itajubá, Avenicda BPS, 1303, Pinheirinho, Itajubá-Minas Gerais, Brasil

Abstract. In recent decades, the global demand for energy to meet the consumption of the population has grown steadily and consequently the generation of electricity through fossil fuels increased. This triggered several environmental problems such as air pollution, global warming and the destruction of the ozone layer. Global demand for energy is expected to continue growing. Due to the dependence on carbon-based energy sources, CO₂ emissions and other greenhouse gases in the atmosphere increase more and more, and these resources are also exhaustible. In order to minimize negative impacts on the environment caused by the use of fossil fuels and their misuse, the use of more energy sources "clean" and more efficient energy conversion processes is necessary. In this context, solar energy has gained worldwide prominence. The sun's energy can be harnessed both to generate electricity and to generate energy as heat, being researched and developed different technologies. Among the alternatives, the technology known as Concentrated Solar Power (CSP) shows great potential for a future position itself as a pioneer source of electricity generation. In this article, a technical and economic analysis of the potential of electricity generation through parabolic cylinder is performed. In this technology, a fluid is used in the system to absorb the direct radiation from the sun is concentrated at one point or area by reflecting mirrors. For conversion into electricity is used one ORC (organic Rankine cycle). ORC is similar to the conventional Rankine cycle, but using organic compounds as a working fluid, which gives greater flexibility and the ability to be used in different temperature levels and associated to different heat sources. First, they defined the solar system operating conditions. The parameters such as solar radiation and multiple design are calculated and optimized to generate the necessary temperature ORC system to be more efficient. Then an analysis of ORC was performed with different fluids. Finally, an economic analysis of the whole system was performed. The results show that it is possible to convert thermal energy into electrical energy with high levels of efficiency and reasonable costs.

Keywords: organic Rankine cycle, solar concentrator, energy conversion.