

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM RECEPTOR DE ENERGIA SOLAR DE TUBO EVACUADO

Lais Corrêa Bergel (ITA) - laisccc@yahoo.com.br

Ezio Castejon Garcia (ITA) - ezio@ita.br

Resumo:

Este trabalho apresenta uma análise termodinâmica de um tubo evacuado utilizado em plantas de energia solar com tecnologia de coletores de calha parabólica aplicada para geração de energia térmica e/ou elétrica. Esta análise apresenta a relação entre os diversos fatores do coletor, localização, incidência solar, fluido de transferência de calor e condições específicas da planta. Foi utilizando o EES (Engineerig Equation Solver) para validação do modelo matemático e verificação da viabilidade técnica de implantação de uma Planta de Concentração Solar por Calha Parabólica em Cachoeira Paulista/SP. Comparou-se os resultados para dois tipos de coletores, onde o LS-3 apresentou maiores eficiências que o LS-2. E constatou-se, como o esperado que, quanto maior for a Insolação Normal Direta (DNI), a temperatura ambiente e a vazão do fluido, além de menor a velocidade do vento, maior será o calor absorvido pelo fluido, podendo chegar até a 1010 W/m e eficiência do sistema de 73,5% para localização em estudo.

Palavras-chave: Concentrador Solar, Tubo evacuado, Análise Termodinâmica

Área temática: Conversão Térmica com Concentradores

Subárea temática: Coletores concentradores e sistemas para conversão térmica em média temperatura

ANÁLISE TERMODINÂMICA DE UM RECEPTOR DE ENERGIA SOLAR DE TUBO EVACUADO

Lais C. C. C. Bergel – laisccc@yahoo.com.br

Ezio C. Garcia – ezio@ita.br

Instituto Tecnológico da Aeronáutica, Divisão de Engenharia Mecânica

Resumo. Este trabalho apresenta uma análise termodinâmica de um tubo evacuado utilizado em plantas de energia solar com tecnologia de coletores de calha parabólica aplicada para geração de energia térmica e/ou elétrica. Esta análise apresenta a relação entre os diversos fatores do coletor, localização, incidência solar, fluido de transferência de calor e condições específicas da planta. Foi utilizando o EES (Engineerig Equation Solver) para validação do modelo matemático e verificação da viabilidade técnica de implantação de uma Planta de Concentração Solar por Calha Parabólica em Cachoeira Paulista/SP. Comparou-se os resultados para dois tipos de coletores, onde o LS-3 apresentou maiores eficiências que o LS-2. E constatou-se, como o esperado que, quanto maior for a Insolação Normal Direta (DNI), a temperatura ambiente e a vazão do fluido, além de menor a velocidade do vento, maior será o calor absorvido pelo fluido, podendo chegar até a 1010 W/m e eficiência do sistema de 73,5% para localização em estudo.

Palavras-chave: Concentrador Solar, Tubo evacuado, Análise Termodinâmica.

1. INTRODUÇÃO

Frente à necessidade de diversificação da matriz energética mundial, o uso da Energia Solar diretamente para geração de eletricidade ou por meio de concentradores solares (*Concentrated Solar Power – CSP*) tem sido amplamente estudado. Neste último, os raios solares são direcionados por meio de espelhos para um foco, transmitindo a energia térmica para o fluido de transferência de calor (*Heat Transfer Fluid – HTF*).

Dentre as tecnologias CSP existentes, o tipo calha parabólica (*Parabolic Trough Collectors – PTC*) apresenta maior maturidade comercial e facilidade de acoplamento com outros sistemas de potência (Fuqiang, et al., 2017). Estes PTC's consistem em um espelho reflexivo na forma de parábola, que coleta os raios incidentes do sol em um receptor tubular (*Heat Collector Element – HCE*) localizado no foco desta, como visto na Fig. 1.

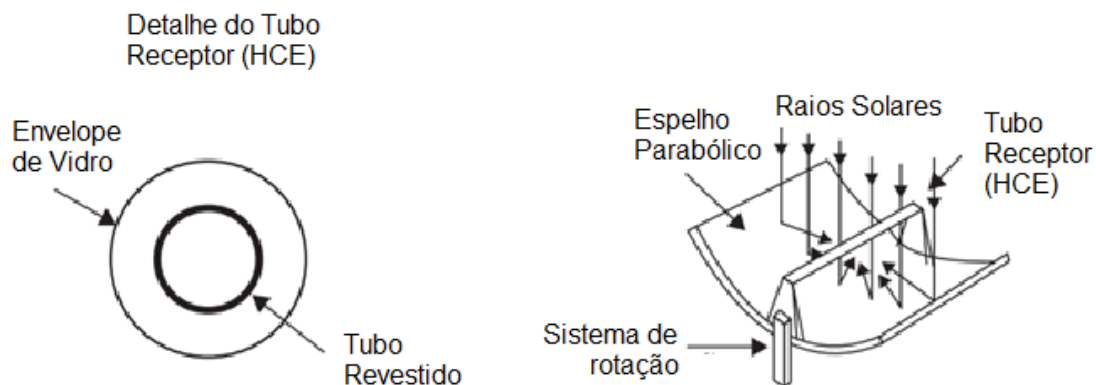


Figura 1 – Coletor Tipo Calha Parabólica. (Adaptado de Kalogirou, 2014).

O HCE mais utilizado nos PTC's são construídos por um tubo revestido, onde o HTF flui, envolto por um tubo de vidro translúcido na banda solar e opaco na banda infravermelha. O espaço anular entre o tubo de vidro e do receptor é evacuado para diminuir as perdas de calor por convecção, aumentando assim a eficiência do PTC (Sandeep, et al., 2017).

Este HCE é o foco deste estudo, que se propõe a realizar uma análise termodinâmica deste, validando um modelo no software EES (*Engineering Equation Solver*), e aplicando as condições de cargas solares de Cachoeira Paulista em um ano típico e, então, avaliar a viabilidade técnica da implementação de um PTC nesta localidade.

2. DESENVOLVIMENTO TERMODINÂMICO

2.1 Metodologia

Diversos artigos apresentam formulação para problemas similares. O método adotado aqui foi apresentado por Forristall (2003) e Kalogirou (2012), onde realizou-se um balanço de energia entre o HTF e o ambiente, incluindo condições ambientais e propriedade termo-ópticas.

Este estudo de caso, baseado em uma pesquisa bibliográfica apresenta seção em estudo como visto na Fig. 2.

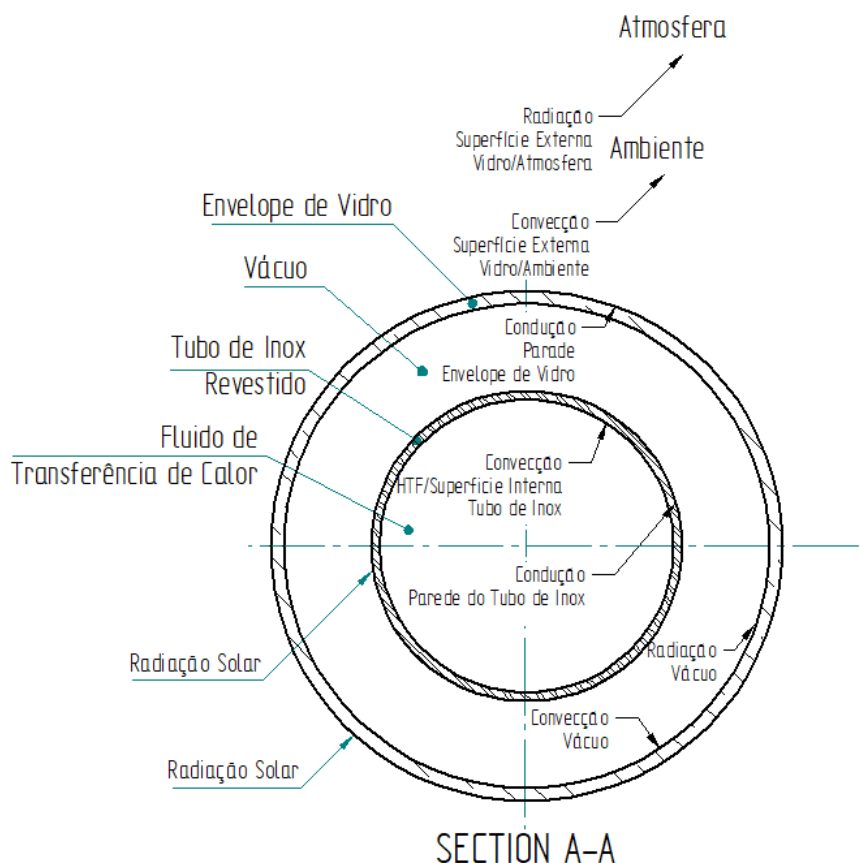


Figura 2 – Modelo do Tubo Receptor. Adaptado de Forristall (2003).

Na Fig. 3 é apresentado o modelo de resistências térmicas do fluxo de calor no HCE, onde se assume temperaturas, taxas de transferência de calor e propriedades termodinâmicas uniformes ao longo do perímetro do receptor.

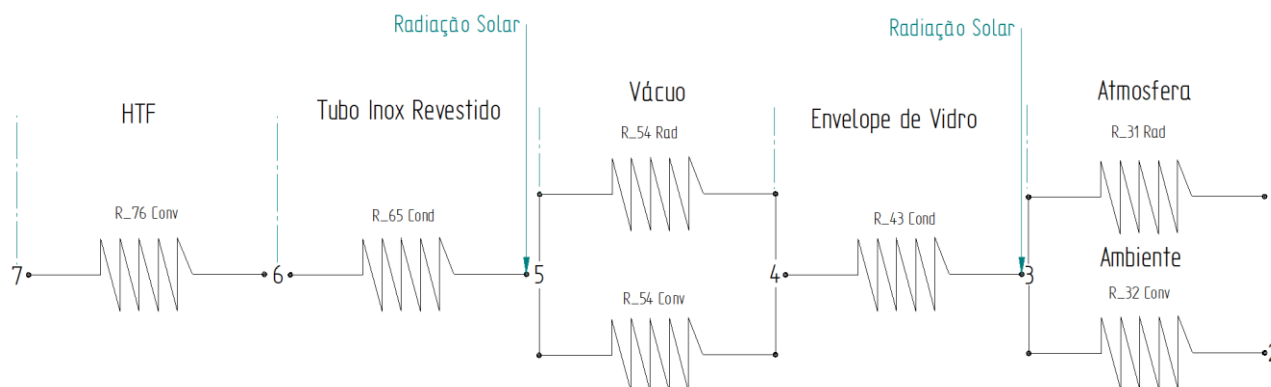


Figura 3 – Modelo de Resistência Térmica do Receptor. Adaptado de Forristall (2003).

Neste modelo de resistência foi omitida as perdas termoópticas (imperfeições dos espelhos, erros de rastreamento, sombreamento e limpeza do sistema) para facilitar a visualização.

2.2 Balanço de Energia Unidimensional

O balanço geral de energia do HCE, sabendo que não há fontes de energia interna e o calor não dissipado é usado no aquecimento do HTF, tem-se:

$$q_{5Sol\ Abs} + q_{3Sol\ Abs} = q_{32conv} + q_{31rad} + q_{67conv} \quad (1)$$

As equações de balanço de energia de cada superfície da seção transversal do HCE são determinadas pela conservação energética (Kalogirou, 2012). Observando a Figura 2 conclui-se que:

$$q_{67conv} = q_{56cond} \quad (2)$$

$$q_{5Sol\ Abs} = q_{54conv} + q_{54rad} + q_{56cond} \quad (3)$$

$$q_{54conv} + q_{54rad} = q_{43cond} \quad (4)$$

$$q_{43cond} + q_{3Sol\ Abs} = q_{32conv} + q_{31rad} \quad (5)$$

$$q_{dissipada} = q_{32conv} + q_{31rad} \quad (6)$$

$$q_{armazenada} = q_{76conv} \quad (7)$$

A energia efetiva de entrada (desconsiderando as perdas termoópticas) é absorvida pelo envelope de vidro ($q_{5Sol\ Abs}$) e pelo revestimento do tubo ($q_{3Sol\ Abs}$). Devido ao tratamento antirreflexo do vidro, toda energia solar considerada entra no volume de controle.

Importante ressaltar neste momento que existe uma parcela de energia perdida pelo suporte do HCE por condução, a qual não é escopo deste estudo.

2.3 Eficiência do Coletor

A eficiência geral do coletor é definida pelo quanto o HTF ganha de calor, dado a irradiação solar por comprimento de HCE, ou seja:

$$\eta_{col} = \frac{q_{12conv}}{q_{sol}} \times 100 \quad (8)$$

2.4 Dados Geográficos

A cidade da Cachoeira Paulista é caracterizada por uma irradiação solar direta (DNI) média de 171 W/m², apresentando máxima de 1040 W/m² em dezembro, seguindo uma média ao longo do dia e do ano, respectivamente, conforme a Fig. 4. Onde também pode-se observar que por volta das 15h tem-se os picos de incidência e entre as 20h de um dia às 8h do seguinte, o DNI pode ser considerado zero.

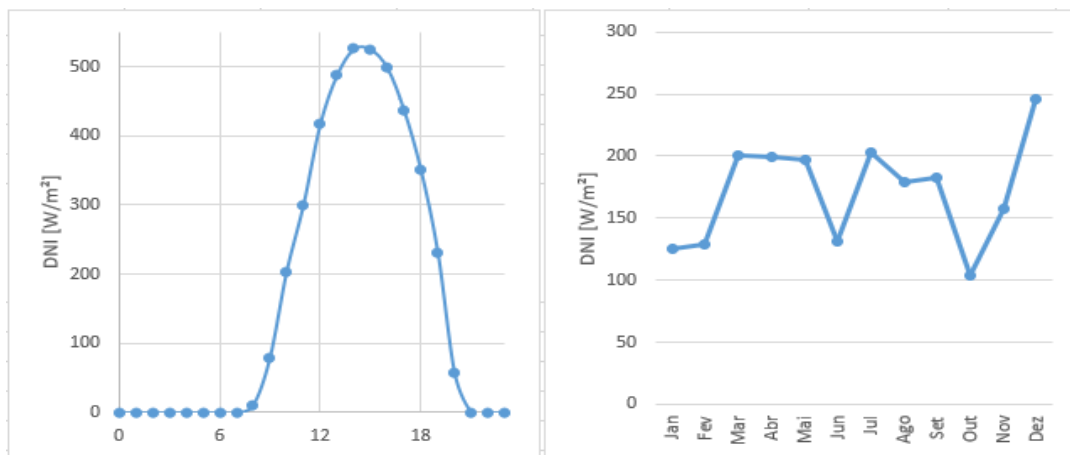


Figura 4 – DNI ao longo a) do dia b) do ano; em Cachoeira Paulista. Compilado de INPE (2018).

Mesmo reconhecendo que a DNI em estudo apresenta valores inferiores à maioria das PTC's instaladas atualmente (NREL, 2019), a conclusão da análise se mostra relevante para avaliação da tecnologia nesta região.

A localização apresenta uma média de temperatura ambiente no ano é de 21,34°C, com máxima de 37,1°C e mínima de 5,4°C (2018 – ano dos dados disponibilizados pela Rede Sonda). A pressão ambiente varia entre 861 mbar e 960 mbar ao longo do ano e a velocidade do vento apresenta média de 1,32 m/s, sendo a máxima 11,5 m/s.

Todas as informações meteorológicas médias estão compiladas na Tab. 1.

Tabela 1 – Médias Meteorológicas de Cachoeira Paulista. Compilado de INPE (2018)

Rótulos de Linha	Média de DNI [W/m ²]	Média de GHI [W/m ²]	Média de T amb [°C]	Média da velocidade do vento [m/s]
Jan	125	228	23,5	1,34
Fev	129	220	23,2	1,13
Mar	200	233	24,1	1,26
Abr	199	202	21,4	1,11
Mai	197	168	19,1	1,18
Jun	131	131	18,8	1,08
Jul	203	168	18,2	1,03
Ago	179	173	18,3	1,38
Set	183	209	21	1,97
Out	104	188	21,9	2,37
Nov	158	232	22,6	2,09
Dez	246	284	24,1	1,62
Média Geral	171	203	21,4	1,46

2.5 Calha Parabólica

O estudo será realizado com os modelos de calha parabólica LS-2 e LS-3 desenvolvidos pela LUZ Corporation, empresa que desenvolveu e comercializou componentes para PTC de 1984 a 1991 (Goswami, 2015).

Baseado nos dados apresentados por Fernandez-Garcia, et al. (2010), Okonkwo, et al. (2018) e (Price, et al., 2002) foi compilada na Tab. 2.

Tabela 2 – Parâmetros dos Coletores LS-2 e LS-3. Compilação do autor.

MODELO	LS-2	LS-3
Largura do coletor [m]	4,82	5,59
Comprimento [m]	47,1	99
Área efetiva do espelho [m ²]	227	553
Distância focal [m]	1,4	1,71
Distância média do foco [m]	1,84	2,12
Diâmetro interno do receptor (D ₆) [m]	0,066	0,066
Diâmetro externo do receptor (D ₅) [m]	0,07	0,07
Diâmetro interno do envelope (D ₄) [m]	0,109	0,109
Diâmetro externo do envelope (D ₃) [m]	0,115	0,115
Pico de eficiência termoóptica	0,74	0,77
Emissividade do vidro (ϵ_c)	0,86	0,86
Emissividade do tubo receptor (ϵ_r)	0,1	0,1
Refletividade do espelho (ρ)	0,94	0,94
Fator de interceptação (γ)	0,89	0,93
Transmissividade da tampa de vidro (τ)	0,95	0,96
Absorvidade do receptor (α)	0,94	0,96
Ângulo modificador de incidência (Kr)	1	1
Orientação dos coletores	N – S	N – S

2.6 Receptor e Fluido de Transferência de Calor

O HCE utilizado na análise segue os dados apresentados na Tab. 2, o revestimento considerado foi o Solel UVAC Cermet, com absorvidade de 0,955.

As propriedades do HTF consideradas foram do Therminol VP1, que apresenta temperatura máxima de 390°C. E a vazão mássica admitiu-se uma variação entre 0,35 kg/s e 0,8 kg/s (Valenzuela, et al., 2005).

3 RESULTADOS

A complexidade as equações levam a busca por soluções computacionais, como o EES, desenvolvido pela *F-Chart Software*. Sua função básica é resolver equações algébricas, apresenta a vantagem de identificar e agrupar as incógnitas, inclui solução de matrizes, possui propriedades matemáticas e termo físicas integradas e suporta tabelas de pesquisa e paramétricas.

Codificou-se aqui uma análise unidimensional no qual são aplicáveis para HCE menores que 500m, considerando:

1. Regime Permanente com energia solar constante;
2. Energia cinética e potencial desprezadas;
3. Queda de pressão desconsiderada na tubulação;
4. Operação do condensador, trocador de calor e receptores a pressão constante.

3.1 Validação do Modelo

Com o intuito de validar o modelo termodinâmico no EES, foi reproduzido o experimento de (Dudley, et al., 1994) considerando os dados do coletor LS-2 e o HTF Syltherm 800 (DOW Chemical Company, 1997).

A temperatura média entre a entrada e a saída do fluido no receptor (T_{7bulbo}) é definida e variada na tabela paramétrica entre 100°C e 350°C (devido a temperatura máxima dos HTF's). A perda de calor por comprimento de HCE ($q_{dissipado}$), o ganho de calor do HTF ($q_{armazenado}$) e a eficiência do coletor (η_{col}) são resultados das equações e apresentam os valores como visto na Tab. 3.

Tabela 3 – Tabela Paramétrica do Estudo Unidimensional no EES

Linha	T_{7bulbo} [°C]	$q_{dissipado}$ [W/m]	$q_{armazenado}$ [W/m]	η_{col} [%]
1	100	83,27	3387	73,92
2	150	97,39	3373	73,62
3	200	120,5	3350	73,11
4	250	156,4	3314	72,33
5	300	210,2	3261	71,15
6	350	288,3	3182	69,45

O modelo apresentado por Forristall (2003) foi validado com dois experimentos: um na plataforma de testes *Sandia National Laboratories* e outro na planta SEGS por Dudley et al. (1994). Verificou-se os dados obtidos aqui com os resultados validados no trabalho de Forristall, apresentando um erro médio menor que 1% na eficiência e de aproximadamente 6% na perda de calor (Fig. 5 e Tab. 4), o que permite utilizar este modelo para análise de viabilidade técnica de uma configuração para Cachoeira Paulista/ SP.

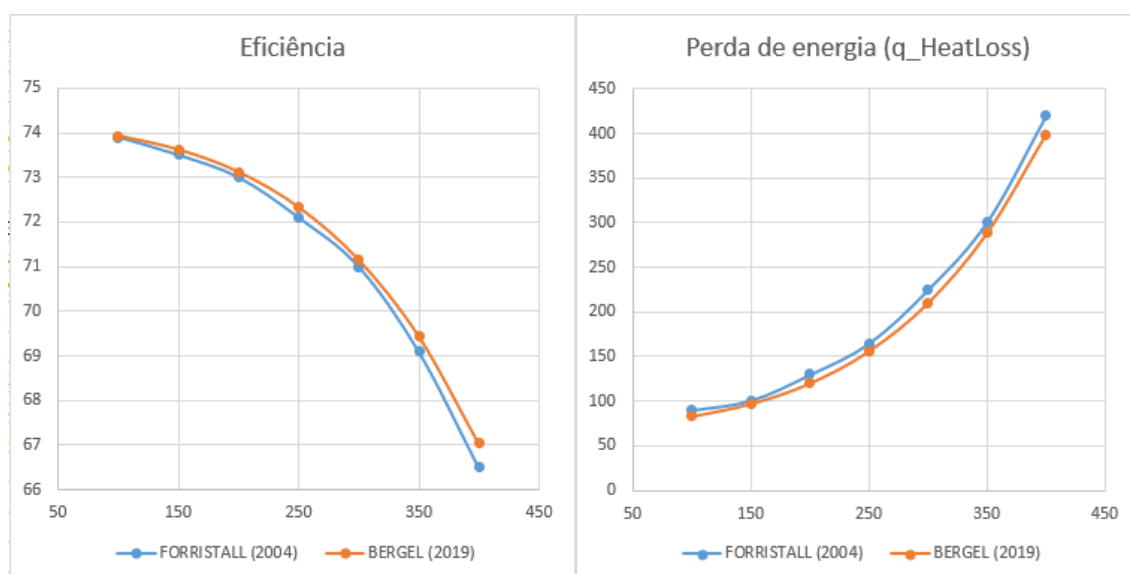


Figura 5 – Eficiência e perda de calor comparada entre Bergel (2019) e Forristall (2003).

Tabela 4 - Eficiência e perda de calor Bergel (2019) e Forristall (2003).

T_{7bulbo}	η_{col} (2003)	η_{col} (2019)	η_{col} (2019)/ η_{col} (2003)	$q_{dissipado}$ (2003)	$q_{dissipado}$ (2019)	$q_{dissipado}$ (2019)/ $q_{dissipado}$ (2003)
100	73,9	73,92	99,97%	90	83,27	108,08%
150	73,59	73,62	99,96%	100	97,39	102,68%
200	73,08	73,11	99,96%	125	120,5	103,73%
250	72,2	72,33	99,82%	160	156,4	102,30%
300	71	71,15	99,79%	220	210,2	104,66%
350	69,1	69,45	99,5%	300	288,3	104,06%

3.2 Resultados Aplicados em Cachoeira Paulista

Utilizando os dados climáticos de Cachoeira Paulista e aplicando ao modelo definido e validado anteriormente, aplicando o Therminol VP-1 como HTF, vazão volumétrica de aproximadamente 0,009 m³/s, incidência de 171 W/m², temperatura ambiente de 21,34°C e a velocidade do vento igual a 1,32 m/s, variando o modelo de coletor entre LS-2 e LS-3, obteve-se os resultados a seguir (Tab. 5).

Tabela 5 – Resultados LS-2 x LS-3.

T_{7bulbo}	$q_{dissipado}$ LS-2 [W/m]	$q_{dissipado}$ LS-3 [W/m]	$q_{armazenado}$ LS-2 [W/m]	$q_{armazenado}$ LS-3 [W/m]	η_{col} LS-2	η_{col} LS-3	$\Delta\eta_{col}$
100	24,45	26,57	600,3	697,4	72,78%	72,96%	0,18
150	38,76	40,91	586	683,1	71,04%	71,46%	0,42
200	62,13	64,32	562,6	659,7	63,79%	69,01%	0,8
250	98,55	100,8	526,2	623,2	57,17%	65,19%	1,4
300	153,2	155,6	471,5	568,4	47,54%	59,46%	2,29
350	232,6	235,2	392,1	488,8	33,95%	51,13%	3,59

Por essa tabela se observa que o coletor do tipo LS-3 apresenta maiores eficiências e maiores ganho de energia em todos os casos, apesar de maiores perdas de calor, devido as suas características geométricas. Com isso, as demais observações a serem analisadas neste estudo consideram o LS-3 como coletor.

Estudou-se a variação de vazão volumétrica entre 0,0005 e 0,1 m³/s, que apresentou variações insignificantes à eficiência do coletor. O mesmo observou-se variando a velocidade do vento entre 0 e 9,3 m/s e a temperatura ambiente entre 5,1 e 39°C.

Por outro lado, a variação do DNI médio, entre 104 W/m² e 246 W/m², e um pico em 1050 W/m² revelou uma dependência direta com o calor armazenado e a eficiência do coletor, como se vê na Fig. 6 e Fig. 7.

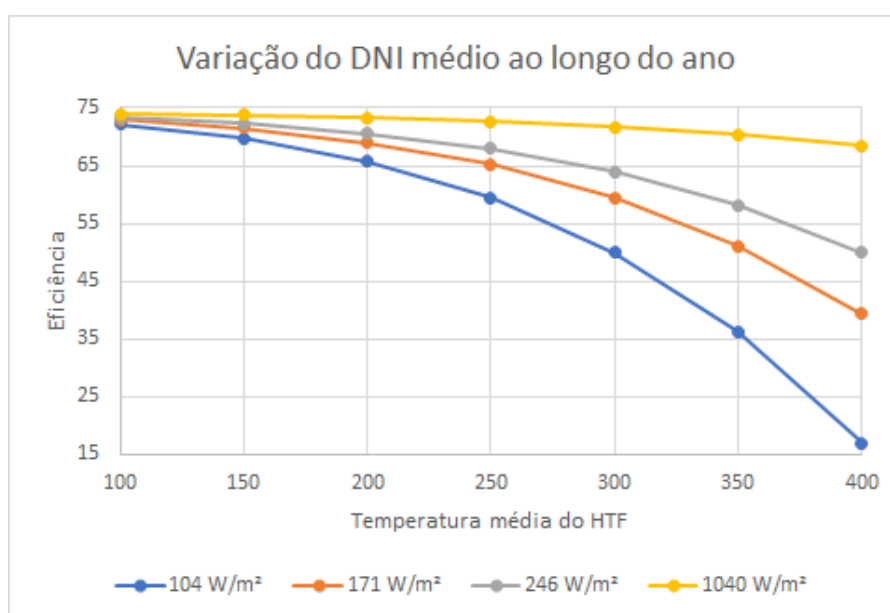


Figura 6 - Variação da eficiência pelo DNI.

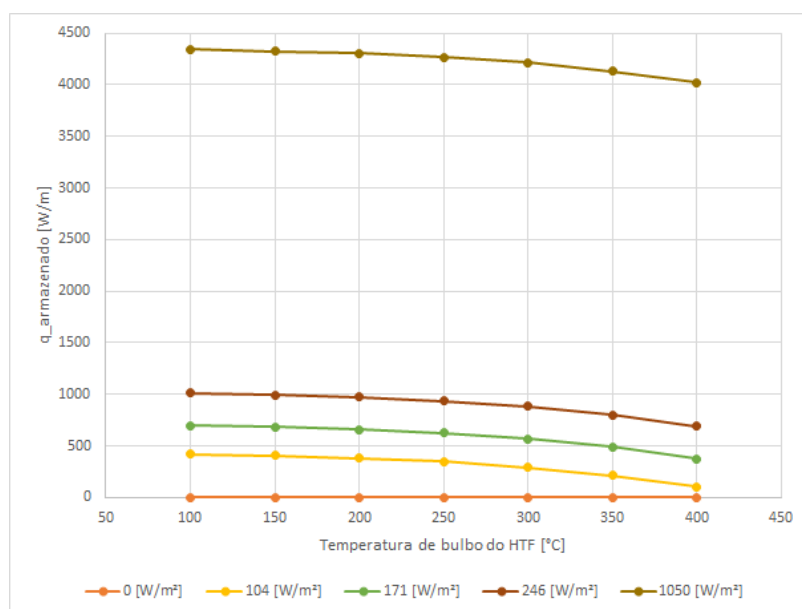


Figura 7 – Variação do calor armazenado pelo DNI.

A energia armazenada pelo HTF quando se considera a DNI de 246 W/m² é de aproximadamente 1kW/m, sendo esta a melhor configuração apresentada no estudo.

É importante ressaltar aqui, como visto na Tab. 6, que à temperatura média do HTF de 345°C e DNI de 104 W/m², a perda de calor é maior do que o ganho, constatando uma inviabilidade técnica da implantação de uma PTC na localização em estudo.

Tabela 6 – Perda e Ganho de calor com DNI de 104 W/m².

Temp média HTF	Perda de Calor 104 W/m²	Ganho de Calor 104 W/m²	Eficiência do Coletor 104 W/m²
100	20,6	419,7	72,2
150	34,94	405,4	69,73
200	58,36	382	65,7
250	94,9	345,4	59,42
300	149,8	290,6	49,98
345	220,2	220,2	37,34
350	229,5	210,8	36,27

3.4 Configuração Ideal

Um caso ótimo da configuração teria o maior DNI, maior temperatura ambiente, menor velocidade de ventos e maior vazão do HTF, resultando em um ganho máximo de 1010 W/m, com uma perda mínima de 31,36 W/m e uma eficiência de 73,5%.

Considerando 150 conjuntos de 5 coletores nesta configuração e as dimensões do coletor, seria possível obter uma energia acumulada de aproximadamente 74,5 MW na planta de concentração solar.

Esta energia disponível pode ser direcionada para geração de vapor, o qual pode ser usada diretamente ou introduzida em uma turbina para geração de eletricidade, ou ainda outros processos de aquecimento e resfriamento.

4 CONCLUSÕES

Segundo proposto, foi analisado ao longo deste trabalho, a aplicação de um sistema de concentração de energia solar por calhas parabólicas na cidade de Cachoeira Paulista/SP.

Conclui-se que há condições climáticas para o uso de sistemas de concentração nesta localidade, porém a variação de DNI, temperaturas e velocidade do vento tornam inevitável a aplicação de combustível auxiliar para os períodos de baixa insolação, principalmente no uso de turbinas a vapor.

Agradecimentos

Agradeço a DEUS em primeiro lugar. Agradeço ao meu esposo, filha, pais e toda família pelo apoio e paciência. Ao Instituto Tecnológico da Aeronáutica e a todos que contribuíram para realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Bandoria Marcelo C. S. Análise parcial-preliminar da Fragilidade Ambiental do município de Cachoeira Paulista – São Paulo pelo uso do método de Auxílio Multicritério à tomada de Decisão - São José dos Campos : INPE, 2018.
- Burkholder F. e Kutscher C. Heat Loss Testing of Schott's 2008 PRT70 Parabolic Trough Receiver - Golden, Colorado : NREL, 2009.
- Çengel Yunus A. Heat Transfer: A Pratical Approach - New York : McGraw-Hill, 2005.
- Dudley Vernon E. [et al.] Test Results: SEGS LS-2 Solar Collector - Albuquerque, New Mexico : SAND94, 1994.
- Fernandez-Garcia A. [et al.] Parabolic-trough solar collectors and their applications / Renewable and Sustainable Energy Reviews. - [s.l.] : Elsevier, 2010. - 14.
- Forristall R. Heat Transfer Analysis and Modeling of a Parabolic Trough Solar Receiver Implemented in Engineering Equation Solver - Golden, Colorado : NREL, 2003.
- Fuqiang Wang [et al.] Progress in concentrated solar power technology with parabolic trough collector system: A comprehensive review / Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017. - pp. 1314 –1328.
- Goswami D. Yogi Principles of Solar Engineering - Flórida : Taylor & Francis Group, 2015.
- Incropera Frank P. [et al.] Heat and Mass Transfer - Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2011.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais Base de Dados / Sonda - Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais. - 2015. - 20 de 09 de 2018. - <http://sonda.ccst.inpe.br/>.
- Kalogirou Soteris A. A Detailed Thermal Model of a Parabolic Trough Collector Receiver / Energy. - 2012. - pp. 298 - 306.
- Kalogirou Soteris A. Solar Energy Engineering Processes and Systems - [s.l.] : Elsevier, 2014. - Vol. 2nd.
- Maccaria A. [et al.] Archimede Solar Energy molten salt parabolic trough demo plant: a step ahead towards the new frontiers of CSP / Energy Procedia. - 2015. - pp. 1643 - 1651.
- NREL Concentrating Solar Power Projects / NREL Transforming ENERGY. - 18 de 03 de 2019. - <https://solarpaces.nrel.gov/>.
- Okonkwo Eric C. [et al.] Thermal Performance analysis of a Parabolic Trough Collector using Water-Based Green-Synthesized Nanofluids / Solar Energy. - 2018. - pp. 658-670.
- Patil Ramchandra G. [et al.] Alternative Designs of Evacuated Receiver for Parabolic Trough Collector / Energy. - 2018. - pp. 66-76.
- Price Hank [et al.] Advances in Parabolic Trough Solar Power Techonology / Journal of Solar Energy Engineering. - Maio de 2002. - pp. 109 - 125.
- Ratzel A. C., Hickox C. E. e Gartling D. K. Techniques for Reducing Thermal Conduction and Natural convection Heat Losses in Annular Receiver Geometries - Albuquerque, New Mexico : Sandia Laboratories, 1977.
- Sandeep H. M. e Arunachala U. C. Solar parabolic trough collectors: A review on heat tranasfer augmentation techniques / Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2017. - pp. 1218-1231.
- Secretaria de Energia e Mineração Anuário Estatístico de Energéticos por Município no Estado de São Paulo - São Paulo : Governo do Estado de São Paulo, 2018.
- Solar Electric Generating Station IX / Concentrating Solar Power Projects. - NREL, 1 de 10 de 2015. - 26 de 09 de 2018. - https://www.nrel.gov/csp/solarpaces/project_detail.cfm/projectID=36.
- Valenzuela Loreto [et al.] Control concepts for direct steam generation in parabolic troughs - Almeria, Spain : [s.n.], 2005.
- Xu Chao [et al.] Energy and exergy analysis of solar power tower plants / Applied Thermal Engineering. - Dezembro de 2011. - pp. 3904-3913.
- Xu Li [et al.] Analysis of Optical and Thermal Factors Effects on the Transient Performance of Parabolic Trough Solar Collectors / Solar Energy. - January de 2019. - pp. 195-209.

EVACUATED RECEIVER TUBE OF SOLAR ENERGY THERMALDYNAMIC ANALYSIS

Abstract. *This paper presents a thermodynamic analysis of an evacuated tube used in Parabolic Trough Solar applied to power generation and/or steam generator. It presents a relationship between various collector factors, location, solar incidence, heat transfer fluid and specific conditions. It was used Engineering Equation Solver (EES) to validate mathematical model and check technical feasibility of Cachoeira Paulista City system implementing.*

Key words: *Solar Concentrator, Evacuated Tube, Thermodynamic Analysis.*