



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPT/27

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO -NNN

GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT

METODOLOGIA PARA COMPARAÇÃO DE SISTEMAS SOLARES COM CONCENTRAÇÃO

Pablo de A. Lisboa(*)

Leonardo dos S. R. Vieira

Ana Paula C. Guimarães

Marcel S. Alves

CEPEL

CEPEL

CEPEL

UNIFEI

RESUMO

Este Informe Técnico apresenta uma metodologia de comparação entre sistemas solares com concentração por meio da definição de indicadores de desempenho e de custo normalizados. Com base nestes indicadores foi calculado um índice global, para comparação dos sistemas, todos com potência líquida de 1MWe e simulados utilizando-se um programa computacional desenvolvido em linguagem MATLAB. Foram avaliados sistemas que utilizam fluido térmico e sistemas de geração direta de vapor. No bloco de potência, foram consideradas diferentes alternativas para os fluidos de trabalho: água ou fluidos orgânicos, operando em ciclos Rankine subcríticos ou supercríticos.

PALAVRAS-CHAVE

Geração heliotérmica, calha parabólica, geração direta de vapor, Rankine orgânico, Rankine supercrítico

1.0 - INTRODUÇÃO

Atualmente a maioria das plantas solares com concentração (CSP – Concentrated Solar Power) é do tipo cilindro/calha parabólicas (PTC – “Parabolic Through Collector”). Estas operam por meio de um fluido térmico para realizar a transferência de calor (HTF – “Heat Transfer Fluid”) entre os coletores e o ciclo de potência, geralmente baseado em um ciclo Rankine a vapor (RC – “Rankine Cycle”). Nestes casos, um trocador de calor (gerador de vapor) é utilizado para transferir a energia do fluido térmico aquecido para a água, transformando-a em vapor. Este tipo de sistema tem temperatura máxima limitada à temperatura máxima de operação do fluido térmico, que nas plantas que utilizam óleo térmico sintético (maior parte delas), é de 400°C. Mais recentemente têm sido desenvolvidas plantas que utilizam sal fundido como fluido de trabalho, podendo trabalhar em temperaturas mais elevadas, em torno de 550°C.

Nos sistemas baseados em HTF há perdas nos trocadores de calor, onde o vapor é gerado, o que compromete a eficiência global do sistema. Em função disso, novos conceitos estão sendo propostos, dentre eles, a geração direta de vapor (DSG – “Direct Steam Generation”) dentro dos coletores solares, abandonando-se, assim, o uso do gerador de vapor (Feldhoff *et al* (1)). Uma outra alternativa tecnológica consiste em se trocar a água como fluido de trabalho no ciclo de potência por um fluido orgânico. Os fluidos orgânicos permitem trabalhar em temperaturas mais baixas, evitando perdas no campo solar. Neste caso, a geração de eletricidade é obtida em um ciclo semelhante ao Rankine, denominado Rankine orgânico (ORC – “Organic Rankine Cycle”).

Com relação ao ciclo termodinâmico de geração de energia elétrica (Rankine ou Rankine orgânico), existem as alternativas de se trabalhar com o fluido de trabalho em condições subcríticas ou supercríticas (SC). Ciclos

operando em condições supercríticas são, em geral, mais eficientes porque atingem condições de temperatura mais elevadas no evaporador. Estas condições dependem das características do fluido de trabalho. No caso de fluidos orgânicos, as condições supercríticas são alcançadas em temperaturas inferiores aos sistemas operando com vapor d'água.

Conforme é possível verificar nos parágrafos anteriores, para sistemas CSP ainda não há uma rota tecnológica preferencial, mesmo considerando apenas os sistemas do tipo calha parabólica. Assim, torna-se desejável a avaliação de indicadores de desempenho e de custo para comparação de sistemas distintos, como proposto neste trabalho. Os indicadores calculados foram obtidos para cada sistema por meio de simulações computacionais e, em seguida, foram adimensionalizados e normalizados, permitindo uma comparação entre todos os sistemas.

Os indicadores de desempenho e de custo avaliados foram os seguintes: i) eficiência líquida global (relação entre o trabalho líquido gerado e o aporte de fluxo de calor ao sistema); ii) eficiência relativa a Carnot (relação entre a eficiência líquida global e a eficiência de um ciclo de Carnot, operando nas mesmas temperaturas do ciclo); iii) relação de potência reversa (quociente entre o consumo nas bombas e a potência líquida no sistema); iv) número de coletores solares (indicativo da área ocupada pela planta); v) custo do sistema (soma do custo dos componentes do sistema). Com base nestes indicadores, um índice global foi determinado para comparação final dos sistemas.

2.0 - AVALIAÇÃO TÉCNICA E ECONÔMICA

Para a definição dos sistemas a serem avaliados técnica e economicamente os seguintes projetos foram utilizados como referência:

- Projeto HELIOTERM: Planta piloto em desenvolvimento no Brasil, utilizando óleo como fluido de transferência de calor (HTF) e um ciclo Rankine a vapor - RC, operando a 40bar@375°C, com potência de 1 MWe (Vieira *et al.*(2));
- Projeto DUKE: Planta piloto de teste e demonstração, desenvolvida pela parceria entre a Alemanha e Espanha, utilizando a tecnologia DSG com ciclo Rankine a vapor - RC, operando a 112bar@500°C, com potência instalada de 3 MWe (Feldhoff (3));
- Usina de SAGUARO: Planta comercial desenvolvida nos EUA, utilizando óleo como fluido de transferência de calor (HTF) e um ciclo Rankine orgânico - ORC, operando a 22bar@204°C, com potência instalada de 1 MWe (Broehl (4)).

Observa-se que os projetos de referência diferem no tipo de fluido de transferência de calor e no tipo de ciclo de potência para geração de eletricidade. Com base nestes três projetos de referência, foram desenvolvidos modelos matemáticos semi-empíricos para as configurações de plantas CSP apresentadas na Figura 1. Os modelos foram aplicados a plantas com potência de 1 MWe. As duas primeiras configurações (Figuras 1 (a) e 1 (b)) utilizam óleo como fluido de transferência de calor (HTF) e as outras duas (Figuras 1 (c) e 1 (d)) utilizam a tecnologia DSG (sem gerador de vapor). Para cada uma delas foram considerados dois ciclos de conversão do calor em energia elétrica: Rankine convencional - RC e Rankine Orgânico - ORC. Para o caso dos ciclos orgânicos foi avaliada, ainda, a operação com fluido orgânico operando na condição supercrítica (SC).

Nos casos de sistemas operando com ciclo Rankine orgânico, foram investigados diferentes fluidos de trabalho. Todos os sistemas foram simulados utilizando um programa computacional desenvolvido em linguagem MATLAB, usando tabelas termodinâmicas de referência do NIST (Alves (5)).

As análises térmica e econômica foram realizadas com base nos resultados das simulações por meio da obtenção de indicadores de desempenho e de custo. Os indicadores usados são descritos na seção 2.2.

2.1 Modelagem matemática

O programa computacional, desenvolvido em linguagem MATLAB, é capaz de dimensionar todos os componentes da planta e simular o seu desempenho térmico. Além disso, o programa estima o custo total considerando individualmente os custos dos componentes dimensionados.

O modelo considera a perda de carga dentro dos equipamentos e negligencia as perdas nas tubulações, sendo desprezadas também as variações de energia potencial e cinética. O programa atua de forma iterativa. A cada iteração, os diversos componentes interligados são dimensionados individualmente e sequencialmente até completar o ciclo da planta. Com base em um critério de convergência, as iterações são interrompidas e obtém-se o dimensionamento completo do sistema. O processo considera vários parâmetros, tais como o número de coletores, área dos trocadores de calor e a eficiência térmica do ciclo. A potência líquida, o tipo de fluido de trabalho e a metodologia de transferência de calor são fornecidos pelo usuário. Neste trabalho, a potência considerada foi de 1 MWe.

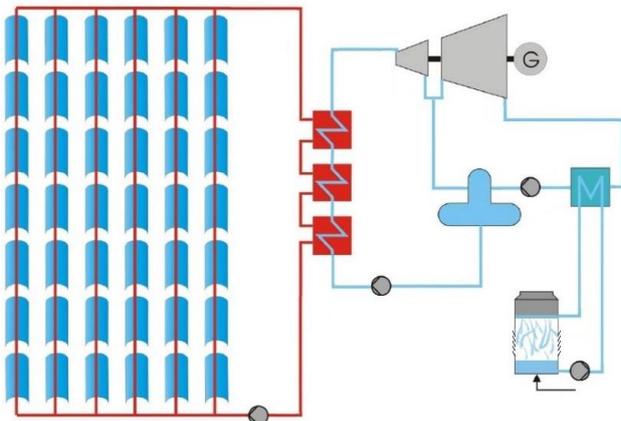


FIGURA 1(a) - Planta HTF usando RC

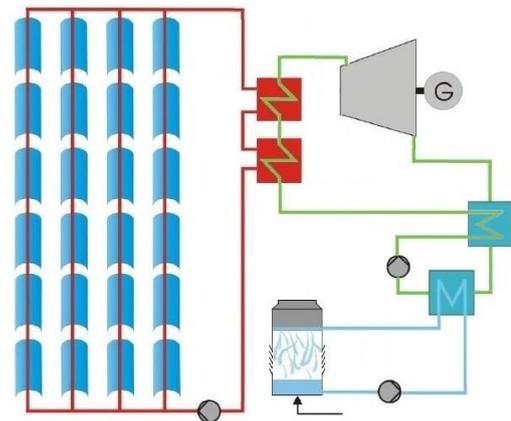


FIGURA 1 (b) - Planta HTF usando ORC e SC-ORC.

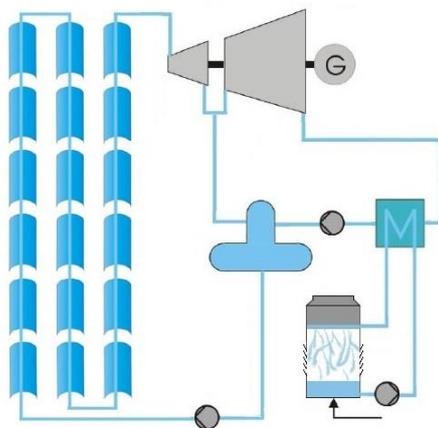


FIGURA 1 (c) - Planta DSG usando RC.

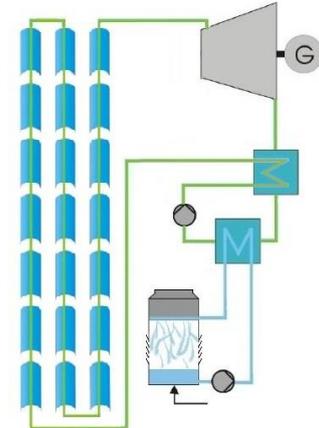


FIGURA 1 (d) - Planta DSG usando ORC e SC-ORC.

FIGURA 1 – Configurações de sistemas CSP utilizadas nas análises.

A modelagem considera os seguintes componentes principais:

- Bombas: são utilizadas nos sistemas de circulação do fluido de transferência de calor, sistema principal de alimentação, extração do condensador (quando utilizada a água no ciclo de potência) e sistema de arrefecimento. Nos ciclos Rankine tradicionais, o consumo da bomba do sistema principal é baixo comparado à potência do ciclo. Já nos sistemas ORC a irreversibilidade da bomba pode diminuir substancialmente o rendimento global do ciclo, uma vez que a vazão mássica das mesmas é mais alta. Para fluidos inorgânicos, como a água, podem-se estimar valores de eficiência do bombeamento como de 80%. Já para sistemas que operam com fluidos que apresentam viscosidade muito baixa, como é o caso dos fluidos orgânicos, a eficiência foi estimada na faixa de 60 a 75% (Quoilin *et al.*(6)).
- Turbina: para o uso de fluido inorgânico, foi considerada uma turbina radial de reação com condensação, possuindo uma extração de 0,076% da vazão nominal a uma pressão de 5,6 bar. A turbina considerada possui dois estágios, sendo as suas eficiências de 78% (primeiro estágio) e de 85% (segundo estágio) (TGM (7)). Já com o uso de fluidos orgânicos, é adotada uma turbina axial e, em geral, operando acima da pressão ambiente. Devido a sua geometria simplificada, as turbinas de sistemas ORC apresentam eficiências isentrópicas superiores a 90%. Essas turbinas foram dimensionadas considerando um único estágio, com eficiência de 90% (TURBODEN (8)).
- Coletor solar: o modelo matemático para estimar a eficiência do coletor é atrelado somente à variação de temperatura, mantendo-se a temperatura ambiente e a irradiação constantes (Alves (5)). Foi adotada a curva de perda térmica das análises experimentais, elaborada por Feldhoff (3), o que permitiu o desenvolvimento de uma curva de eficiência atrelada à temperatura. O coletor utilizado em todas as análises foi o modelo LS-3 (Price *et al.* (9); Odeh, (10)).
- Trocadores de calor: foram adotados evaporadores do tipo casco e tubo, dimensionados para um “pinch point” de 30 °C. Os condensadores e recuperadores também foram escolhidos do tipo casco e tubo, dimensionados para um “pinch point” de 10°C. O dimensionamento dos trocadores de calor foram baseados nas equações propostas por Kakaç (11) e os dados construtivos seguiram o padrão da TEMA (Tubular Exchanger Manufacturers Association). No caso, foram adotados tubos de diâmetros de ¾”, com 12 BWG de espessura.

- Fluido de trabalho: os fluidos de trabalho considerados, os seus principais parâmetros de operação no ciclo Rankine e seus custos encontram-se na Tabela 1.

TABELA 1 – Parâmetros dos fluidos de trabalho utilizados nas simulações.

Fluido	Massa molar [g/mol]	Tcrit [°C]	Pcrit [bar]	To [°C]	Po [bar]	Tsc [°C]	Psc [bar]	Custo
R245fa	134,05	154,01	36,51	135,86	26,19	163,05	40,16	3391,2 (US\$/kg)
R245ca	134,05	174,42	39,25	160,15	30,64	183,15	43,18	45684 (US\$/kg)
R365mfc	148,07	186,85	32,66	178,85	28,43	194,23	35,93	12312 (US\$/kg)
Isopentano	72,15	187,20	33,78	179,10	29,81	195,33	37,16	187 (US\$/l)
Pentano	72,15	196,55	33,70	185,64	28,50	204,93	37,07	251 (US\$/l)
Isohexano	70,13	238,54	45,15	225,03	37,84	247,92	49,67	6280 (US\$/kg)
Ciclopentano	86,18	234,67	30,34	232,32	29,42	241,69	33,37	548 (US\$/l)
Hexano	162,38	245,55	19,39	239,94	17,75	252,44	21,33	142,66 (US\$/l)
Dimetil carbonato	100,20	266,98	27,36	264,94	26,57	274,34	30,10	219 (US\$/l)
Ciclohexano	78,11	288,87	49,06	270,26	38,86	299,95	53,97	342 (US\$/l)
Metilciclohexano	296,62	313,34	13,32	307,39	12,21	319,73	14,65	606 (US\$/l)
Tolueno	128,26	321,40	22,81	313,04	20,31	328,74	25,09	51 (US\$/l)
Propilciclohexano	444,92	372,63	9,61	368,90	9,09	377,97	10,57	38240 (US\$/kg)
Estearato de metila	296,49	508,85	12,46	504,25	11,57	514,32	13,71	954 (US\$/l)
Oleato de metila	294,47	525,85	13,41	516,15	11,81	530,98	14,75	2744 (US\$/kg)
Água	18,015	373,95	220,64	371,00	40,00	500,00	112,00	20 (US\$/kg)

- Custo: O levantamento do custo global de cada sistema foi determinado com base no custo individual de cada subsistema da planta, dimensionados pelo programa computacional desenvolvido. Os cálculos foram baseados no modelo de fatores individuais de Guthrie (1969), onde cada subsistema apresenta um custo base (BC), e este valor é corrigido em função de parâmetros de operação e do material dos mesmos. O método adotado pode implicar em um erro na faixa de 15 a 25% no custo do componente. O custo base dos subsistemas é determinado com base na expressão abaixo:

$$BC = C_0 \left(\frac{S}{S_0} \right)^\alpha$$

onde C_0 e α são o custo base inicial e o fator de ajuste da curva de custo, S é o tamanho do sistema considerado e S_0 é o tamanho máximo do sistema, conforme indicado na Tabela 2, juntamente com os outros parâmetros.

TABELA 2 – Equações de custo por equipamento.

Equipamento	Unidade	C_0 [103 US\$]	S_0	Alcance da formula (S)	α
Trocador de calor	ft ²	0,3	5,5	2-100	0,024
		5	400	100-10000	0,65
Turbina	Hp	23	100	30-10000	0,77
Arrefecimento a ar	ft ² /15,5	3	200	100-10000	0,82
Bomba centrífuga	gpm/psi	0,39	10	10-2000	0,17
		0,65	2000	2000-20000	0,36
		1,5	20000	20000-200000	0,64
Campo solar	m	0,19	Tecnologia convencional		
		0,24	Tecnologia DSG		

O custo base de cada subsistema é então corrigido pelo fator MPF, que depende do material ou das condições operacionais. A obtenção do seu valor é demonstrado na Tabela 3. O custo final de cada subsistema é ainda corrigido pelos fatores 1,76 e 1,75, respectivamente para cobrir as despesas com instalação e a correção da inflação para a data base considerada (dezembro de 2012).

Em todas as simulações foram considerados os seguintes parâmetros. i) irradiação solar nominal do ponto de projeto: 850 W/m²; ii) Temperatura ambiente: 35°C; iii) Umidade relativa do ar: 43%; iv) Potência líquida: 1Mwe; v) Coletor solar modelo LS-3; vi) Absorvedores modelos Schott PTR-70 (configuração HTF) e Schott PTR-80-DSG (configuração DSG). A irradiação, a temperatura ambiente e a umidade relativa do ar são as mesmas adotadas no projeto Helioterm.

TABELA 3 – Parâmetros para correção do custo dos subsistemas.

Equipamento	Cálculo do fator MPF	Fator de correção	Equação	Obs.
Trocador de calor	MPF=Fm.(Fp+Fd)	Fm	$Fm = 0,3168 \cdot \ln A_t + 1,0737$	inox
		Fp	$Fp = 0,3155 \cdot \ln(P - 2,2371)$	
		Fd	$Fd = 0,85$	tubo em U
Turbina	MPF=Fd	Fd	$Fd = 1,07$	vapor
		Fd	$Fd = 1,15$	outros fluidos
Arrefecimento a ar	MPF=Fm.(Fp+Fd)	Fm	$Fm = 0,064 \cdot \ln A_t + 0,7291$	inox
		Fp	$Fp = 0$	
		Fd	$Fd = 0,85$	
Bomba centrífuga	MPF=Fm.(Fo)	Fm	$Fm = 1$	Aço carbono
		Fm	$Fm = 1,93$	Inox
		Fo—p	$Fd = 0,8998 \cdot e^{(0,0002 \cdot P)}$	Pressão
		Fo—t	$Fo = 0,5529 \cdot e^{(0,0039 \cdot T)}$	Temperatura
Coletor Solar	MPF=1		-	

2.2 Indicadores de desempenho e custo

A comparação dos resultados foi realizada com base em indicadores de desempenho e de custo determinados para cada um dos casos. Estes indicadores foram normalizados. A normalização transforma as respostas das simulações em valores entre “0” e “1”, sendo atribuído o valor “1” para o melhor caso, o valor “0” para o pior e valores intermediários para os demais. Adicionalmente um indicador global foi calculado com base nestes indicadores normalizados. Os indicadores de desempenho são descritos a seguir:

- Eficiência líquida global (relação entre o trabalho líquido gerado e o aporte de fluxo de calor ao sistema):

$$NS1 = \frac{(W_t - \sum_{b=i}^{b=n} W_{b-i})}{Q_{inCS}} \times 100$$

- Eficiência relativa a Carnot (relação entre a eficiência líquida global e a eficiência de um ciclo de Carnot, operando nas mesmas temperaturas do ciclo):

$$NS2 = \frac{NS1}{1 - \left(\frac{T_{\min}}{T_{\max}} \right)}$$

- Relação de potência reversa (quociente entre o consumo nas bombas e a potência líquida no sistema):

$$NS3 = \frac{(W_t - \sum_{b=i}^{b=n} W_{b-i})}{\sum_{b=i}^{b=n} W_{b-i}}$$

- Número de coletores solares (indicativo da área ocupada pela planta):

$$NS4 = nCS$$

- Custo do sistema (soma do custo dos componentes do sistema):

$$NS5 = Custo = \sum_i^n (BC \cdot MPF \cdot 1,76 \cdot 1,75)_i$$

onde Q_{inCS} é o fluxo de calor que entra pelo coletor solar em kW, W_t representa a potência gerada na turbina em kW e W_{b-i} representa a potência consumida por cada bomba, também em kW, T_{\min} e T_{\max} são respectivamente as temperaturas de entrada do sistema de arrefecimento no condensador e na saída do coletor solar, em Kelvin e n é o número de componentes do sistema. BC e MPF são fatores usados na obtenção do custo base dos subsistemas e são explanados no item anterior.

2.2.1 Análise por indicadores de desempenho e/ou de custo

Para cada configuração do sistema (HTF, DSG, SC-HTF e SC-DSG) foi realizada uma normalização entre todos os fluidos de trabalho simulados, considerando cada indicador de desempenho e de custo separadamente. Dessa forma foi possível analisar, para cada indicador, qual fluido tem melhor desempenho e/ou menor custo para cada configuração.

2.2.2 Análise por indicador global

Uma vez que os valores de indicadores de desempenho e de custo são normalizados, uma combinação entre eles pode ser realizada utilizando um peso para cada um (ponderação), e um indicador global pode então ser obtido. Este novo parâmetro representa o desempenho global do sistema considerando-se todos os indicadores anteriores. Esta análise foi feita para cada configuração de planta: i) HTF (a vapor d'água e com fluido orgânico, operando em condições subcríticas); ii) DSG (a vapor d'água e com fluido orgânico, operando em condições subcríticas); iii) SC-HTF (com fluido orgânico e operando em condições supercríticas) e iv) SC-DSG (com fluido orgânico e operando em condições supercríticas). Para o cálculo do indicador global, considerou-se peso igual entre os indicadores normalizados, como mostra a fórmula a seguir, onde os subscritos *nor* indicam que os valores são normalizados (entre zero e um).

$$I_{global} = (NS1_{nor} + NS2_{nor} + NS3_{nor} + NS4_{nor} + NS5_{nor}) / 5$$

3.0 - RESULTADOS

As Tabelas 4(a) e 4(b) mostram os resultados dos indicadores de desempenho, já normalizados, para cada fluido de trabalho e cada configuração do sistema. Em negrito encontram-se os melhores valores para cada configuração, correspondentes ao valor normalizado igual a 1. A Tabela 5 apresenta os valores não normalizados para a melhor condição de cada configuração. As Tabelas 4 e 5 mostram que as melhores condições para cada tipo de configuração não são obtidas com o mesmo fluido de trabalho. A Tabela 6 indica o valor do índice global. Este parâmetro representa o desempenho de forma geral, independente da tecnologia e do fluido usado e permite a comparação de sistemas com tecnologias distintas. Em negrito, encontram-se os maiores índices para cada tipo de configuração.

TABELA 4 (a) - Indicadores de desempenho normalizados para cada configuração e fluido de trabalho (NS1 e NS2).

Fluido	NS1 - Eficiência Global				NS 2 - Carnot Relativo			
	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG
r245fa	0,570	0,366	0,539	0,523	0,830	0,859	0,797	0,819
r245ca	0,679	0,439	0,611	0,595	0,873	0,888	0,834	0,848
r365mfc	0,780	0,505	0,685	0,669	0,928	0,931	0,899	0,909
Isopentano	0,791	0,510	0,695	0,675	0,940	0,940	0,908	0,914
Pentano	0,824	0,533	0,728	0,709	0,955	0,953	0,922	0,926
Isohexano	0,950	0,617	0,830	0,813	1,000	0,988	0,972	0,971
Ciclopentano	0,951	0,619	0,833	0,820	0,974	0,961	0,938	0,936
Hexano	0,984	0,640	0,841	0,826	0,988	0,972	0,962	0,959
dimetilcarbonato	1,000	0,656	0,882	0,880	0,945	0,930	0,903	0,903
Ciclohexano	0,654	0,722	0,950	0,944	0,600	0,994	0,982	0,980
metilciclohexano	0,613	0,772	1,000	0,997	0,533	1,000	1,000	1,000
Tolueno	0,643	0,753	0,973	0,981	0,544	0,950	0,939	0,946
propilciclohexano	0,609	0,765	0,985	1,000	0,488	0,907	0,902	0,911
Dodecano	0,529	0,618	0,798	0,815	0,408	0,702	0,708	0,715
Estearato de metila	0,346	0,458	0,528	0,596	0,238	0,457	0,422	0,466
Oleato de metila	0,353	0,469	0,536	0,613	0,242	0,466	0,426	0,476
Água	0,856	1,000			0,667	0,999		

Quanto aos fluidos de trabalho, os fluidos orgânicos possibilitam operar a temperaturas inferiores a 250°C. Os parâmetros de operação são inferiores aos parâmetros com um ciclo a água, o que permite controlar a planta com maior estabilidade, além de reduzir as perdas para o ambiente. Além disso, nessas temperaturas, é possível desenvolver sistemas com acumuladores térmicos a custos mais baixos, fornecendo maior competitividade à planta heliotérmica. Os fluidos orgânicos permitem também operar o ciclo Rankine no regime supercrítico, aumentando a eficiência termodinâmica. Por outro lado, o rendimento global da planta sofre um decréscimo devido ao maior gasto no sistema de bombeamento, uma vez que a vazão e a densidade do fluido de trabalho são superiores. Por estes motivos, entre as diversas configurações observou-se que os indicadores relativos à eficiência (NS1, NS2, NS3) são melhores para o sistema com geração direta de vapor.

O sistema de geração direta também exigiu um número menor de coletores solares, embora o seu custo não tenha sido o menor entre os sistemas avaliados.

TABELA 4 (b) - Indicadores de desempenho (NS3, NS4) e de custo para cada configuração e fluido de trabalho.

Fluido	NS3 - RPR				NS4 - Número de Coletores Solares				Custo			
	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG
r245fa	0,147	0,085	0,223	0,215	0,560	0,391	0,545	0,524	0,675	0,720	0,683	0,710
r245ca	0,190	0,099	0,256	0,249	0,667	0,450	0,632	0,579	0,584	0,674	0,738	0,753
r365mfc	0,239	0,117	0,314	0,305	0,778	0,529	0,706	0,647	0,798	0,808	0,805	0,802
Isopentano	0,216	0,100	0,279	0,263	0,824	0,529	0,706	0,647	0,881	0,838	0,798	0,796
Pentano	0,227	0,110	0,305	0,289	0,824	0,563	0,750	0,688	0,881	0,865	0,825	0,822
Isohexano	0,295	0,141	0,388	0,371	1,000	0,643	0,857	0,786	0,943	0,910	0,884	0,882
Ciclopentano	0,256	0,126	0,336	0,326	1,000	0,643	0,857	0,786	0,965	0,920	0,879	0,876
Hexano	0,370	0,144	0,409	0,392	1,000	0,643	0,857	0,786	1,000	0,931	0,884	0,884
dimetilcarbonato	0,298	0,177	0,447	0,440	1,000	0,692	0,923	0,846	0,971	0,964	0,919	0,916
Ciclohexano	0,421	0,167	0,450	0,439	0,700	0,750	1,000	0,917	0,853	0,993	0,946	0,945
metilciclohexano	0,466	0,185	0,526	0,511	0,636	0,818	1,000	1,000	0,813	0,998	0,981	0,982
Tolueno	0,465	0,185	0,511	0,501	0,667	0,750	1,000	0,917	0,836	1,000	0,950	0,950
propilciclohexano	1,000	0,390	0,994	0,959	0,636	0,818	1,000	1,000	0,744	0,940	1,000	1,000
Dodecano	0,995	0,366	1,000	1,000	0,560	0,643	0,800	0,786	0,767	0,925	0,908	0,910
Estearato de metila	0,878	0,290	0,922	0,773	0,368	0,474	0,545	0,579	0,501	0,680	0,785	0,786
Oleato de metila	0,938	0,305	0,962	0,802	0,378	0,500	0,571	0,611	0,599	0,784	0,807	0,808
Água	0,522	1,000			0,875	1,000			0,995	0,977		

TABELA 5 – Valores não normalizados para a melhor condição de cada configuração avaliada.

Indicador	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG
NS1	16,58 (dimetilcarbonato)	25,69 (água)	19,09 (metilciclohexano)	19,70 (propilciclohexano)
NS2	38,31 (isohexano)	42,30 (metilciclohexano)	37,82 (metilciclohexano)	41,23 (metilciclohexano)
NS3	0,04 (propilciclohexano)	0,02 (água)	0,05 (dodecano)	0,05 (dodecano)
NS4	14 (isohexano, ciclopentano, hexano, dimetilcarbonato)	9 (água)	12 (ciclohexano, metilciclohexano, tolueno, propilciclohexano)	11 (metilciclohexano, propilciclohexano)
NS5 (US\$)	11.138.137,12 (hexano)	10.406.948,87 (tolueno)	9.827.947,54 (propilciclohexano)	9.866.259,61 (propilciclohexano)

TABELA 6 - Indicador global de desempenho e de custo.

Fluido	Total individual (Iglobal)			
	HTF	DSG	SC-HTF	SC-DSG
r245fa	0,56	0,48	0,56	0,56
r245ca	0,60	0,51	0,61	0,60
r365mfc	0,70	0,58	0,68	0,67
Isopentano	0,73	0,58	0,68	0,66
Pentano	0,74	0,60	0,71	0,69
Isohexano	0,84	0,66	0,79	0,76
Ciclopentano	0,83	0,65	0,77	0,75
Hexano	0,87	0,67	0,79	0,77
dimetilcarbonato	0,84	0,68	0,81	0,80
Ciclohexano	0,65	0,73	0,87	0,84
metilciclohexano	0,61	0,75	0,90	0,90
Tolueno	0,63	0,73	0,87	0,86
propilciclohexano	0,70	0,76	0,98	0,97
Dodecano	0,65	0,65	0,84	0,85
Estearato de metila	0,47	0,47	0,64	0,64
Oleato de metila	0,50	0,50	0,66	0,66
Água	0,78	1,00		

A Tabela 5 indica que os melhores fluidos para cada configuração são os seguintes:

- hexano – melhor fluido para a configuração HTF;
- água – melhor fluido para a configuração DSG;
- propilciclohexano – melhor fluido para a configuração com ciclo Rankine supercrítico, tanto para a configuração HTF quanto para a configuração DSG.

Na análise econômica das diversas configurações e diferentes fluidos de trabalho observou-se que o custo do bloco de potência, composto pelas bombas, trocadores de calor e turbina, varia de 19 a 36% do custo total. O custo

do campo solar ficou em média entre 20% e 37%. Outros custos ficaram por conta da instalação, representando em média 43% do custo total do sistema. Em uma comparação entre as configurações avaliadas, é possível identificar uma queda média de custos entre as configurações HTF e o DSG de 14%, entre o HTF e o SC-HTF de 18% e, por último, entre o DSG e SC-DSG de 4%. As configurações de menor custo, nesta análise comparativa, foram, respectivamente, DSG, SC-HTF e SC-DSG.

Dentre todos os fluidos e configurações analisadas, a água na configuração DSG apresentou o melhor índice global. A maior vantagem dessa tecnologia está na ausência de trocadores de calor, necessários nos sistemas HTF. Outro benefício está associado à maior temperatura do ciclo de potência, permitindo maior eficiência no ciclo termodinâmico. Todavia esta tecnologia ainda não está madura. O desenvolvimento da mesma esbarra na estabilidade do sistema a partir de uma fonte de calor intermitente, em função de operar com um sistema bifásico (água/vapor) no campo solar. Por causa disso, custos de operação e manutenção mais elevados são esperados, o que não foi considerado neste trabalho.

4.0 - CONCLUSÃO

Neste trabalho, diferentes sistemas solares com concentração (CSP) foram comparados mediante o cálculo de indicadores globais de desempenho e de custo, adimensionalizados e transformados para uma escala comum. Foram escolhidos para comparação 50 sistemas CSP, todos com potência líquida de 1MWe, alguns com tecnologia DSG e outros com a tecnologia HTF. No bloco de potência, foram consideradas diferentes alternativas para os fluidos de trabalho: água ou fluidos orgânicos, operando em ciclos Rankine orgânicos subcríticos e supercríticos.

As simulações foram desenvolvidas utilizando-se o programa computacional MATLAB e os resultados indicaram que os fluidos de trabalho mais adequados para os sistemas com ciclo de potência subcríticos foram os seguintes: hexano, para as tecnologias HTF e água para a tecnologia DSG. Para os sistemas com ciclo de potência supercríticos, o fluido de trabalho mais adequado é o propilciclohexano tanto para a configuração HTF quanto para a configuração DSG. Dentre todos os fluidos e configurações analisadas, a alternativa DSG acoplada com ciclo Rankine convencional apresentou o melhor índice global.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Feldhoff, J. F., S., K., Eck, M., Schnatbaum-Laumann, L., Laing, D., Ortiz-Vives, F., Schulte-Fischedick, J., 2012. Comparative system analysis of direct steam generation and synthetic oil parabolic trough power plants with integrated thermal storage. *Solar Energy*, 86(1), 520–530. doi:10.1016/j.solener.2011.10.026.
- (2) Vieira, L. S. Reis, Guimarães, A.P.C., Bezerra, L. B., Serra, E.T., 2012. Projeto Básico de uma Central Heliotérmica de 1MW em Petrolina – PE. In: IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferência Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012.
- (3) Feldhoff, J. F., 2012. Direct Steam Generation (DSG) Technology Overview STE Status.
- (4) Broehl, J., 2006. Solar Energy Milestone Reached in the Arizona Desert. (<http://www.renewableenergyworld.com/rea/news/article/2006/04/solar-energy-milestone-reached-in-the-arizona-desert-44696>)
- (5) Alves, M. S., 2013. Modelagem Computacional e Otimização de um Ciclo Rankine Orgânico Solar com Concentrador Cilíndrico Parabólico, Itajubá - MG, 195 p. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) – Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.
- (6) Quoilin, S.; Broek, M. Van Den; Declaye, S.; Dewallef, P.; Lemort, V., 2013. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 22, p. 168-186, 2013.
- (7) TGM, 2014. Turbinas para Geração de Energia Elétrica. (<http://www.grupotgm.com.br/solucoes.php?id=3>)
- (8) TURBODEN, 2013. Organic Rankine Cycle. (<http://www.turboden.eu/en/rankine/rankine-history.php>)
- (9) Price, H., Lüpfert, E., Kearney, D., Zarza, E., Cohen, G., Gee, R., & Mahoney, R., 2002. Advances in Parabolic Trough Solar Power Technology. *Journal of Solar Energy Engineering*, 124(2), 109. doi:10.1115/1.1467922.
- (10) Odeh, S. D., Morrison, G. L., & Behnia, M., 1998. Modelling of parabolic trough direct steam generation solar collectors. *Solar Energy*, 62(6), 395–406. doi:10.1016/S0038-092X(98)00031-0.
- (11) Kakaç, S.; Pramuanjaroenkij, A.; Liu, H., 2002. Heat exchangers: selection, rating, and thermal design.

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

- Pablo de Abreu Lisboa
- Nascimento: Rio de Janeiro, 16/05/1980;
- Formação: graduação em engenharia mecânica pela UERJ em 2004 / mestrado em engenharia mecânica pela UERJ em 2012;



- Ana Paula Cardoso Guimarães
- Nascimento: Uberlândia, MG, 09/04/1964;
- Formação: graduação em Engenharia mecânica pela PUC Minas em 1990 / mestrado em engenharia mecânica pela UFMG em 1995 / doutorado em engenharia mecânica pela COPPE-UFRJ em 2003.

- Leonardo dos Santos Reis Vieira
- Nascimento: Rio de Janeiro, 16/06/1962;
- Formação: graduação em engenharia mecânica pelo IME em 1984 / mestrado em engenharia mecânica pela PUC-RJ em 1993 / doutorado em engenharia mecânica pela COPPE/UFRJ em 2003.

Marcel Senaubar Alves

- Nascimento;
- Formação: graduação em engenharia mecânica pela UNIFEI e Ecole Nationale d'Ingénieurs de Metz em 2011 / mestrado em engenharia mecânica pela UNIFEI em 2013