

Análise Energética, Exergética, Econômica e Ambiental (4E) de Sistema com Torre Solar Concentradora para Produção de Eletricidade em Diferentes Cenários

Alex Vazzoler

A Análise 4E é uma ferramenta numérico-analítica criada para estabelecer uma avaliação multicritério de processos industriais. Neste trabalho esta abordagem foi aplicada a um sistema com três torres concentradoras em diferentes cenários de irradiação solar total absorvida. Foi verificado que com o aumento da capacidade há uma maior geração de CO₂ devido ao aumento nas irreversibilidades do sistema.

Palavras-chave: *engenharia solar; eficiência energética; exergia; torres solares.*

4E Analysis is a numerical-analytical tool created to establish a industrial processes multicriteria assessment. In this article, this approach was applied to a system composed by three concentrating towers in different solar radiation absorption scenarios. The results showed increasing in capacity there is a greater generation of CO₂ due to the increase in the irreversibilities of the system.

Keywords: *solar engineering; energy efficiency; exergy; solar towers.*

Introdução

Uma parte significativa das atividades industriais consomem montantes expressivos de energia, sendo este um dos principais promotores de impactos negativos no meio ambiente. Para se evitar tal cenário, deve ser avaliada a utilização de sistemas solares, baseados em modelos termoeconômicos, que permitam a inserção na análise de elementos de economia e sustentabilidade. A Análise 4E engloba as análises energética, exergética, econômica e ambiental de forma pertinente para o problema por possuir múltiplos critérios¹.

O sistema alvo deste trabalho foi uma associação de três torres solares concentradoras (com carbonato fundido, como fluido térmico) para produção de vapor superaquecido a 270 °C para um complexo industrial, na cidade do Rio de Janeiro. Esta torre opera com diferentes vazões de vapor já que a intensidade solar varia ao longo do ano, tendo o seu valor máximo no solstício. Este valor foi adotado como o máximo, e os outros dois cenários estudados correspondem a 50 e 70% deste valor respectivamente, conforme dados do *SunData V3.0*².

A Análise 4E é segmentada em duas abordagens complementares, a abordagem numérica envolve a resolução do modelo de otimização termodinâmico (exergia) e a abordagem analítica envolve os cálculos financeiros (receitas e custos) e ambiental (custo pago pelas emissões de CO₂). Esta análise multicritério permite avaliar, dentre os possíveis cenários, todos os impactos oriundos das mudanças nas condições de operação da torre solar, o que permite estabelecer uma análise de custos e benefícios entre os fatores ambientais e econômicos³.

Descrição dos Sistemas

SISTEMA SOLAR COM TORRE E SUA INTEGRAÇÃO AO CICLO RANKINE ORGÂNICO

Sistemas solares podem produzir eletricidade com menor impacto ambiental do que sistemas utilizando hidrocarbonetos como combustíveis. Como por exemplo, turbinas a gás. Tal campo de estudos necessita de estudos

mais aprofundados para viabilizar-se competitivamente no mercado de suprimento de eletricidade. O Rio de Janeiro, por sua latitude, possui alta incidência solar, e foi utilizada como cenário para este artigo.

As legislações e certificações impõem restrições às emissões de carbono, devido a necessidade de amenizar os efeitos das mudanças climáticas. É necessário viabilizar economicamente a utilização de tais fontes de energia, e o Ciclo Rankine Orgânico pode ser um sistema auxiliar bastante relevante para tal finalidade. A produção de eletricidade solar em maior escala é feita através da utilização de circuitos com torres concentradoras conforme ilustrado pela Figura 1⁴.

A torre é a fonte majoritária de energia do sistema, sais fundidos (fluido térmico de aquecimento) absorvem a irradiação solar refletida pelos heliostatos que circundam a torre, gerando a corrente de sal quente (1). Esta corrente é utilizada como fonte de calor na caldeira, e é produzido vapor superaquecido a alta pressão (3), que em seguida irá movimentar turbinas para produção de eletricidade gerando-se vapor de baixa pressão (4) como corrente de descarga. Para que o ciclo termodinâmico esteja completo, é necessária a rejeição de calor residual da corrente 4 para uma fonte fria. Para reaproveitar este calor residual à baixa temperatura, é acoplado um sistema com um ciclo Rankine orgânico, e bomba de calor, descrito com mais detalhes³.

MELHORIA DA INTEGRAÇÃO DO CICLO CRO ATRAVÉS DA UTILIZAÇÃO DE BOMBAS DE CALOR

Genericamente há dois modos de melhorar a performance de um Ciclo CRO. A primeira é aumento do coeficiente de performance, modificando-se as condições de operação, e a segunda é selecionar o fluido de trabalho mais adequado. As temperaturas dos processos podem não ser compatíveis com os fluidos de trabalho do Ciclo CRO. Então, bombas de calor podem promover a melhoria do desempenho do ciclo já que transferem calor residual para evaporação do fluido de trabalho orgânico.

Esta abordagem mostra-se viável em grande parte dos casos citados abaixo^{5,6}:

- Incompatibilidade entre o fluido de trabalho e o ciclo CRO;
- A temperatura de evaporação do fluido de trabalho do Ciclo CRO é adequada;
 - O fluido de trabalho do Ciclo CRO tem uma razão pequena entre o calor latente e sensível;
 - O coeficiente de desempenho (*COP*) da bomba de calor é satisfatório.

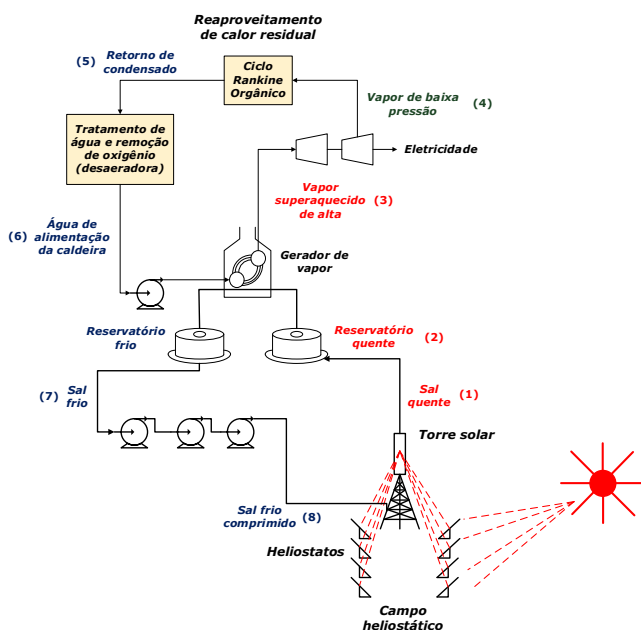


Figura 1. Circuito de geração de eletricidade solar a partir de torre concentradora e Ciclo Rankine Orgânico (CRO).

O calor residual das fontes de calor do ciclo CRO pode ser classificado em calor residual com e sem restrições. No segundo caso, o calor residual pode atingir uma temperatura próxima à ambiente. Caso haja uma limitação de temperatura, primeiro caso, é considerado com restrições. Um bom exemplo, é a temperatura de gases ácidos que não pode ser inferior a temperatura de orvalho da mistura gasosa para serem evitados problemas com corrosão⁵.

Naturalmente, sistemas em que não há restrições severas com temperatura (primeiro caso) há uma maior flexibilidade na escolha de fluidos de trabalho, e em sistemas com restrições essa seleção é limitada. Grande parte dos sistemas

de recuperação de calor residual, se enquadra na segunda categoria devido a uma série de limitações operacionais [6].

O sistema proposto neste artigo se enquadra na categoria de sistemas com restrições, e o sistema de Ciclo Rankine Orgânico aplicado ao estudo de caso é similar ao proposto por Spayde *et al.*⁵.

Análise fenomenológica

ANÁLISE DA TORRE CONCENTRADORA CONFORME A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

O primeiro passo da construção do modelo matemático do sistema de geração de energia solar (Figura 1) é o balanço de energia no gerador de vapor. Este é um componente crítico, já que é a conexão entre as centrais receptoras (comumente são utilizadas de 4 a 5 torres solares) e a unidade de energia da turbina a vapor⁷.

O gerador de vapor consiste em uma série de trocadores de calor, através dos quais sal fundido a alta temperatura, oriundo da torre receptora, aquece água de líquido sub-resfriado a vapor superaquecido, conforme o balanço de energia é expresso pela Equação 1⁸.

$$q_{abs} = \dot{m}^{sf}(H_1^{sf} - H_7^{sf}) = \frac{\dot{m}^{vap}(H_3^{vap} - H_6^{vap})}{\eta_{ger}} \quad (1)$$

em que \dot{m}^{sf} e \dot{m}^{vap} são as vazões mássicas de sais fundidos e de vapor. Já H_1^{sf} , H_7^{sf} são entalpias de entrada e saída dos sais fundidos H_3^{vap} e H_6^{vap} são as entalpias de saída e entrada do gerador de vapor. A potência elétrica (W_{el}) gerada pelo sistema pode ser estimada por:

$$W_{el} = \frac{\dot{m}^{vap}(H_4^{vap} - H_3^{vap})}{\eta_{tur}\eta_{el}} \quad (2)$$

H_4^{vap} é a entalpia de saída da turbina, η_{tur} e η_{el} são as eficiências da turbina e de conversão de trabalho em eletricidade.

Na torre solar (receptor), a radiação solar incidente é transformada de energia eletromagnética em energia térmica. Parte dessa energia térmica (q_{re}) é absorvida pelo fluido

térmico (q_{abs}), isto é, o sal fundido. O restante da energia térmica é dissipado para o meio ambiente por convecção (q_{con}), radiação (q_{rad}), reflexão (q_{ref}) e condução (q_{cond})⁸.

$$q_a = q_{con} + q_{rad} + q_{ref} + q_{cond} \quad (3)$$

$$\frac{q_{con}}{A_{re}(T_{re} - T_a)} = h_a + \frac{0,81}{F_r} (T_{re} - T_a)^{0,426} \quad (4)$$

em que F_r é a razão \bar{A}/A_{re} é o fator de forma; T_{re} e T_a são as temperaturas da superfície refletora e ambiente; \bar{A} e A_{re} são o valor de área média e de reflexão; h_a é o coeficiente de transmissão de calor para o ambiente.

E as demais frações de dissipação de calor para o ambiente são expressas pelas Equações 5 a 7.

$$q_{rad} = \bar{\epsilon} \sigma A_{re} F_r (T_{s,re}^4 - T_a^4) \quad (5)$$

$$q_{ref} = q_{re} F_r \rho \quad (6)$$

$$q_{cond} = \frac{\lambda_{iso} A_{re}}{\delta_{iso}} (T_{s,re} - T_{iso}) \quad (7)$$

$\bar{\epsilon}$ é a emissividade da superfície, $\bar{\epsilon}$ é a constante de Stefan Boltzmann, ρ é a refletividade, λ_{iso} e δ_{iso} são a condutividade térmica e a espessura do isolante.

A eficiência da torre concentradora ou receptor central (η_{rec}) é definida como a razão da energia térmica absorvida pelo sistema receptora e a incidente⁷:

$$\eta_{rec} = \frac{q_{abs}}{q_{re}} = 1 - \frac{q_a}{q_{re}} \quad (8)$$

O valor de potência elétrica necessária é fornecido como dado de entrada do problema, e os dados de dimensionamento da torre solar foram previamente fixados. A vazão de vapor necessária e os demais dados de dimensionamento serão introduzidos como restrições no problema global de otimização.

O modelo para o ciclo CRO, foi adaptado do trabalho de Spayde *et al.*⁵ e o equacionamento do Ciclo Rankine Orgânico pode ser encontrado em detalhes nesta referência.

A próxima análise envolve a estimativa da eficiência exergética da torre concentradora e o próximo irá apresentar as principais Equações utilizadas para este cálculo⁹.

SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA E ANÁLISE EXERGÉTICA

A exergia (Ex) de um sistema pode ser definida como o potencial máximo de trabalho de um sistema em relação a um ponto de referência (ambiente). Seu cálculo é feito através de um balanço expresso pela Equação 9¹⁰,

$$Ex_i + Ex_s + Ex_o + Ex_{perd} + Ex_{dest} = 0 \quad (9)$$

em que Ex_i , Ex_o , Ex_s , Ex_{perd} e Ex_{dest} são as taxas de entrada, saída, armazenamento, vazamento (perda) e destruição de exergia respectivamente. A eficiência exergética do sistema é descrita como a relação entre a variação de exergia na corrente de sal fundido a exergia da irradiação solar incidente, expressa pela Equação abaixo¹¹:

$$\eta_{ex} = \frac{\text{Variação de exergia}}{\text{Exergia da irradiação solar}} = \frac{Ex_{o,f} - Ex_{i,f}}{Ex_{i,q}} \quad (10)$$

A Equação 11 expressa a eficiência exergética em termos das perdas apresentadas na Equação 10 e da eficiência ótica da torre concentradora (η_o),

$$\eta_{ex} = 1 - (1 - \eta_o) + \frac{1}{\left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right)} \frac{m \Delta P T_a \ln\left(\frac{T_o}{T_i}\right)}{\rho I A (T_o - T_i)} + \eta_o T_a \left(\frac{1}{T_p} - \frac{1}{T_s}\right) + \frac{\dot{m} c_p T_a}{AI} \left[\ln\left(\frac{T_o}{T_i}\right) - \frac{(T_o - T_i)}{T_p} \right] + \frac{U_a (T_p - T_a)}{I} \left(1 - \frac{T_a}{T_s}\right) \quad (11)$$

em que os índices de temperaturas, s e p referem-se ao ambiente, à superfície da torre concentradora, a parede desta e ao fluido térmico (Kalogirou *et al.*, 2016).

Os modelos ópticos, térmicos e exergéticos apresentados nas seções anteriores foram transpostos para o *software* MATLAB 9.7. A formulação do problema de otimização, considera as quantidades T_r , T_a , T_s , I , $(\tau\alpha)$, η_o , S , V_a , L , D_p , etc., como constantes, e a estrutura de

Equações pode ser segmentada duas partes principais: O problema de otimização para maximização da eficiência torre concentradora (η_{rec}), Equação 8, cujas restrições são expressas pelas Equações 1 a 7. De forma sequencial, a maximização da eficiência exergética do sistema, descrita pela Equação 11, sujeita as restrições impostas pelas Equações 1 a 10. Após a resolução dos algoritmos de otimização são feitas as análises de impacto ambiental e econômico.

ANÁLISES DE IMPACTOS ECONÔMICO E AMBIENTAL

Para um balanço financeiro simplificado, deve ser calculada a diferença entre o custo anualizado para a produção de vapor por kg de vapor produzido (C_{PV}) e a receita com a produção de eletricidade nas turbinas (R_v), Equações 12 e 13¹²:

$$C_{PV} = \frac{1,35P}{(1+I)^n - 1} \quad (\$/kg \text{ de vapor}) \quad (12)$$

$$R_v = \frac{\Delta H^{vap} \eta_t P_v}{3600} \quad (\$/kg \text{ de vapor}) \quad (13)$$

em que \dot{m} é a vazão mássica da turbina (kg/s), n é o tempo de salvaguarda para a depreciação (7 anos), P é o investimento inicial, valor presente (\$), ΔH^{vap} é a variação de entalpia nas turbinas em (kJ/kg), η_t é a eficiência da turbina e P_v é o preço de venda do kWh de eletricidade (\$/kWh)¹⁰.

A análise ambiental é conduzida considerando-se o consumo de carbono em cerca de 960 g por kWh de energia. No entanto, passa a ser 2 kg quando as perdas com transmissão (40%) e distribuição (20%) são incluídas¹³. A mitigação de emissões de CO₂, por ano do concentrador solar (Φ_{CO_2}) é estimada pela Equação 14:

$$\Phi_{CO_2} = \frac{\dot{U}_{CO_2}}{3,6 \cdot 10^6} \eta_{ex} Ex_{i,q} \quad (\text{toneladas de } CO_2) \quad (14)$$

em que \dot{U}_{CO_2} é a emissão média de CO₂ (2 kg CO₂ / kWh) quando carvão é usado para geração de eletricidade. O

preço internacional do carbono (z_{CO_2}) está entre 13 \$/ t_{CO₂} e 16 \$/t_{CO₂} para o cenário de cotações de baixa e de alta. O valor médio de 14,5 \$/t_{CO₂} foi adotado para a análise¹³. O custo ambiental (Z_{CO_2}) é obtido a partir da Equação de Rajoria *et al.*, 2013¹².

$$Z_{CO_2}' = \frac{z_{CO_2} \Phi_{CO_2}}{\dot{m}} \quad (\$/kg) \quad (15)$$

O próximo tópico do artigo irá apresentar e discutir os resultados obtidos pelas abordagens expressas pelas Equações 1 a 15. Primeiramente será estabelecida uma análise de sensibilidade para determinar a melhor temperatura de operação da torre, seguida de uma análise do perfil energético do sistema expresso pelo diagrama entalpia contra temperatura. Para analisar a eficiência energética do sistema é construído um diagrama com os fluxos de exergia útil e destruída. Por último, são feitos os cálculos das eficiências, segundo a primeira e a segunda leis da termodinâmica. Acompanhadas dos resultados econômicos e ambientais.

Resultados e Discussão

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA A EFETIVIDADE DA TORRE CONCENTRADORA

Para a escolha da temperatura de operação mais adequada para a torre concentradora será estabelecida uma análise de sensibilidade dos valores de eficiência para diferentes valores de temperatura, considerando-se o grau máximo de intensidade solar para o sistema, estes resultados são apresentados pela Figura 2.

A Figura 2 evidencia a obtenção da maior eficiência na temperatura de 580 graus para os valores testados dentro da faixa de temperaturas da análise de sensibilidade. Para cada temperatura foi o utilizado o algoritmo de otimização expresso pelas Equações 1 a 11, com a maximização da grandeza eficiência exergética. Por outro lado, é necessária uma temperatura de acima da média anual para atingir-se este valor. Portanto, será adotado o valor de 560, já que este valor é o maior dentro do limite de irradiação solar média, este valor será adotado para os demais cálculos.

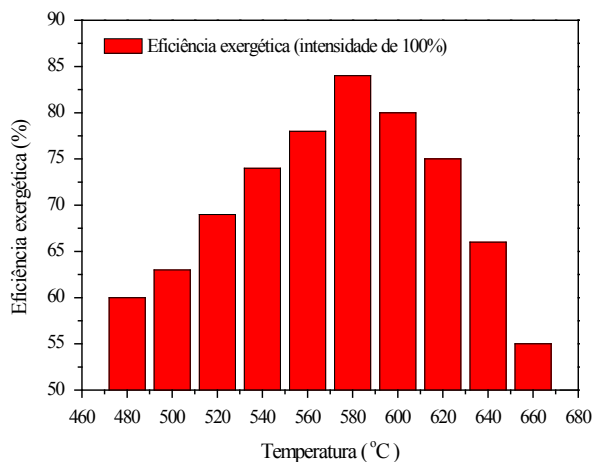


Figura 2. Análise de sensibilidade para eficiência exergetica da torre concentradora com intensidade de 100% da irradiação solar.

ANÁLISE DE TEMPERATURAS E ENTALPIA

A primeira ferramenta proposta para a análise do sistema composto pelo ciclo de aquecimento de sais fundidos, composto pelas etapas 1, 2, 7 e 8, e do sistema de geração de potência acoplado ao Ciclo Rankine Orgânico, etapas 3, 4, 5 e 6, é a curva de entalpia e temperatura expressa pela Figura 3.

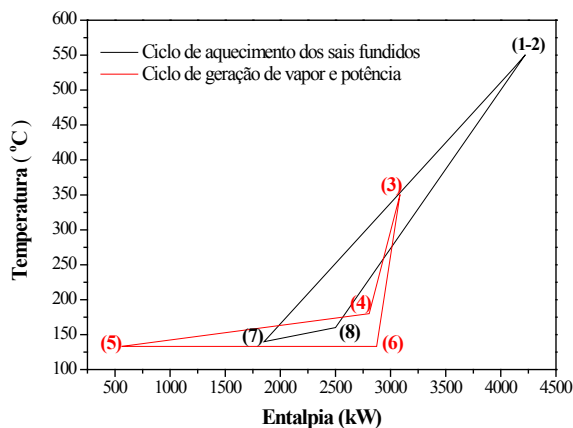


Figura 3. Curva de entalpia e temperatura para o conjunto torre concentradora e Sistema geração de vapor e potência.

A curva superior, em preto, composta pelos pontos 1,2,7 e 8, é o sistema de conversão de irradiação solar em energia térmica, parte desta energia é transferida ao sistema

adjacente (curva em vermelho com os pontos 3, 4, 5 e 6) através da caldeira. E um montante expressivo, convertido em eletricidade pelas turbinas e pelo ciclo Rankine Orgânico.

Verifica-se que a curva superior está deslocada em termos da entalpia a direita (maiores valores de entalpia) e temperatura mais altas. Já que, pela segunda lei da termodinâmica, o calor somente pode ser transferido espontaneamente de temperaturas mais altas para temperaturas mais baixas, o que acarreta maiores forças motrizes e maior eficiência na transferência de calor para a caldeira. Pela Figura 3 verifica-se uma diferença de temperatura bastante expressiva entre os picos das curvas (cerca de 200 °C) o que evidencia grande potencial de aproveitamento energético no sistema.

A etapa a seguir visa a análise dos fluxos de exergia, nas diferentes etapas que constituem o sistema. Para um melhor entendimento dos impactos das etapas sobre a eficiência e a qualidade da energia.

DIAGRAMA EXERGETICO

Para avaliar a eficiência exergetica do sistema, é essencial analisar a variação da exergia em cada uma de suas etapas principais¹⁴. Estas etapas de forma cronológica consistem no aquecimento na torre concentradora, no aproveitamento de calor na caldeira, o trabalho gerado pelas turbinas, e no calor residual reaproveitado pelo Ciclo Rankine Orgânico (CRO) para geração de eletricidade.

A Figura 4 apresenta um fluxograma com os valores de exergia útil, e destruída, nas principais etapas do sistema.

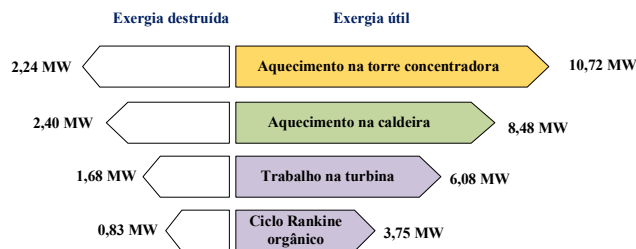


Figura 4. Fluxograma de exergia nas principais etapas do sistema.

Tendo-se em perspectiva a Figura 4, para o aquecimento na torre, 10,72 MW são utilizados no aquecimento das

correntes de sais fundidos. Enquanto, 2,24 MW são destruídos, ou seja, não são utilizados pelo sistema em modalidades úteis, ou seja, que gerem algum tipo de aproveitamento energético imediato ou posterior em todo o processo. De forma análoga, as demais etapas têm as relações quantitativas expressas pela Figura 5. Verifica-se nas etapas, taxas de destruição de exergia abaixo dos 25% em sistemas térmicos solares, o que evidencia uma boa qualidade no aproveitamento energético¹⁴.

A próxima etapa é a estimativa de geração de dióxido de carbono por este sistema, conforme a metodologia proposta por Mamamghani *et al*¹.

RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO TERMOECONÔMICA E ANÁLISE 4E.

Os modelos de otimização energética e exérgica, descrito no item 2.1, juntamente a análise 4E foram aplicados à diferentes cenários de intensidade de irradiação solar apresentados na Tabela 1. Conforme estes dados, verifica-se o aumento das irreversibilidades no sistema em função da maior produção de vapor (função do montante de irradiação solar disponível), e conseqüentemente, as eficiências de da torre concentradora (η_{rec}), exérgica (η_{ex}) e da turbina (η_t) no sistema são inversamente proporcionais à vazão de vapor produzida.

Tabela 1. Resultados obtidos pela análise 4E para diferentes cenários de irradiação solar (variação da intensidade)

Variável	Baixa intensidade (50%)	Média intensidade (70%)	Alta intensidade (100%)
	71,2	68,9	66,5
	65,2	62,4	59,8
	73,2	71,1	68,7
(\$/kg)	0,035	0,042	0,051
(\$/kg)	0,00044	0,00056	0,00068

Um fato a ser evidenciado é que o aumento de escala reduz os custos de produção de vapor, em detrimento dos aumentos dos custos com geração de carbono que são proporcionais a exergia destruída (irreversibilidades) no sistema. Conseqüentemente, operar com menores escalas

diminui efeitos como tensão térmica-mecânica, mas elevam o custo de produção de vapor.

Outro ponto é a intensificação de tal fenômeno em sistemas não renováveis, nos quais as emissões de dióxido de carbono aumentam de forma mais substantiva do que no exemplo previamente descrito¹. Tanto os fluidos de processo quanto as utilidades, têm grande potencial de geração de dióxido de carbono, e tal fato deve sempre ser considerado.

Análise e Conclusões

Os resultados previamente apresentados evidenciam um grande potencial da utilização destes sistemas para a produção de eletricidade com menor impacto ambiental, especialmente em instalações industriais. No caso particular do caso de estudo do Rio de Janeiro, é uma fonte de eletricidade adicional pertinente devido as altas taxas de irradiação solar, e baixa nebulosidade, desta região.

Agradecimentos

Gostaria de congratular encarecidamente o Senai Cetiqt pelo suporte financeiro e apoio institucional.

Nomenclatura

ALFABETO LATINO

- A** área (m²)
- C** Custo (\$/kg)
- c_p** calor específico (kJ.K⁻¹)
- Ex** Exergia (J)
- F** Fator
- F_r** fator de forma
- h** Coeficiente de transmissão de calor (W m²K⁻¹)
- H** entalpia (kJ.kg⁻¹)
- ṁ** vazão mássica (kg/s)
- n** Tempo de salvaguarda (ano)
- P** pressão (Pa)

- q* taxa de transferência de calor ($W m^{-2}$)
R Receita ($\$/kg$)
T temperatura (K)
W trabalho ou potência (W)
Z Preço internacional da tonelada de CO_2 .

ALFABETO GREGO

- δ Espessura do isolamento térmico (m)
 λ Condutividade térmica ($W m^{-1} K^{-1}$)
 ε Emissividade da superfície refletora
 σ Constante de Stefan Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$
 η Eficiência
 ρ Refletividade
 Ω Emissão média de dióxido de carbono, CO_2 (kg)
 λ Condutividade térmica ($J/m K$)

SOBRESCRITO

- sf** Sal fundido **vap** Vapor de água

SUBSCRITOS

- | | |
|--|---|
| a ambiente | Perda ou vazamento |
| abs absorção | orc Ciclo Rankine Orgânico |
| con Convecção | out saída |
| cond condução | rad radiação |
| dest Destruição de vapor | re Superfície refletora |
| el Eletricidade ou elétrico | rec Receptor central (torre) |
| ex Exergia | ref reflexão |
| ger Gerador de vapor | r Refletividade ou reflexão |
| hp Bomba de calor | s Saída ou superfície da torre concentradora |
| i Entrada ou inicial | sf Sais fundidos |
| iso Isolamento térmico | ger Gerador de vapor |
| I Calor latente | tur Turbina |
| o Saída ou armazenamento | v Vapor de água |
| P Parede da torre concentradora | |

Referências

1. A.H. Mamamghani, B. Najafi, A. Shirazi, F. Rinaldi, 4E analysis and multi-objective optimization of an integrated MCFC (molten carbonate fuel cell) and ORC (organic Rankine cycle) system, *Energy*. 82 (2015) 650–663. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.01.074>.
2. Cepel, SunData V 3.0, Cresesb Cepel. (2020). <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>.
3. G.N. Tiwari, J.K. Yadav, D.B. Singh, I.M. Al-Helal, A.M. Abdel-Ghany, Exergoeconomic and enviroeconomic analyses of partially covered photovoltaic flat plate collector active solar distillation system. *Desalination, Desalination*. 367 (2015) 186–196. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.04.010>.
4. I.C. Kemp, Pinch analysis and process integration: A user guide on process integration for the efficient use of energy, *Pinch Anal. Process Integr.* (2007) 416. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/B978-075068260-2.50003-1>.
5. J. Spayde, P.J. Mago, Evaluation of a solar-powered organic Rankine cycle using dry organic working fluids, *Cogent Eng.* 2 (2015) 1–22. <https://doi.org/10.1080/23311916.2015.1085300>.
6. H. Yu, T. Gundersen, X. Feng, Process Integration or Organic Rankine Cycle (ORC) and heat pump for low temperature waste heat recovery, *Energy*. 160 (2018) 330–340. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.028>.
7. A. Boretti, S. Castelletto, S. Al-Zubaidy, Concentrating solar power tower technology: present status and outlook, in: *Nonlinear Eng.*, 2018: pp. 10–31. <https://doi.org/10.1515/nleng-2017-0171>.
8. F. Casella, E. Casati, P. Colonna, Optimal Operation of Solar Tower Plants with Thermal Storage for System Design, *IFAC Proc. Vol.* 47 (2014) 4972–78. <https://doi.org/10.3182/20140824-6-za-1003.02622>.
9. R. Saidur, G. BoroumandJazi, S. Mekhlif, M. Jameel, Exergy analysis of solar energy applications, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 350–356. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.162>.
10. D. Deniz, E. Çinar, Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis of a solar desalination system with humidification-dehumidification, *Energy Convers. Manag.* 126 (2016) 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.064>.
11. S.A. Kalogirou, S. Karellas, K. Braimakis, C. Stanciu, V. Badescu, Exergy analysis of solar thermal collectors and processes, *Prog. Energy Combust. Sci.* 56 (2016) 106–137. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2016.05.002>.
12. C.S. Rajoria, S. Agrawal, G.N. Tiwari, Exergetic and enviroeconomic analysis of novel hybrid PVT array, *Sol. Energy*. 88 (2013) 110–119. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.11.018>.
13. R. Lamba, A. Gaur, G.N. Tiwari, Life Cycle Cost Assessment

and Enviroeconomic Analysis of Thin Film Amorphous Silicon Photovoltaic System, *J. Fundam. Renew. Energy Appl.* 4 (2014) 1–5. <https://doi.org/10.4172/2090-4541.1000140>.

14. A. Suzuki, General theory of exergy-balance analysis and application to solar collectors, *Energy*. 13 (1988) 153–160. [https://doi.org/10.1016/0360-5442\(88\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0360-5442(88)90040-0).
-

Alex Vazzoler

Centro de Tecnologia da Indústria Química e Têxtil, SENAI/RJ/
CETIQT, Brasil

*E-mail: avazzoler@cetiqt.senai.br

