

AValiação DO DNI NA TECNOLOGIA CLFR PARA A CIDADE DE NATAL/BR

Gabriel da Silva Lima - limagabriel@bct.ect.ufrn.br

Gabriel Ivan Medina Tapia - gmedinat@ct.ufrn.br

Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Departamento de Engenharia Mecânica

Resumo. O desenvolvimento de tecnologias para proveito da energia solar tem se destacado nos últimos anos devido ao seu enorme potencial de utilização para geração de energia elétrica. Entre essas tecnologias se destaca a Energia Solar Concentrada (Concentrated Solar Power - CSP) que concentram a radiação solar para um ponto específico. Devido aos concentradores estarem sujeitos a variação sazonal da irradiação solar é de grande importância o desenvolvimento de modelos matemáticos que permitam calcular essa energia. Este trabalho, de forma mais precisa, propõe uma técnica para calcular a quantidade de energia solar que otimize o tempo de funcionamento dos concentradores solares, particularmente os Coletores Lineares Fresnel (Compact Linear Fresnel Reflector - CLFR). A técnica consiste em estabelecer um algoritmo para fins de cálculo da Irradiância Normal Direta (Direct Normal Irradiance - DNI) levando em conta na análise térmica as perdas da energia associados ao funcionamento deste tipo de sistema. O modelo é aplicado para as condições climáticas da cidade de Natal/Brasil, mas pode também ser usado para outras regiões do mundo.

Palavras-chave: Irradiância Normal Direta (DNI), Coletores Lineares Fresnel (CLFR), Energia Solar Concentrada (CSP)

1. INTRODUÇÃO

Coletores de energia solar concentrada (CSP) são painéis que captam a radiação do Sol e a redirecionam para um único ponto. Eles podem assumir diferentes formatos nas quais pode-se destacar o concentrador cilíndrico parabólico (CCP), disco parabólico (DP), coletor linear Fresnel (CLFR), torre central (TC), entre outros.

No caso do CLFR um conjunto de espelhos planos direcionam a radiação solar para um receptor central. Nos tubos instalados dentro desses receptores circula um fluido (água, por exemplo) que recebe energia da radiação solar aumentando sua temperatura e que pode ser usado para mover uma turbina num ciclo Rankine.

Dependendo da aplicação requerida a tecnologia que utiliza CSP pode proporcionar uma ampla faixa de capacidade em geração de energia elétrica que vai de alguns kV até 50 MW (Fernandez-Garcia *et al.*, 2010). O uso de óleo sintético ou orgânico tem sido muito usado como fluido de trabalho devido a seu baixo custo (Purohit *et al.*, 2013). Entretanto, o uso de sal fundido como fluido de trabalho proporciona maiores temperaturas permitindo que a turbina opere com maior eficiência (Desai *et al.*, 2014).

Para a otimização de sistemas de energia solar concentrada uma série de parâmetros devem ser analisados, entre eles se destaca a irradiância normal direta (DNI) (Desai *et al.*, 2014). A irradiância normal direta é a taxa de variação de energia que incide por unidade de área (W/m^2).

Essa otimização consiste em buscar uma forma de diminuir o tempo de funcionamento dos campos de coletores CSP para que não haja superdimensionamento desses sistemas, mas que por sua vez permita o máximo aproveitamento de energia solar.

Devido a variação de DNI ao longo do dia e das estações, determinar a quantidade de radiação captada é essencial para um projeto, pois isso irá determinar o quanto de energia pode ser produzida por um sistema que utiliza concentradores solares.

Nesse trabalho, primeiramente será realizado uma análise termodinâmica de um campo CLFR e depois será aplicado os conceitos teóricos desenvolvidos para fazer uma simulação para a cidade de Natal/Brasil.

2. ANÁLISE TERMODINÂMICA DO SISTEMA

Na Fig. 1 é apresentado o esquema do sistema em análise.

A eficiência de um coletor solar é dada por,

$$\eta_{col} = \frac{\text{Taxa de calor aproveitada no receptor}}{\text{Taxa de calor incidente no coletor}} = \frac{\dot{Q}_{gain}}{\dot{Q}_{inc}} \quad (1)$$

Como a taxa de calor aproveitada no receptor é a diferença entre a taxa de calor absorvida pelo receptor ($\dot{Q}_{abs,rec}$) e

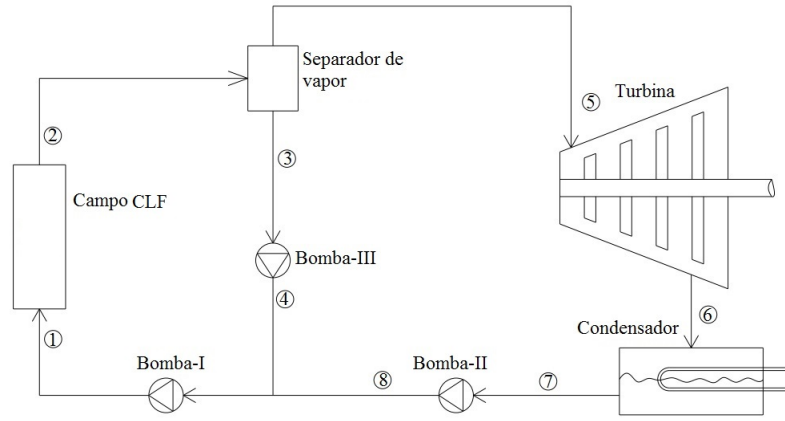


Figura 1. Esquema de um sistema CLFR

a taxa de calor perdida no receptor ($\dot{Q}_{perdas,rec}$), e a taxa de calor incidente no coletor é dada pelo produto da irradiância no projeto (I_D) pela área do coletor solar,

$$\eta_{col} = \frac{\dot{Q}_{abs,rec} - \dot{Q}_{los,rec}}{I_D \cdot A_p} \quad (2)$$

A eficiência ótica é definida (Stine and Geyer, 2001):

$$\eta_{ot} = \frac{\text{Taxa de calor absorvida pelo receptor}}{\text{Taxa de calor incidente no coletor}} = \frac{\dot{Q}_{abs,rec}}{\dot{Q}_{inc}} = \frac{\dot{Q}_{abs,rec}}{I_D \cdot A_p} \quad (3)$$

A taxa de perda de calor no receptor é proporcional ao produto área do coletor e a diferença de temperatura ($T_m - T_\infty$), sendo T_m a temperatura média entre as temperaturas antes e depois do receptor e T_∞ a temperatura ambiente. A constante de proporcionalidade μ_L é denominada de coeficiente de perdas baseada na área do coletor.

$$\eta_{col} = \eta_{ot} - \mu_L \cdot \frac{T_m - T_\infty}{I_D} \quad (4)$$

Do balanço de energia no sistema, Fig. 1, juntamente com a Eq. (1) encontra-se,

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{m}_D \cdot (h_2 - h_1) = \eta_{col} \cdot I_D \cdot A_p \quad (5)$$

Das Eqs. (4) e (5),

$$\dot{m}_D = \left(\frac{\eta_{ot} \cdot I_D}{\Delta h} - \frac{\mu_L \cdot \Delta T}{\Delta h} \right) \cdot A_p \quad (6)$$

Fazendo o mesmo procedimento para o caso real, sendo I a irradiância real,

$$\dot{m} = \left(\frac{\eta_{ot} \cdot I}{\Delta h} - \frac{\mu_L \cdot \Delta T}{\Delta h} \right) \cdot A_p \quad (7)$$

No sistema, Fig. 1, desprezando as perdas nas bombas I, II e III e do balanço de energia, encontra-se,

$$\dot{Q}_{gain} = \dot{m}_{cl} \cdot (h_2 - h_1) = \dot{m}_{t,c} \cdot (h_5 - h_7) \quad (8)$$

Das Eqs. (8) e (5) para o caso real, sendo η a eficiência real do coletor,

$$\dot{m}_{t,c} \cdot (h_5 - h_7) = \eta \cdot I \cdot A_p \quad (9)$$

Da conservação de massa e energia no volume de controle delimitados pelos pontos 1, 3 e 7 encontra-se,

$$\dot{m}_3 + \dot{m}_7 = \dot{m}_1 \quad (10)$$

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_7 \cdot h_7 = \dot{m}_1 \cdot h_1 \quad (11)$$

Dividindo a Eq. (11) por \dot{m}_1 :

$$\frac{\dot{m}_3}{\dot{m}_1} \cdot h_3 + \frac{\dot{m}_7}{\dot{m}_1} \cdot h_7 = h_1 \quad (12)$$

Denominando \dot{m}_7/\dot{m}_1 de fração de saída seca do fluído de trabalho e denotando por x , a Eq. (12) pode ser escrita com a combinação da Eq. (10), como,

$$h_1 - h_3 = x \cdot (h_7 - h_3) \quad (13)$$

$$h_1 = (1 - x) \cdot h_3 + x \cdot h_7 \quad (14)$$

Da mesma forma, do balanço de conservação de massa e energia no volume de controle da região entre os pontos 2, 3 e 5:

$$\dot{m}_3 \cdot h_3 + \dot{m}_5 \cdot h_5 = \dot{m}_2 \cdot h_2 \quad (15)$$

Como $\dot{m}_2 = \dot{m}_1$ e $\dot{m}_5 = \dot{m}_7$, dividindo eles por \dot{m}_1 ,

$$(1 - x) \cdot h_3 + x \cdot h_5 = h_2 \quad (16)$$

Uma relação linear pode ser obtida entre vazão mássica de vapor e a potência de saída da turbina através da equação da linha de Willans¹:

$$\dot{W} = a + b \cdot \dot{m} \quad (17)$$

E a potência de saída prevista é dada por:

$$\dot{W}_D = a + b \cdot \dot{m}_D \quad (18)$$

Assumindo uma perda de potência y em relação a saída nominal da turbina:

$$a = -y \cdot \dot{W}_D \quad (19)$$

Combinando as Eqs. (17) e (18) com a Eq. (19) encontra-se

$$\dot{W}_D - \dot{W} = b \cdot (\dot{m}_D - \dot{m}) \quad (20)$$

Nas Eqs. (6) e (7) fazendo,

$$\alpha = \frac{\eta_{ot}}{\Delta h} \quad (21)$$

$$\beta = \frac{\mu_L \cdot \Delta T}{\Delta h} \quad (22)$$

encontramos,

$$\dot{m}_D = (\alpha I_D - \beta) \cdot A_p \quad (23)$$

$$\dot{m} = (\alpha I - \beta) \cdot A_p \quad (24)$$

Combinando a Eq. (23) e a Eq. (24) com a Eq. (20):

$$\dot{W}_D - \dot{W} = b \cdot (\alpha I_D - \beta) \cdot A_p - b \cdot (\alpha I - \beta) \cdot A_p$$

$$\dot{W}_D - \dot{W} = b \cdot \alpha \cdot (I_D - I) \cdot A_p$$

$$\dot{W}_D - \dot{W} = \tau \cdot (I_D - I) \cdot A_p \quad (25)$$

Na qual,

$$\tau = b \cdot \alpha \quad (26)$$

Para o projeto considera-se que a potência na turbina é a potência de saída P_D . Na análise são desconsideradas as variações de energia cinética e potencial na turbina, sendo assim a eficiência isentrópica da turbina pode ser calculada pela Eq. (27),

$$\eta_{is} = \frac{\dot{W}_D}{\dot{m}_D \cdot \Delta h_{is}} \quad (27)$$

Combinando as Eqs. (18) e (19) encontra-se,

$$\dot{W}_D = -y \cdot \dot{W}_D + b \cdot \dot{m}_D$$

$$\dot{W}_D = \frac{b \cdot \dot{m}_D}{1 + y} \quad (28)$$

Combinando com a Eq. (26),

$$\dot{W}_D = \frac{\tau \cdot \dot{m}_D}{\alpha \cdot (1 + y)} \quad (29)$$

Das Eqs. (23) e (29),

$$\frac{\dot{W}_D}{A_p} = \frac{\tau \cdot (\alpha I_D - \beta)}{\alpha \cdot (1 + y)} = \alpha' \cdot I_D - \beta' \quad (30)$$

¹A linha de Willans é dada por uma aproximação linear em um gráfico “consumo de vapor vs potência de saída” para uma turbina a vapor. Os parâmetros a e b correspondem a potência perdida devido às perdas internas, em W , e a inclinação da curva, em J/kg , respectivamente.

Sendo,

$$\alpha' = \frac{\tau}{1 + y} \quad (31)$$

e,

$$\beta' = \frac{\tau \cdot \beta}{\alpha \cdot (1 + y)} \quad (32)$$

No intervalo de tempo de duração dt a turbina perde de potência $P_D - P$, ou seja, a expressão $(P_D - P) \cdot dt$ equivale a perda diferencial de carga na turbina. A perda total L , por unidade de área, pode ser calculada da seguinte equação,

$$L = \int \frac{(\dot{W}_D - \dot{W})}{A_p} dt \quad (33)$$

Ou, usando Eq. (25),

$$L = \int \tau \cdot (I_D - I) \cdot dt \quad (34)$$

A Eq. (34) mostra que as perdas de carga são proporcionais a diferença entre a irradiância captada no projeto e a real. Devemos ressaltar que esse intervalo dt não corresponde a um intervalo de tempo de operação, e sim a uma diferença entre tempos de funcionamento da turbina. É importante ressaltar que quanto maior a irradiância no refletor menor será o tempo necessário de operação para atingir uma determinada energia a ser utilizada.

Se no projeto é prevista uma determinada irradiância I_D a ser captada então será necessário um tempo de funcionamento t_D para a turbina. Também vamos levar em conta que existe uma irradiância mínima (I_c) que o sistema pode aproveitar em um tempo limite de funcionamento da turbina (t_c). Adotando o tempo de funcionamento como uma função da irradiância ($t = f(I)$) a perda total na turbina é expressa por,

$$L = \int_{f(I_D)}^{f(I_c)} \tau \cdot (I_D - I) \cdot dt \quad (35)$$

A integral da Eq. (35) é proporcional a área hachurada na Fig. 2, desta forma podemos reescrever a Eq. 35 como,

$$L = \int_{I_c}^{I_D} \tau \cdot (f(I_c) - f(I)) \cdot dI \quad (36)$$

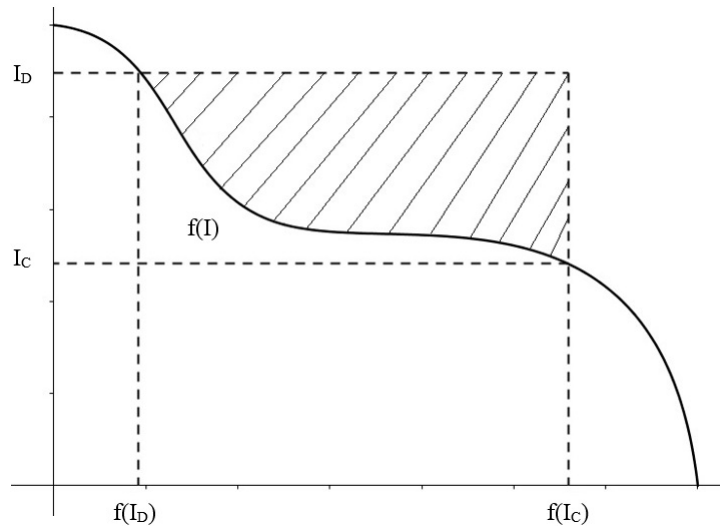


Figura 2. Irradiância versus tempo de operação

Considerando τ e $f(I_c)$ constantes,

$$L = \tau \cdot \left(f(I_c) \cdot (I_D - I_c) - \int_{I_c}^{I_D} f(I) \cdot dI \right) \quad (37)$$

A energia de saída por unidade de área, no projeto é,

$$E_D = \frac{\dot{W}_D}{A_p} \cdot f(I_c) \quad (38)$$

A energia de saída total efetiva (E) será dada por:

$$E = E_D - L = \frac{\dot{W}_D}{A_p} \cdot f(I_c) - \tau \cdot \left(f(I_c) \cdot (I_D - I_c) - \int_{I_c}^{I_D} f(I) \cdot dI \right) \quad (39)$$

Usando a Eq. (30):

$$E = (\alpha' \cdot I_D - \beta') \cdot f(I_c) - \tau \cdot \left(f(I_c) \cdot (I_D - I_c) - \int_{I_c}^{I_D} f(I) \cdot dI \right) \quad (40)$$

Fazendo a primeira e segunda derivada em relação a irradiância prevista (I_D):

$$\frac{dE}{dI_D} = \alpha' \cdot f(I_c) - \tau \cdot f(I_c) + \tau \cdot f(I_D) \quad (41)$$

$$\frac{d^2E}{dI_D^2} = \tau \cdot f'(I_D) \quad (42)$$

Para encontrar os pontos críticos, a Eq. (41) resulta em,

$$\alpha' \cdot f(I_c) - \tau \cdot f(I_c) + \tau \cdot f(I_D) = 0 \quad (43)$$

$f(I_D)$ representa o tempo de operação previsto para o maior valor de I_D captado. Isto é,

$$f(I_{D,max}) = \frac{\tau - \alpha'}{\tau} \cdot f(I_c) \quad (44)$$

Usando a Eq. (31),

$$f(I_{D,max}) = \frac{y}{1+y} \cdot f(I_c) \quad (45)$$

Para uma irradiância mínima (crítica) absorvida teremos uma potência mínima de operação na turbina (\dot{W}_{min}). Usando a Eq. (25) encontramos,

$$\dot{W}_D - \dot{W}_{min} = \tau \cdot (I_D - I_c) \cdot A_p \quad (46)$$

Da Eq. (28) e usando a relação $\tau = b \cdot \alpha$,

$$\tau = \alpha \cdot \frac{\dot{W}_D \cdot (1+y)}{\dot{m}_D} \quad (47)$$

Combinando as Eqs. (46) e (47),

$$\dot{W}_D - \dot{W}_{min} = \alpha \cdot \frac{\dot{W}_D \cdot (1+y)}{\dot{m}_D} \cdot (I_D - I_c) \cdot A_p \quad (48)$$

ou,

$$I_c = I_D - \frac{(\dot{W}_D - \dot{W}_{min}) \cdot \dot{m}_D}{\alpha \cdot \dot{W}_D \cdot A_p \cdot (1+y)} \quad (49)$$

Das Eqs. (23) e (49),

$$I_c = I_D - \frac{(\dot{W}_D - \dot{W}_{min}) \cdot (\alpha I_D - \beta)}{\alpha \cdot \dot{W}_D \cdot (1+y)} \quad (50)$$

ou,

$$I_c = I_D - \frac{\left(1 - \frac{\dot{W}_{min}}{\dot{W}_D}\right) \cdot (\alpha I_D - \beta)}{\alpha \cdot (1+y)} \quad (51)$$

3. MODELO USADO NA SIMULAÇÃO

Duffie and Beckman (2013) propõem que a DNI efetiva, para um modelo de céu limpo, seja dado pelo produto entre a radiação extraterrestre (G_{ext}), a transmitância atmosférica para a radiação direta (τ_{atm}) e o cosseno do ângulo entre a normal da superfície e a radiação (α),

$$G_{DNI} = G_{ext} \cdot \tau_{atm} \cdot \cos(\alpha) \quad (52)$$

A radiação extraterrestre, segundo Duffie and Beckman (2013) é definida com base no n-ésimo dia do ano e na constante solar².

A transmitância atmosférica é dada por,

$$\tau_{atm} = a_0 + a_1 \cdot \exp\left(\frac{-k}{\cos(\theta_z)}\right) \quad (53)$$

em que θ_z é o ângulo de zênite e a_0 , a_1 e k são constantes que levam em conta o clima da região e a altitude (A),

$$a_0 = r_0 \cdot (0,4237 - 0,00821 \cdot (6 - A)^2) \quad (54)$$

$$a_1 = r_1 \cdot (0,5055 + 0,00595 \cdot (6,5 - A)^2) \quad (55)$$

$$k = r_k \cdot (0,2711 + 0,01858 \cdot (2,5 - A)^2) \quad (56)$$

Segundo Duffie and Beckman (2013) para a cidade de Natal/Brasil, clima tropical, $r_0 = 0,95$, $r_1 = 0,98$ e $r_k = 1,02$.

O ângulo α é definido com base em parâmetros geométricos e geográficos descritos por Duffie and Beckman (2013).

Para a cidade de Natal/Brasil considerando $A = 0$ e uma inclinação 15° para o campo CLFR foi criado a curva de duração da DNI efetiva mostrada na Fig. 3.

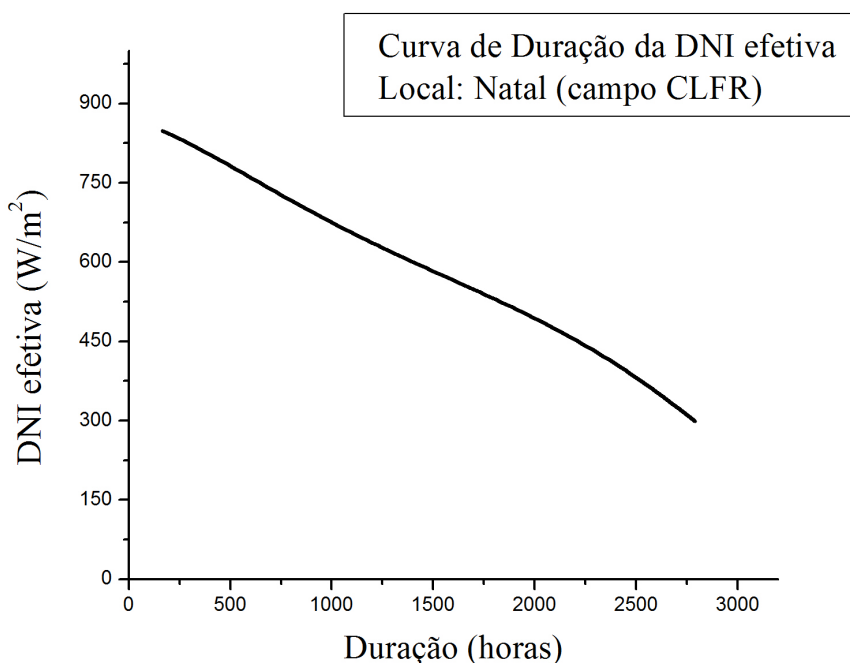


Figura 3. Curva de duração da DNI efetiva para um campo de CLFR

4. RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA DO SISTEMA

Na simulação é usado os dados apresentados em Desai *et al.* (2014) e o modelo apresentado na seção anterior. Além disso foi considerada a temperatura ambiente de 30°C para a cidade de Natal/Brasil.

A partir dos dados de Tab. 1 e das equações deduzidas nas seções anteriores pode-se obter o valor de I_D com base na curva de duração mostrada Fig. 3.

²Sendo considerado o valor de 1367 W/m^2 , segundo Duffie and Beckman (2013).

Tabela 1. Dados para a simulação (Desai *et al.*, 2014)

Eficiência ótica, η_{ot}	0,6
Coeficiente de perdas, μ_L	$0,2 \text{ W/m}^2 \text{ K}$
Fração de saída seca, x	0,5
Temperatura de entrada na turbina, T_5	$250,4 \text{ }^\circ\text{C}$
Pressão de entrada na turbina, P_5	40 bar
Pressão de entrada no coletor, P_1	45 bar
Fração de perda na turbina, y	0,2
Coeficiente da Equação de Willans, b	686 kJ/kg
Temperatura ambiente, T_∞	$30 \text{ }^\circ\text{C}$

O algoritmo desenvolvido segue a seguinte sequência:

1. Calcula-se o valor de ΔT a partir dos estados conhecidos antes e depois do coletor. Lembrar que essa variação de temperatura não é a diferença entre as temperaturas antes e depois do coletor, e sim, a subtração entre a temperatura média no coletor e a temperatura ambiente;
2. Adota-se um valor de I_D e substitui-se na Eq. (51) na qual os demais parâmetros são conhecidos. Desta forma encontra-se o valor I_c ;
3. Usando os valores apresentados na Fig. 3 pega-se o valor de $f(I_c)$ e substitui-se na Eq. (45) para encontrarmos o valor de $f(I_D)$;
4. Dos valores apresentados na Fig. 3 pega-se o valor de I_D ;
5. Retorna-se ao passo 2 até convergir o valor de I_D .

Na Tab. 2 são apresentados os resultados destas iterações.

Tabela 2. Resultados das iterações

Parâmetros	Iteração 1	Iteração 2	Iteração 3	Iteração 4
I_C	278,9	297,1	298,2	298,3
$f(I_C)$	2855	2796	2793	2792
I_D	700	747,2	750,2	750,4
$f(I_D)$	658,9	645,3	644,5	644,4

Após a quarta iteração observa-se que o valor de DNI que otimiza o campo de CLFR na cidade de Natal/Brasil é de $750,4 \text{ W/m}^2$. Além disso, o modelo permite calcular o valor mínimo necessário de DNI para que o CLFR funcione nas mínimas condições, que para o caso estudado corresponde ao valor de $298,3 \text{ W/m}^2$.

5. CONCLUSÕES

Nesse trabalho é desenvolvido o modelo matemático para calcular o valor ótimo de DNI. A partir dos valores obtidos pelas iterações é possível fazer um dimensionamento do campo de coletores que atenda as condições climáticas onde o sistema será instalado. Além disso, usando a metodologia implementada é possível projetar diversas configurações de sistemas que utilizem a tecnologia CSP.

Apesar da análise realizada ter sido voltada para a tecnologia CSP voltada para CLFR a metodologia também pode ser usada para as tecnologias CCP e TC.

Deve-se ressaltar que o modelo implementado nesse trabalho é teórico. Contudo o modelo desenvolvido não perde relevância devido a boa aproximação que este modelo tem com a realidade (Duffie and Beckman (2013) e Desai *et al.* (2014)).

REFERÊNCIAS

- Desai, N.B., B., K.S. and S., B., 2014. "Optimization of design radiation for concentrating solar thermal power plants without storage". *Solar Energy*, Vol. 107, pp. 98–112.
- Duffie, J.A. and Beckman, W.A., 2013. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, New Jersey, 4th edition.

- Fernandez-Garcia, A., Zarza, E., Valenzuela, L. and Perez, M., 2010. “Parabolic-trough solar collectors and their applications”. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 14, pp. 1695–1721.
- Purohit, I., Purohit, P. and Shekhar, S., 2013. “Evaluating the potential of concentrating solar power generation in northwestern india”. *Energy Policy*, Vol. 62, pp. 157–175.
- Stine, B.W. and Geyer, M., 2001. “Power from the sun”. 18 Jun. 2015 <<http://www.powerfromthesun.net/>>.

DNI AVALIATION OF CLFR TECHNOLOGY FOR CITY OF NATAL/BR

Abstract. The development of technologies for the benefit of solar energy has been outstanding in recent years due to its enormous potential use for generating electricity. Among these technologies highlights the Concentrated Solar Power (CSP) that concentrate the solar radiation to a specific point. Because of the concentrators are subject to seasonal variation of solar irradiation is of great importance the development of mathematical models to calculate this energy. This work, more precisely, proposes a technique for calculating the amount of solar energy that optimizes the operating time of the solar concentrator, particularly Compact Linear Fresnel Reflector (CLFR). The technique consists in establishing an algorithm to Direct Normal Irradiance calculation purposes taking into account the thermal analysis of the energy losses associated with the operation of this type of system. The model is applied to the climatic conditions of the city of Natal/Brazil, but can also be used for other parts of the world.

Key words: *Direct Normal Irradiance (DNI), Compact Linear Fresnel Reflector (CLFR), Concentrated Solar Power (CSP)*