

# OTIMIZAÇÃO DO COMPRIMENTO DE COLETORES PARABÓLICOS LINEARES EM SISTEMAS SOLAR TERMOELÉTRICOS

Milton Matos Rolim – miltonrolim@mail.com  
Gerência Regional de Educação Sertão do Araripe - PE  
Naum Fraidenraich – naumfraiden2@gmail.com  
Olga de Castro Vilela – ocv@ufpe.br  
Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

**Resumo.** Este trabalho apresenta um estudo da otimização da eficiência de uma coluna coletores parabólicos lineares, em função da quantidade de coletores em série (comprimento da linha). Foi simulada uma linha de 1 a 55 coletores LS-2 (47,1m a 2590,5m), em série, tal como dispostos em uma central solar termoeletrica. É estudada a variação da eficiência de conversão da energia solar em energia elétrica líquida (energia bruta menos eletricidade para bombeamento ao longo da linha). A influência do comprimento da linha de coletores não pode ser menosprezada. Linhas muito curtas não aproveitam valores menores de radiação, devido à necessidade de redução da vazão do fluido térmico e, conseqüentemente, do coeficiente de troca, enquanto muito compridas aumentam excessivamente a perda de carga no escoamento. É demonstrado que existe um valor ótimo, porém, com um largo patamar, em torno desse valor, no qual a variação de eficiência em função do comprimento da linha é muito pequena, o que permite uma ampla flexibilidade para escolha deste comprimento visando adequar outras variáveis operacionais.

**Palavras-chave:** Energia Solar, Concentrador Solar, Coletor Cilíndrico parabólico, Comprimento do coletor.

## 1. INTRODUÇÃO

O desempenho das centrais solar termoeletricas depende, dentre outros fatores, do sistema de bombeamento e tubulações de interligação. Em termos de custos cabe também destacar que eles constituem mais de 10% do custo total do Sistema. O procedimento básico consiste em calcular a configuração das tubulações principais e conexões a partir de uma velocidade assumida como um valor característico de projeto, escolhido pelo usuário, que otimiza, aproximadamente, o custo do sistema de bombeamento. Geralmente o valor que varia de 2 a 3 metros por segundo (m/s), tem sido assumido, baseado em resultados experimentais (Kelly e Kearney, 2002).

A eficiência de plantas solares termo elétricas com coletores cilindro parabólicos, depende não só da construção dos coletores, como da configuração do campo de coletores. Nas plantas comerciais os coletores são distribuídos em série formando uma linha, interligada em paralelo com linhas similares para alcançar a potência desejada. Desta forma o ponto de máxima eficiência do campo depende do número de coletores em série que constitui uma linha, o que resulta na determinação teórica da velocidade ótima que pode ser utilizada para estudo do restante da tubulação, conforme descrito em Kelly e Kearney (2002).

ROLIM et al. (2012), apresentam um estudo detalhado da otimização de parâmetros construtivos de coletores parabólicos lineares, em função da concentração geométrica. Foi simulada uma linha de 16 coletores LS-2, em série, tal como dispostos em uma central solar termoeletrica. A influência dos erros óticos, causados pelos mais diversos fatores, entre eles a variação do tamanho aparente do Sol ao longo do dia e do ano, se mostrou fundamental no dimensionamento do coletor parabólico linear, indicando que o fator local, isto é, a latitude pode ter grande influência na escolha da melhor relação de concentração geométrica do coletor.

Entretanto, a interligação dos coletores, objetivo deste trabalho, não foi analisada. A influência do número de coletores nas linhas do campo solar, sobre a eficiência do sistema, será estudada a seguir.

## 2. REVISÃO DE CONCEITOS

A energia térmica útil produzida por um coletor, considerando-se a incidência perpendicular à área da abertura do coletor, pode ser escrita como a diferença entre a radiação absorvida pelo absorvedor e as perdas térmicas.

$$q_u = \rho\tau\alpha\gamma I_{col} A_{abert} - q_{perdas} A_{abs} \quad (1)$$

A refletividade das superfícies refletoras é expressa por ( $\rho$ ), a transmissividade das superfícies transparentes atravessadas pela radiação por ( $\tau$ ), a absorvidade da superfície do absorvedor por ( $\alpha$ ), o fator de interceptação por ( $\gamma$ ) e a irradiância perpendicular a área de abertura do coletor por ( $I_{col}$ ). O termo de perdas térmicas depende da temperatura de operação e do nível de radiação solar.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Rolim et al. (2009) apresentaram uma metodologia para determinar a curva de eficiência de coletores cilíndricos parabólicos, baseada na solução analítica de Fraidenraich et al. (1997). Para as perdas térmicas do coletor, utiliza-se uma aproximação quadrática em função da diferença de temperatura entre absorvedor e temperatura ambiente, com dados experimentais dos coletores LS-2 apresentados por Dudley et al. (1994). Esta metodologia, permite a utilização de parâmetros físicos, como refletividade, absorvidade, características do fluido térmico, que podem ser obtidos de manuais técnicos ou outras publicações.

As características físicas do coletor são as apresentadas por Dudley et al. (1994), para os coletores Cermet LS-2 evacuados. Neste trabalho são utilizadas as características desses coletores, variando-se o comprimento da linha em função do número de coletores conectados em série. Derivam-se assim a eficiência e outras características do escoamento.

Resultados experimentais, Rabl (1985); Dudley et al. (1994), mostram que uma boa representação da potência das perdas térmicas por unidade de área ( $\dot{Q}''_{perdas}$ ) pode ser obtida por meio de um polinômio de segundo grau:

$$\dot{Q}''_{perdas} = U_o \cdot \Delta T + U_1 \cdot (\Delta T)^2 \quad (2)$$

O coeficiente de perdas ( $U$ ) pode ser representado pela derivada da Eq. (2), Fraidenraich et al. (1997).

$$U = U_o + 2 \cdot U_1 \cdot (\Delta T) \quad (3)$$

onde ( $U_o$ ) e ( $U_1$ ) são constantes características de um coletor em particular e ( $\Delta T$ ) a diferença entre a temperatura do absorvedor e do ambiente ( $T_{abs} - T_{amb}$ ).

A partir da radiação absorvida, Rolim (2007), utilizou a solução analítica da energia útil, desenvolvida por Fraidenraich et al (1997), que leva em conta o comportamento não linear das perdas térmicas, para calcular a potência útil ao longo do coletor. Esta metodologia permite avaliar e dimensionar sistemas compostos por coletores parabólicos lineares, utilizada neste trabalho.

#### 3.1 Procedimento

Para uma avaliação adequada da eficiência em função do comprimento da coluna de coletores é importante uma descrição o mais aproximada possível do coeficiente de troca convectiva entre o tubo do absorvedor e o óleo térmico e da perda de carga nesta tubulação, devido à necessária variação da vazão mássica (velocidade) desse óleo nos tubos absorvedores com a finalidade de manter a temperatura de saída do óleo térmico constante.

Os resultados que serão apresentados foram obtidos por meio da solução das equações com o software MatLab.

##### 3.3.1 Coeficiente de troca convectiva

As Eq. (4) e (5), expressam o coeficiente de troca convectiva entre o tubo absorvedor e o fluido em seu interior, função da vazão. A transferência convectiva da parede para o fluido é descrita pelo coeficiente ( $h_{conv}$ ):

$$h_{conv} = \frac{k}{d_i} N_u \quad (4)$$

onde ( $k$ ) é a condutividade térmica do fluido, ( $d_i$ ) o diâmetro interno do tubo absorvedor, e ( $N_u$ ) o número de Nusselt. Conforme recomendado por KREITH; KREIDER (1980), para o regime turbulento em tubos longos, ( $L/d_i$ ) >60 e número de Prandtl ( $P_r = \nu/\alpha$ ) entre 0,7 e 700,  $N_u$  é dado por:

$$N_u = 0,023 P_r^{1/3} R_e^{0,8} \quad (5)$$

onde ( $R_e = v \cdot d_i / \nu$ ) é o número de Reynolds, ( $\nu$ ) a velocidade do fluido no interior do tubo, ( $\nu = \mu/\rho_f$ ) a viscosidade cinemática do fluido, ( $\mu$ ) a viscosidade dinâmica do fluido, ( $\rho_f$ ) a massa específica do fluido,  $\alpha = k/(\rho_f c_p)$  a difusividade térmica do fluido,  $k$  é a condutividade térmica da parede do tubo absorvedor e  $c_p$  o calor específico do fluido térmico. O comprimento da linha de coletores será representada com a letra L.

Para esta solução específica a representação de ( $R_e$ ) é escrita em função da vazão mássica ( $\dot{m}_c$ ), em lugar da velocidade, conforme descrito abaixo:

$$\dot{m}_c = \rho_f A_t v ; \text{ então } v = \frac{\dot{m}_c}{\rho_f A_t} \quad (6)$$

$$R_e = v \frac{\rho_f d_i}{\mu} = \frac{\dot{m}_c}{\rho_f A_t} \frac{\rho_f d_i}{\mu} = \frac{\dot{m}_c}{\pi \left(\frac{d_i}{2}\right)^2} \frac{d_i}{\mu} \Rightarrow R_e = 4 \frac{\dot{m}_c}{\pi d_i \mu} \quad (7)$$

onde ( $A_t$ ) é a área da seção reta do tubo.

### 3.3.2 Perda de carga nos tubos absorvedores

Com o aumento do comprimento do coletor ou da linha de coletores, com a mesma diferença de temperatura, é necessário o aumento da vazão, aumentando assim a perda de carga. A perda de carga em tubos cilíndricos é avaliada, conforme descrito em Fox e MacDonald (1988).

$$\Delta p = h_p \cdot \rho_f \quad (8)$$

O parâmetro ( $h_p$ ) pode ser calculado pela fórmula universal de Darcy-Weisbach, expressa como

$$h_p = f_a \frac{L}{d_i} \frac{v^2}{2} \quad (9)$$

onde ( $f_a$ ) é o fator de atrito. Em regime turbulento ( $R_e > 4000$ ) a fórmula mais usada, para ( $f_a$ ) é a de Colebrook, apresentada por Fox e MacDonald (1988).

$$f_a = 0,25 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon/d_i}{3,706} + \frac{2,51}{\text{Re} \sqrt{f_a}} \right) \right]^{-2} \quad (10)$$

onde  $\varepsilon/d_i$  é a rugosidade relativa do tubo. Para a rugosidade ( $\varepsilon$ ) é utilizado o valor de referência ( $4,5 \cdot 10^{-5}$  m), fornecido por NREL (2013).

Para obter a solução da Eq. (10) com apenas uma iteração e um erro em torno de 1% utiliza-se como valor inicial a fórmula dada por MILLER (1983).

$$f_0 = 0,25 \left[ \ln \left( \frac{\varepsilon/d_i}{3,706} + \frac{7,54}{\text{Re}^{0.9}} \right) \right]^{-2} \quad (11)$$

Encontrado o valor de  $f_0$  (Eq. 11) e inserido no segundo membro da Eq. (10), pode-se obter rapidamente o valor de  $f_a$  com um erro em torno de (1%).

A potência mecânica, relativa à perda de carga, que deve ser fornecida pelo sistema de bombeamento ( $\dot{W}_{bomb}$ ) é dada pela equação

$$\dot{W}_{bomb} = \dot{m}_c h_p \quad (12)$$

e a potência elétrica necessária para o bombeamento ( $\dot{E}_{bomb}$ ) é dada pela equação

$$\dot{E}_{bomb} = \frac{\dot{W}_{bomb}}{\eta_{bomb}\eta_{motor}} \quad (13)$$

onde  $\eta_{bomb}$  é a eficiência da bomba do HTF (Heat Thermal Fluid) e  $\eta_{motor}$  a eficiência do motor da bomba de HTF.

A formulação apresentada coloca em evidência que o coeficiente de troca convectiva, entre o fluido e o tubo absorvedor aumenta com a vazão (Eq. 4, 5 e 7), aumentando a eficiência térmica do campo de coletores (redução das perdas térmicas). Porém, quando a vazão aumenta, também aumenta a perda de carga, necessitando mais energia elétrica para fazer circular o fluido térmico, o que reduz a energia líquida da planta (energia elétrica gerada menos a energia necessária para o bombeamento), o que sugere a existência de um ponto ótimo para vazão que corresponde à maior eficiência de transformação da energia solar em energia elétrica líquida fornecida pela planta.

### 3.3.3 Campo de coletores

Na Tab. 1 estão relacionados os parâmetros utilizados para calcular a eficiência térmica de uma linha em função do numero de coletores.

Tabela 1 – Parâmetros utilizados nas simulações

Item	Descrição	Valor
01	Eficiência ótica (Dudley et al., 1994)	0,731
02	Comprimento do módulo LS-2 (Dudley et al., 1994)	47,1 m
03	Diâmetro externo do absorvedor ( $d$ ) (Dudley et al., 1994)	70 mm
04	Diâmetro interno do absorvedor ( $d_i$ ) (Estimado)	66 mm
05	Fluido Térmico Therminol VP-1 ( <a href="http://www.therminol.com/pages/products/vp-1.asp">http://www.therminol.com/pages/products/vp-1.asp</a> )	-
06	Eficiência do ciclo termodinâmico (Rolim, 2007)	0,37
07	Eficiência isentrópica da turbina (Estimado)	0,90
08	Eficiência do gerador elétrico (Estimado)	0,97
09	Temperatura do fluido na entrada da coluna/linha de coletores (Dudley et al., 1994)	290 °C
10	Temperatura do fluido na saída da coluna/linha de coletores (Dudley et al., 1994)	391°C
11	Eficiência do motor da bomba de fluido térmico (Estimado)	0,95
12	Eficiência da bomba de fluido térmico (Estimado)	0,75
13	Rugosidade do tubo absorvedor (NREL, 2013)	$4,5 \cdot 10^{-5}$ m

Na Fig. 1 é apresentada em detalhe uma linha de 16 coletores em série. Esta quantidade de coletores em série, comprimento utilizado em plantas SEGS, é tomada como referência para comparação com os valores ótimos encontrados nas simulações.

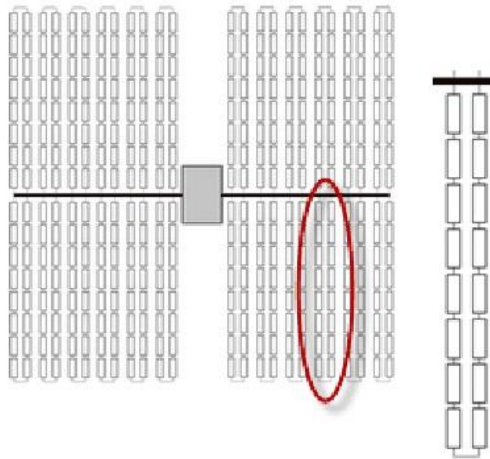


Figura 1 – Detalhe de uma linha de 16 coletores em série

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram simuladas linhas de coletores contendo de 1 a 55 coletores em série (comprimento de 47,1m a 2590,5). Os resultados são mostrados na Fig. 2, na qual é apresentada a eficiência de transformação da energia solar direta normal incidente na área de abertura do coletor em energia elétrica líquida (energia elétrica bruta menos a energia elétrica para bombeamento do fluido térmico) e o percentual da energia elétrica bruta que é utilizada para o bombeamento. Na Tab. 2, é apresentado um resumo comparativo de parâmetros no ponto de maior eficiência, para uma linha de 20 coletores, com os parâmetros em uma linha padrão das plantas SEGS, com 16 coletores em série.

##### 4.1 Eficiência em função do comprimento da linha

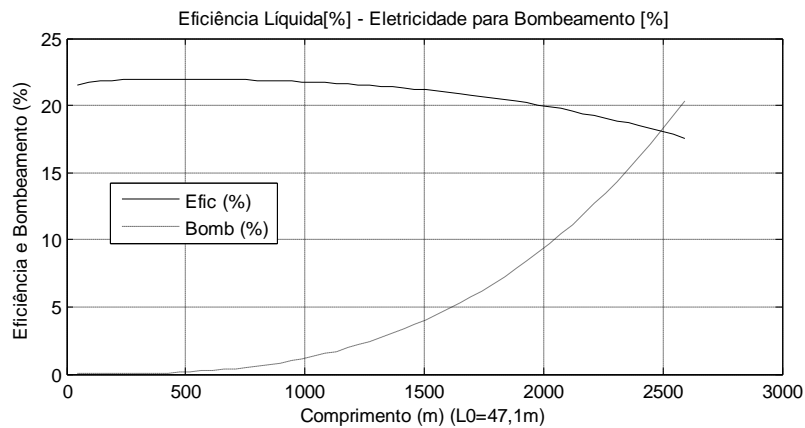


Figura 2 – Eficiência de energia solar direta normal na entrada do coletor e percentual da energia elétrica bruta utilizada no bombeamento do fluido térmico, com radiação direta normal  $I_{col}=950W/m^2$ .

Tabela 2. Resumo das simulações para  $I_{col}=950, 500$  e  $300 W/m^2$ .

$I_{col}$ (W/m <sup>2</sup> )	Referência	Eficiência.	NCS	$h_{conv}$ (W/Km <sup>2</sup> )	Vel-FT(m/s)
950	EficMax	21,9540	10	2.128,6	2,4
	NCS = 16	21,8964	16	3,1033	3,8
	NCS = 20	21,7998	20	3,7112	4,7
500	EficMax	20,5411	16	1.759,1	1,9
	NCS = 16	20,5411	16	1.759,1	1,9
	NCS = 20	20,5362	20	2.104,2	2,3
300	EficMax/	18,5385	25	1.539,2	1,6
	NCS = 16	18,5149	16	1.075,0	1,0
	NCS = 20	18,5318	20	1.286,4	1,3

Na Tab. 2, NCS é o número de coletores ligados em série, VEL-FT (m/s) é a velocidade do fluido térmico no interior do tubo absorvedor, dada em metros por segundo.

Conforme resultados da Fig. 2 e Tab. 2, pode ser observado que existe um patamar, em torno da eficiência máxima em que a variação da eficiência com o comprimento da linha de coletores é insignificante. Não obstante, a redução da eficiência em colunas em torno de 2000 m de comprimento já se torna significativa. Existe, portanto, uma ampla flexibilidade na escolha deste comprimento. Comprimentos maiores, além de reduzir as conexões em paralelo, evitam a redução excessiva da velocidade do fluido no interior dos tubos, para valores menores de radiação. Deste ponto de vista seria ótimo se fosse possível construir todo o campo com coletores exclusivamente em série. Porém, o aumento do comprimento aumenta a perda de carga devido ao necessário aumento da vazão, para evitar o superaquecimento do fluido.

Estes resultados demonstram a possibilidade de se encontrar o valor ótimo para o comprimento de cada linha de coletores em série e um patamar em torno do qual é possível escolher o valor mais adequado, conforme outros fatores, como as características das tubulações que ligarão as linhas entre si e com o bloco de potência, incluindo-se fatores técnicos e econômicos.

## 5. CONCLUSÕES

Foi demonstrada a existência de um valor ótimo para o comprimento de cada linha de coletores parabólicos de foco linear, em uma central solar termoeleétrica.

Os resultados demonstram a possibilidade de encontrar o valor ótimo para o comprimento de cada linha de coletores em série e um patamar em torno do qual é possível escolher o valor mais adequado, conforme outros fatores, como as características das tubulações que ligarão as linhas entre si e com o bloco de potência, incluindo-se também aspectos econômicos.

## REFERÊNCIAS

- Dudley, V.; Kolb, G. J.; Mahoney, A. R.; Mancini, T. R.; Matthews, C. W.; Sloan, M.; Kearney, D., 1994. Test Results SEGS LS-2 Solar Collector. SAND 94-1884, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM.
- Fraidenraich, N.; Gordon, J. M.; Lima R. C. F., 1997. Improved Solutions for Temperature and Thermal Power Delivery Profiles in Linear Solar Collectors. Solar energy Vol. 61 No. 3. pp 141 – 145.
- Fox, R. W; MacDonald, A.T. Introdução à mecânica dos fluidos. Editora Guanabara, Rio de Janeiro, 1988.
- Kelly, B. and Kearney, D., 2002. Parabolic Trough Solar System Piping Model. Final Report. National Renewable Energy Laboratory. Disponível em <http://www.nrel.gov/csp/troughnet/pdfs/40165.pdf>, acessado em 26 de dezembro de 2013.
- Kreith, F; Kreider, J.F.. Principles of Thermodynamics and Heat Transfer Applied to Solar Energy. In Solar Energy Handbook, Kreith, F and Kreider, J.F., editors. New York: McGraw-Hill, 1980.
- Miller, R. W. Flow measurement Engineering Handbook. New York: MacGraw-Hill, 1983.
- NREL, 2013. National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model - SAM. Programa de simulação gratuito. Disponível em <https://sam.nrel.gov/content/downloads>. Acessado em setembro de 2013.
- Rabl, A., 1985. Active Solar Collectors and Their Applications. Oxford University Press. New York.
- Rolim, M. M., Fraidenraich, N., Vilela, O. C., 2012. Otimização de Parâmetros Construtivos de Coletores Parabólicos Lineares. IV Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012
- Rolim, M. M., 2007. Modelagem Analítica de Geração Solar Térmica de Eletricidade, com Concentradores Parabólicos de Foco Linear. Tese de Doutorado, DEN/UFPE, Recife.

## LENGTH OPTIMIZATION OF LINEAR PARABOLIC COLLECTORS IN SOLAR THERMAL POWER PLANT

### ABSTRACT

**Abstract.** *This paper presents an optimization study of the efficiency of parabolic trough collectors, regarding the configuration of rows (length of row). It have been simulated row configurations from 1 up to 55 collectors of the model LS - 2 ( 47.1 m to 2590.5 m ) in series, as arranged in a solar thermal power plant . The variation of the conversion efficiency of solar energy into net electricity (gross energy less electricity for pumping along the row ) is studied. The influence of the length of the row of collectors cannot be overstated. Rows very short do not take advantage of lower radiation values due to the need to reduce the flow of heat transfer fluid and, consequently, the exchange coefficient, while very long rows, increase excessively the pressure drop in the flow. It is shown that there is an optimum value, but with a broad plateau around this maximum, in which the variation in efficiency due to the length of the row is very small, which allows flexibility in the choice of this length in order to adjust the other operational variables.*

**Key words:** *Solar Energy, Solar Concentrator, Parabolic Trough, Collector length.*