

MODELAGEM E ESTUDO DE CONCENTRADORES SOLARES PLANOS

Maury Martins de Oliveira Júnior – maurymoj@gmail.com

Delly Oliveira Filho – delly@ufv.br

Aristides Ribeiro – ribeiro@ufv.br

Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Agrícola

Resumo. *O uso da energia solar para geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos está crescendo a uma alta velocidade já a alguns anos, mas, apesar deste crescimento, o investimento em sistemas fotovoltaicos ainda é elevado. Uma das soluções usadas para reduzir este investimento inicial se dá através do uso de concentradores, que reduzem a quantidade de módulos necessários para gerar uma mesma quantidade de energia. No entanto, ao se aumentar a radiação incidente sobre uma célula solar há, também, um aumento na temperatura da célula, o que resulta em uma redução no rendimento da célula. Este estudo avalia as variações na quantidade de energia gerada pelos módulos para diferentes geometrias de concentradores solares planos, com um espelho, e compara os resultados obtidos considerando os efeitos da temperatura e sem considerar estes efeitos, que normalmente são usados para dimensionamento de sistemas fotovoltaicos. Os cálculos foram realizados para a cidade de Viçosa, MG (20° S). Foi obtido que o modelo que considera a temperatura apresenta valores de energia cerca de 8.2% menor que o segundo modelo. O potencial de uso de concentradores em diferentes locais foi avaliado com base em cinco locais, observando-se que a medida que o local apresenta temperaturas mais baixas, há um maior potencial para uso de concentradores com maior razão de concentração sem alteração na tecnologia de célula solar fotovoltaica.*

Palavras-chave: Energia Solar, Concentrador solar

1. INTRODUÇÃO

Os módulos fotovoltaicos (PV) representam a maior parte do investimento inicial para instalação do sistema e, portanto, são foco de muitos estudos com o objetivo de tornar sistemas PV soluções mais viáveis e competitivas. Uma das formas de se reduzir o custo do kWh produzido é aumentar a quantidade de radiação incidente sobre o módulo, o que pode ser realizado através da concentração ótica da radiação solar. Os concentradores solares podem ser divididos em três grupos de acordo com a razão de concentração (CR), definida pela razão entre a área total ocupada pelo sistema com concentrador e a área do módulo: concentradores de baixa (LCPV), média (MCPV) e alta concentração (HCPV) (Baig et al., 2012). Os concentradores de baixa concentração são, geralmente, alternativas mais simples e mais baratas sendo possível, em alguns casos, a utilização de células solares tradicionais em seu sistema.

O rendimento de células PV depende fortemente da uniformidade com que a luz incide e com a temperatura do módulo, variáveis que dependem grandemente da posição do sol em relação à terra e à superfície, que varia significativamente tanto ao longo do dia quanto ao longo de um ano. Portanto, no projeto de concentradores solares é importante que seja estudado o comportamento da radiação durante o ano.

O objetivo deste trabalho é avaliar a variação do rendimento de concentradores solares planos de baixa concentração através da variação da geometria do refletor e coletor considerando a influência do aumento da temperatura nas células. São avaliadas superfícies voltadas para o norte (caso localizadas no hemisfério sul) e voltadas para o sul (no caso do hemisfério norte) utilizando refletores superiores ou inferiores.

2. SISTEMAS CONCENTRADORES SOLARES PLANOS

O estudo de artifícios da ótica para aumentar a geração de energia de painéis fotovoltaicos já é realizado há algumas décadas e foram propostos vários modelos para representar o comportamento deste tipo de sistema. Muitos dos estudos iniciais tratam principalmente da descrição do sistema a partir de princípios da ótica considerando somente a parcela direta da radiação solar (Seitel, 1975; Chiam, 1981; Fraidenraich, 1992). Com o avanço da energia solar fotovoltaica muitos dos estudos se voltaram para parâmetros relacionados a este tipo de tecnologia, como o controle da temperatura dos módulos e estudos relacionados ao espectro da luz incidente sobre os painéis. Novas tecnologias de células fotovoltaicas foram desenvolvidas, como as células multi-junção capazes de receber quantidades superiores de energia e com maior eficiência que as células de silício convencionais. No entanto o custo deste tipo de célula é relativamente elevado, sendo aconselhado em aplicações que necessitem de alta geração de energia em um espaço mínimo de área com elevada confiabilidade, podendo trabalhar sob altas temperaturas (Baig, et al., 2012).

Sistemas de baixa concentração solar tem a vantagem de poder utilizar células convencionais e, geralmente, são sistemas mais simples, sem necessidade de um sistema de rastreamento solar, sendo este mais um ponto de redução de custos. O concentrador solar plano consiste no uso de espelhos planos, normalmente entre um e quatro espelhos. A Fig. 1 apresenta um exemplo de sistema concentrador solar plano com um espelho superior.

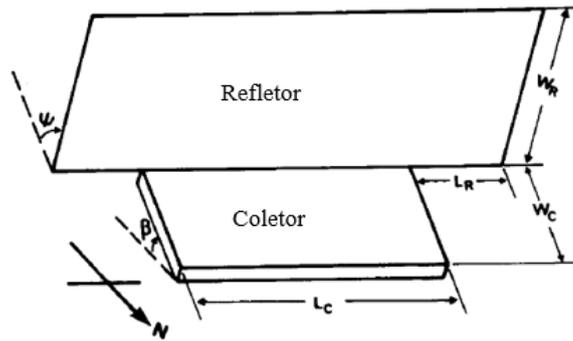


Figura 1 - Sistema concentrador solar plano com um refletor superior (Chiam, 1982).

Ainda que os concentradores planos sejam simples, eles ainda apresentam vários pontos em que se deve ter atenção durante seu projeto, tais como o controle da temperatura, redução das perdas óticas e uniformidade de incidência da radiação. Estes fatores, especialmente a temperatura e a uniformidade da radiação, vem sendo alvo de um grande número de pesquisas com o intuito de otimizar a utilização dos espelhos e do espaço disponível para geração de energia (Solanki, et al., 2008; Maiti, et al., 2012; Kawamura, et al., 2003).

O aumento da temperatura da célula fotovoltaica acarreta em um pequeno aumento da corrente de curto-circuito I_{sc} e causa uma redução considerável da tensão de circuito aberto V_{oc} , o que leva a redução na geração de energia pelo sistema, conforme apresentado na Fig. 2. De acordo com Zahedi (2011) a temperatura de células solares de silício deve ser mantida abaixo de 60°C para evitar a ocorrência de falhas no sistema.

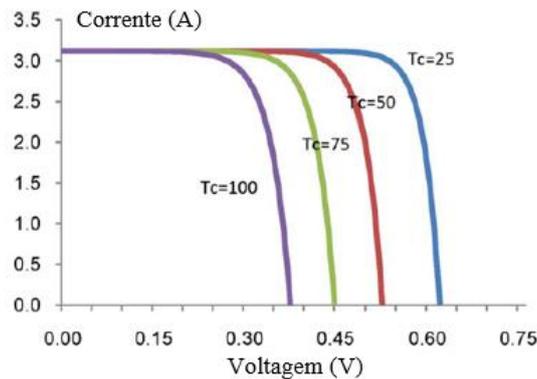


Figura 2 - Redução no rendimento de células fotovoltaicas devido ao aumento da temperatura para radiação fixa de 1.000 W/m^2 (Zahedi, 2011).

Apesar da importância da influência da temperatura no rendimento de módulos PV, ainda não há um consenso em relação à forma de se estimar a produção de energia levando em conta este parâmetro. Skoplaki e Palyvos (2009) citam 24 diferentes equações para cálculo do rendimento dos módulos considerando o efeito da temperatura e apesar da ocorrência de alguns parâmetros em comum, muitas apresentam poucas semelhanças entre si. De acordo com Mattei et al. (2006) um dos modelos mais comuns para cálculo da eficiência η de um módulo, a uma determinada temperatura T_c , é dado pela Eq. (1).

$$\eta = \eta_r(1 - \beta_\eta(T_c - T_r)) + \gamma_\eta \log G \quad (1)$$

em que η_r é a eficiência do módulo a uma temperatura de referência T_r e sob uma radiação de referência G_r , igual a 1.000 W/m^2 . β e γ são os coeficientes de irradiação solar e temperatura, respectivamente, do módulo PV. Um ponto de dificuldade neste cálculo é a obtenção de T_c , já que este parâmetro depende de fatores como temperatura ambiente T_a , radiação solar, velocidade e direção do vento. Um dos modelos mais simples de se calcular a temperatura da célula de forma satisfatória utiliza a temperatura da célula em condições normais de operação T_{NOCT} , chamado de modelo NOCT. Este modelo é apresentado na Eq. (2).

$$T_c = T_a + (T_{NOCT} - T_r) \frac{G}{G_r} \quad (2)$$

3. MODELAGEM

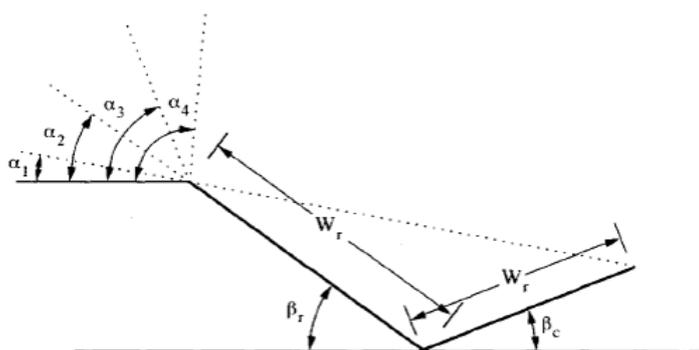
O primeiro passo para a modelagem do problema é estabelecer a relação entre a posição e orientação do coletor em relação ao sol. A obtenção desta geometria para um sistema orientado em direção ao norte (ângulo de azimute da superfície coletora $\gamma_c = 180^\circ$) é relativamente simples e foram utilizadas as correlações apresentadas em Duffie e Beckmann (2006) como uma função da latitude ϕ , dia do ano n e inclinação do coletor β_c . A obtenção dos valores típicos de radiação solar sobre as superfícies do coletor e dos refletores foi feita através da obtenção do ano de projeto segundo metodologia apresentada por Klein (1976), conforme citado por Duffie e Beckmann (2006) com base em valores medidos de radiação solar horizontal para a cidade de Viçosa, MG pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) entre os anos de 2000 e 2012 em conjunto com modelo de radiação difusa proposto por Oliveira et al. (2002) por este ter sido elaborado para cidade da região sudeste brasileira.

O modelo utilizado para a caracterização do sistema concentrador solar foi adaptado dos trabalhos de Bollentin e Wilk (1995) e Perers e Karlsson (1993) para uma localização no hemisfério sul. Foi modelado sistema orientado em direção ao norte, considerando as parcelas direta, difusa e refletida pelo solo na reflexão pelos espelhos e considerando dimensões limitadas para o coletor e refletores. Foram estudados portanto dois tipos de sistema concentrador solar, um com refletor inferior e outro com refletor superior com inclinações β_{r1} e β_{r2} , respectivamente, sendo que β_{r2} considera a inclinação igual a 0° quando a face do refletor está voltada para baixo.

Inicialmente é obtido o ângulo de altitude solar aparente α_{NS} , que é o ângulo obtido ao se projetar o ângulo de altitude solar α_s sobre o plano vertical perpendicular à superfície, calculado pela Eq. (3).

$$\alpha_{NS} = \text{atan} \left(\frac{\tan \alpha_s}{\cos(\gamma_s - \gamma_c)} \right) \quad (3)$$

em que γ_c é o ângulo de azimute solar. Dependendo de α_{NS} a radiação solar direta pode ocorrer uma entre 5 possibilidades. A Fig. 3 ilustra os cinco possíveis casos e os referentes intervalos de valores de α_{NS} para o sistema com refletor inferior.



| | | | |
|---------|--|---------------------------|------------------------|
| Caso 1. | $\alpha_{NS} \leq \alpha_1$ | : $AR_{ns} = 0$ | ; $AR_r = 0$ |
| Caso 2. | $\alpha_1 < \alpha_{NS} \leq \alpha_2$ | : $0 \leq AR_{ns} \leq 1$ | ; $AR_r = 0$ |
| Caso 3. | $\alpha_2 < \alpha_{NS} \leq \alpha_3$ | : $AR_{ns} = 1$ | ; $0 \leq AR_r \leq 1$ |
| Caso 4. | $\alpha_3 < \alpha_{NS} \leq \alpha_4$ | : $AR_{ns} = 1$ | ; $0 \leq AR_r \leq 1$ |
| Caso 5. | $\alpha_4 < \alpha_{NS}$ | : $AR_{ns} = 1$ | ; $AR_r = 0$ |

Figura 3 - Casos básicos de incidência de radiação direta para refletor inferior (Bollentin e Wilk, 2012).

O caso 1 ocorre quando α_{NS} não é grande o suficiente para incidir sobre o coletor, ou seja, o refletor sombreia toda a área do coletor. No caso 2 parte do coletor permanece sombreada pelo refletor mas já há incidência de luz. No caso 3 toda radiação direta refletida incide sobre o coletor e não há sombreado. O caso 4 ocorre quando o ângulo de reflexão é tão alto que parte da radiação refletida passa por cima do coletor até que α_{NS} alcance um ângulo α_4 em que a radiação é refletida paralelamente ao coletor e a partir deste valor tem-se o caso 5, em que os raios são rejeitados pelo espelho. AR_{NS} e AR_r são as frações de região não sombreada e região com incidência de raios refletidos pelo coletor divididos pela área total do coletor, respectivamente. Os ângulos α_1 , α_2 , α_3 e α_4 são obtidos através das Eqs (4) a (7).

$$\alpha_1 = \text{atan} \left(\frac{W_{r1} \text{sen } \beta_{r1} - W_c \text{sen } \beta_c}{W_{r1} \text{cos } \beta_{r1} + W_c \text{cos } \beta_c} \right) \quad (4)$$

$$\alpha_2 = \beta_{r1} \quad (5)$$

$$\alpha_3 = 2\beta_{r1} + \tan^{-1} \left(\frac{\text{sen } \beta_c - W_{r1}/W_c \text{sen } \beta_{r1}}{W_{r1}/W_c \text{cos } \beta_{r1} + \text{cos } \beta_c} \right) \quad (6)$$

$$\alpha_4 = 2\beta_{r1} + \beta_c \quad (7)$$

Onde W_c e W_r são dados na figura 1 e o subscrito 1 refere-se ao refletor inferior. Para refletores superiores os casos são análogos, mas com diferentes intervalos:

$$\alpha_1 = \tan^{-1} \left(\frac{W_c \sin \beta_c + W_{r_2} \sin \beta_{r_2}}{W_c \cos \beta_c - W_{r_2} \cos \beta_{r_2}} \right) \quad (8)$$

$$\alpha_2 = \beta_{r_2} \quad (9)$$

$$\alpha_3 = 2\beta_{r_2} - 180^\circ + \tan^{-1} \left(\frac{W_c \sin \beta_c + W_{r_2} \sin \beta_{r_2}}{W_c \cos \beta_c - W_{r_2} \cos \beta_{r_2}} \right) \quad (10)$$

$$\alpha_4 = 2\beta_{r_2} + \beta_c - 180^\circ \quad (11)$$

$$\text{Caso 1: } \alpha_{NS} \leq \alpha_4 \quad AR_{ns} = 0; AR_{r_2} = 0$$

$$\text{Caso 2: } \alpha_4 < \alpha_{NS} \leq \alpha_3 \quad 0 < AR_{ns} \leq 1; AR_{r_2} = 0$$

$$\text{Caso 3: } \alpha_3 < \alpha_{NS} \leq \alpha_2 \quad AR_{ns} = 1; 0 < AR_{r_2} \leq 1$$

$$\text{Caso 4: } \alpha_2 < \alpha_{NS} \leq \alpha_1 \quad AR_{ns} = 1; 0 < AR_{r_2} \leq 1$$

$$\text{Caso 5: } \alpha_1 < \alpha_{NS} \quad AR_{ns} = 1; AR_{r_2} = 0$$

Para a obtenção das razões AR_r e AR_{ns} foram utilizadas as projeções apresentadas na Fig. 4. Nesta figura s , t , u e v são variáveis auxiliares e X_c é o ponto máximo que a sombra ou reflexão (usa-se as mesmas fórmulas para ambos os casos) do refletor incide sobre o coletor. Os valores de AR_{ns} e AR_r podem ser calculados através das Eqs. (12) a (16).

$$X_c = W_r \frac{\sin(\alpha_{NS} - \beta_r)}{\sin(2\beta_r + \beta_c - \alpha_{NS})} \quad (12)$$

$$v = \tan(180^\circ - |\gamma_s|) (W_r \cos \beta + X_c \cos \beta_c) - L_r \quad (13)$$

$$u = \frac{\{X_c \cos \beta_c (W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c - L_r / \tan(180^\circ - |\gamma_s|))\}}{\{W_r \cos \beta_r + X_c \cos \beta_c\}} \quad (14)$$

$$AR_{ns} = 1 - \frac{X_c}{W_c} + \frac{u v}{2W_c \cos \beta_c L_c} \quad (15)$$

$$AR_{r_1} = \frac{X_c}{W_c} - \frac{u v}{2W_c \cos \beta_c L_c} \quad (16)$$

A radiação difusa foi considerada como isotrópica para os fins da reflexão para simplificar a modelagem. As equações para os fatores de forma a serem utilizados são apresentadas por Bollenin e Wilk (1995) e por Perers e Karlsson (1993). Com base nos fatores de forma é possível calcular o incremento de radiação devido à reflexão pelo refletor das parcelas difusa $I_{T,rd}$ e refletida pelo solo $I_{T,rg}$ utilizando as Eqs. (17) e (18).

$$I_{T,rd} = I_d F_{r-s} \rho_r F_{c-r} \quad (17)$$

$$I_{T,rg} = I \rho_g F_{r-g} \rho_r F_{c-r} \quad (18)$$

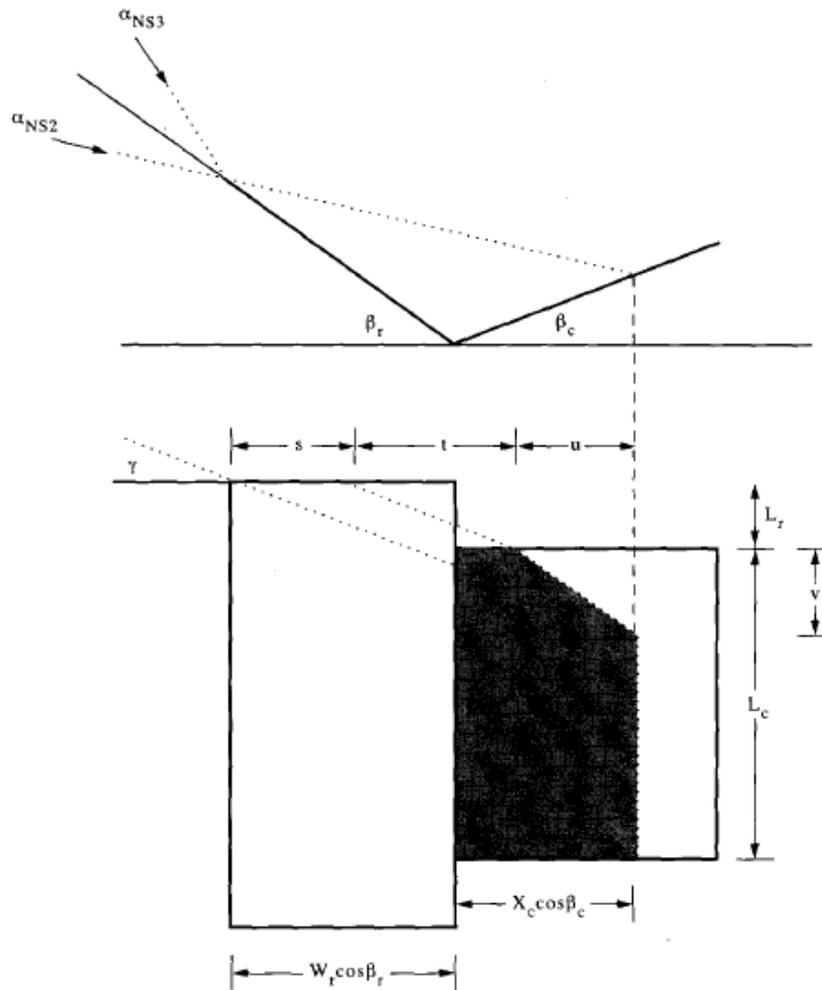


Figura 4 - Projeções do sistema para determinação das razões de área AR (Bollentin e Wilk, 1995).

Os subscritos g e s se referem ao solo e ao céu, respectivamente. I é a radiação solar horária, I_d é a parcela difusa da radiação solar horária e F são os fatores de forma. Finalmente a radiação solar total incidente I_T pode ser calculada pela Eq. (19).

$$I_T = I_b R_b A R_{ns} + I_b R_{br} A R_r \rho_r + I_d F_{c-s} + I_d F_{r-s} \rho_r F_{c-r} + I \rho_g F_{c-g} + I \rho_g F_{r-g} \rho_r F_{c-r} \quad (19)$$

Onde os termos R_b e R_{br} são a razão entre a radiação direta incidente em uma superfície com a inclinação do coletor e do refletor, respectivamente, dividido pela radiação direta em uma superfície horizontal.

4. METODOLOGIA

A primeira parte deste estudo consistiu na análise das dimensões dos refletores para variados valores de inclinação do coletor β_c e inclinação dos refletores inferior β_{r1} e superior β_{r2} . Então, de posse de um dos conjuntos de valores de inclinação foram variadas as dimensões dos refletores de forma a se obter a variação da radiação incidente sobre o coletor a medida que se variaram estes parâmetros.

Foram realizadas estimativas da produção de energia com base em dados de módulos comerciais de silício policristalino Si-pc para diferentes inclinações de coletor e para cada uma destas inclinações foram obtidas as inclinações e dimensões dos refletores que resultavam em maior geração de energia para uso de refletor inferior ou de refletor superior sem considerar os efeitos da temperatura. Então repetiu-se o processo de escolha das melhores inclinações de coletor considerando a temperatura. As alterações nos valores de energia gerada considerando as variações de temperatura foram realizadas através dos modelos de NOCT, para estimativa de T_c , e o modelo sugerido por Mattei et al. (2006) para cálculo da eficiência da célula sob os respectivos valores de temperatura e radiação. Foram utilizados os valores de $\beta_\eta = 0.0048 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e $\gamma_\eta = 0$, conforme sugerido por Mattei et al. (2006) para células de silício. As dimensões do sistema foram feitas de forma que todos os parâmetros estivessem em função da largura do coletor $W_c = 1$. Foi considerado que o comprimento do coletor fosse $L_c = 2,5 W_c$, o comprimento das abas dos refletores $L_r = 2,0 W_c$, e a largura dos refletores $W_r = 2,0 W_c$.

Um outro ponto a ser investigado se refere à diferença de radiação disponível em diferentes regiões do mundo. Foram usados dados de radiação e temperatura fornecidos pelo software Meteonorm para cinco cidades em diferentes latitudes, conforme apresentado na Tab. 1. As cidades foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de dados e sua localização geográfica. Foram calculados os valores máximos de radiação incidente G_{max} que fazem com que a temperatura da célula atinja um valor limite $T_{lim} = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este valor foi escolhido pois os cálculos foram feitos sobre valores médios mensais e os valores de radiação obtidos seriam os médios e não máximos para o período e Zahedi (2011) sugere que a temperatura dos módulos não exceda 60°C para evitar danos às células.

Tabela 1 - Locais selecionados para estudo do potencial para concentradores solares.

| Cidade | Localização |
|-------------------------|---------------|
| Ushuaia (Argentina) | 54,8°S 68,3°O |
| Belo Horizonte (Brasil) | 19,9°S 43,9°O |
| Fortaleza (Brasil) | 3,8°S 38,6°O |
| Havana (Cuba) | 23,2°N 82,4°O |
| Mannheim (Alemanha) | 49,5°N 8,6°L |

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao se variar os ângulos de inclinação dos refletores e coletor obteve-se que um dos conjuntos que resultou em maior aumento da radiação incidente por parte dos refletores ocorreu quando $\beta_c = 0^{\circ}$, $\beta_{r_1} = 33^{\circ}$ e $\beta_{r_2} = 106^{\circ}$ e $W_c = 1$. Então foram variadas as dimensões dos refletores e obtiveram-se os resultados da razão entre energia gerada com espelho dividida pela sem espelho, apresentados nas Tabs. 2 e 3.

Tabela 2 - Variação do ganho com a variação do comprimento da aba, $W_r = W_c$.

| Aba | $\beta_{r_1} = 33^{\circ}$ | $\beta_{r_2} = 106^{\circ}$ |
|-----------------|----------------------------|-----------------------------|
| $L_r/W_c = 0,0$ | 1,1045 | 1,1729 |
| $L_r/W_c = 0,5$ | 1,1060 | 1,1716 |
| $L_r/W_c = 1,0$ | 1,1021 | 1,1596 |
| $L_r/W_c = 1,5$ | 1,0922 | 1,1376 |
| $L_r/W_c = 2,0$ | 1,0860 | 1,1041 |
| $L_r/W_c = 3,0$ | 1,0541 | 1,0033 |
| $L_r/W_c = 4,0$ | 1,0253 | 0,9297 |

Tabela 3 - Variação do ganho com a variação da largura do refletor, $L_r = W_c$.

| Largura do refletor | $\beta_{r_1} = 33^{\circ}$ | $\beta_{r_2} = 106^{\circ}$ |
|---------------------|----------------------------|-----------------------------|
| $W_r/W_c = 0.5$ | 1,0737 | 1,0988 |
| $W_r/W_c = 1.0$ | 1,0860 | 1,1041 |
| $W_r/W_c = 2.0$ | 1,0794 | 1,1207 |
| $W_r/W_c = 3.0$ | 1,0639 | 1,1562 |
| $W_r/W_c = 3.5$ | 1,0594 | 1,1825 |
| $W_r/W_c = 4.0$ | 1,0549 | 1,1661 |
| $W_r/W_c = 6.0$ | 1,0354 | 1,0767 |

A Tab. 4 mostra os resultados de energia total gerada estimada sem considerar os efeitos da temperatura sobre o rendimento para diferentes inclinações do coletor e os respectivos ângulos de refletores que apresentaram melhores resultados de radiação total.

Tabela 4 - Valores de energia anual gerada sem considerar a temperatura para os casos sem refletor (C), com refletor inferior (C+R1) e com superior (C+R2).

| β_c | β_{r_1} | β_{r_2} | C (kWh) | C+R1 (kWh) | C+R2 (kWh) |
|-----------|---------------|---------------|---------|------------|------------|
| 0° | 36° | 106° | 223,5 | 240,0 | 262,9 |
| 5° | 37° | 107° | 227,6 | 245,7 | 236,1 |
| 10° | 36° | 106° | 230,5 | 251,5 | 233,1 |
| 15° | 34° | 103° | 232,2 | 256,5 | 228,8 |
| 20° | 33° | 100° | 232,9 | 259,0 | 223,9 |
| 25° | 33° | 98° | 232,4 | 259,4 | 217,5 |
| 30° | 33° | 97° | 230,7 | 258,7 | 209,4 |

Pode-se observar que o uso de refletor inferior apresentou melhores resultados do que o uso do refletor superior para grande parte dos casos, sendo pior somente no caso de coletor horizontal. Percebe-se também que os ângulos dos refletores sofrem pouca variação à medida em que o ângulo do coletor varia, sendo que o ângulo do refletor superior apresentou maior sensibilidade às variações. A Tab. 5 apresenta os resultados para os cálculos considerando as variações do rendimento considerando a temperatura.

Tabela 5 - Valores de energia anual gerada sem considerar a temperatura para os casos sem refletor (C), com refletor inferior (C+R1) e com superior (C+R2).

| β_c | β_{r_1} | β_{r_2} | C (kWh) | C+R1 (kWh) | C+R2 (kWh) |
|-----------|---------------|---------------|------------|---------------|---------------|
| 0° | 36° | 106° | 207,7 | 222,1 | 239,2 |
| 5° | 37° | 107° | 211,2 | 226,0 | 216,8 |
| 10° | 36° | 105° | 213,7 | 230,9 | 214,8 |
| 15° | 34° | 103° | 215,3 | 235,1 | 210,1 |
| 20° | 33° | 100° | 215,8 | 237,3 | 205,6 |
| 25° | 33° | 98° | 215,3 | 237,7 | 200,1 |
| 30° | 33° | 97° | 213,9 | 237,1 | 193,1 |

Ainda pode-se observar que a relação entre os três casos não sofreu grandes mudanças, somente o coletor gera menos energia que o coletor com o refletor inferior e, a partir de um ângulo de coletor maior que 15° o coletor gera mais energia sozinho que com a instalação do refletor superior, devido ao sombreamento. Além disso é possível observar que a maioria dos ângulos dos refletores não sofreu alterações em relação ao dimensionamento sem considerar a temperatura. É possível observar também que, para os casos analisados, o valor da energia gerada considerando temperatura são cerca de 7,8% menores que os valores originais (7,3%, 8,8% e 8,8%, respectivamente), sendo que, como esperado, os casos com maior incidência de radiação sobre o módulo apresentaram maior redução na energia gerada. Foram estimadas temperaturas máximas de módulos de 48,8°C, 67,9°C e 62,0 °C para os casos C, C+R1 e C+R2, respectivamente, o que mostra que, apesar do uso de refletor inferior apresentar maior geração de energia, ele também apresenta maior probabilidade de ocorrência de danos permanentes à célula PV.

Então foram calculados os valores de radiação máxima média mensal $\overline{G_{max}}$, os valores limites para a radiação G_{lim} dos respectivos meses para evitar danos às células PV e a energia anual gerada E_{anual} . A Tab. 6 apresenta estes valores para os meses em que ocorre maior radiação máxima média para cada local estudado considerando a inclinação do coletor que fornecia a maior quantidade de energia. Estes cálculos foram realizados considerando coletores sem espelhos.

Tabela 6 - Parâmetros dos meses com ocorrência dos maiores valores de radiação máxima média.

| Cidade | $\overline{G_{max}}$ (W/m ²) | G_{lim} (W/m ²) | T (°C) | E_{anual} (kWh) |
|-------------------------|---|----------------------------------|-----------|----------------------|
| Ushuaia (Argentina) | 621,3 | 2047,6 | 7,0 | 162,6 |
| Belo Horizonte (Brasil) | 732,5 | 1290,5 | 22,9 | 241,9 |
| Fortaleza (Brasil) | 897,0 | 1076,2 | 27,4 | 297,3 |
| Havana (Cuba) | 860,3 | 1233,3 | 24,1 | 274,8 |
| Mannheim (Alemanha) | 629,4 | 1657,1 | 15,2 | 160,8 |

Observa-se que para os locais mais afastados do equador e menores temperaturas é possível a utilização de concentradores solares de maior razão de concentração sem que haja danos devido à temperatura do módulo. No caso de Ushuaia, por exemplo, é possível que o módulo receba mais de três vezes o valor da radiação incidente sobre a superfície inclinada. Esta maior razão de concentração permite que em regiões em que a média de radiação é baixa seja produzida uma maior quantidade de energia total anual do que em regiões mais tropicais devido à menor temperatura do ambiente.

6. CONCLUSÕES

O uso de concentradores solares é bastante útil por aumentar a quantidade de radiação incidente sobre as células PV. A análise da variação dos parâmetros do sistema ao se variar as dimensões dos refletores permitiu observar que mudanças no valor da inclinação do coletor requerem uma pequena correção nos valores de inclinação dos espelhos. Além disso os casos observados mostraram um melhor desempenho dos refletores inferiores em relação aos superiores. A variação das dimensões dos refletores mostrou que ao se aumentar a largura dos refletores há uma redução na radiação recebida por coletores com espelhos na parte inferior enquanto há um aumento no caso de uso de espelhos superiores. Já no caso de aumento no comprimento das abas há um pequeno aumento no caso do coletor inferior até que $L_r = W_c$, a partir deste ponto há redução da radiação incidente em ambos os casos estudados.

O aumento da radiação, aumenta a quantidade de energia que precisa ser dissipada para que não haja aquecimento e consequente redução na eficiência da célula. Foi verificado que a consideração da temperatura para avaliação do desempenho de sistemas PV apresenta um valor cerca de 8,2 % menor que os valores calculados através das equações comumente usadas para estimativa da produção de energia. Foi observado que, apesar da pequena razão de concentração, houve maior queda no rendimento das células à medida que a radiação recebida era aumentada. Acredita-se que esta diferença se torne mais significativa para sistemas com maior razão de concentração (CR). Ao se calcular as temperaturas da célula ao longo do ano observou-se que para ambas as configurações de concentradores ocorreram temperaturas acima da temperatura de segurança de 60°C, que estabelece o ponto em que há maior risco de ocorrência de dano ao sistema. Ao se considerar a temperatura como fator limitante da radiação incidente sobre o coletor observou-se que para regiões de baixa temperatura ambiente, normalmente acompanhados de menor radiação, é possível a instalação de concentradores solares com CR razoavelmente maior que para as regiões tropicais mantendo-se a mesma tecnologia de célula solar e sendo possível gerar mais energia do que em regiões tropicais.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à Universidade Federal de Viçosa, CEMIG, INMET, CAPES, CNPq e à FAPEMIG por todo o suporte financeiro, técnico e científico durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Baig, H., Heasman, K. C. & Mallick, T. K., 2012. Non-uniform illumination in concentrating solar cells. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 5890-5909.
- Bollentin, J. & Wilk, R. D., 1995. Modeling the solar irradiation on flat plate collectors augmented with planar reflectors. *Solar Energy*, pp. 343-354.
- Chiam, H., 1981. Planar concentrators fro flat-plate solar collectors. *Solar Energy*, pp. 503-509.
- Chiam, H. F., 1982. Stationary reflector-augmented flat-plate collectors. *Solar Energy*, Volume 29, pp. 65-69.
- Duffie, J. & Beckmann, 2006. *Solar Engineering of Thermal Processes*. s.l.:John Wiley & Sons.
- Fraidenraich, N., 1992. Analytic solutions for the optical properties of V-through concentrators. *Applied optics*.
- Kawamura, H. et al., 2003. Simulation of I-V characteristics of a PV module with shaded PV cells. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 613-621.
- Maiti, S., Sarmah, N., Bapat, P. & Mallick, T. K., 2012. Optical analysis of a photovoltaic V-trough system installed in western India. *Applied optics*.
- Mattei, M. et al., 2006. Calculation of the polycrystalline PV module temperature using a simple method of energy balance. *Renewable energy*, pp. 553-567.
- Oliveira, A., Escobedo, J., Machado, A. & Soares, J., 2002. Correlation models of diffuse solar radiation applied to the city of Sao Paulo, Brazil. *Applied Energy*.
- Perers, B. & Karlsson, B., 1993. External reflectors for large solar collector arrays, simulation model and experimental results. *Solar Energy*, pp. 327-337.
- Seitel, S. C., 1975. Collector performance enhancement with flat reflectors. *Solar Energy*, pp. 291-295.
- Skoplaki, E. & Palyvos, J., 2009. On the Temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, pp. 614-624.
- Solanki, C. S., Sangani, C. S., Gunashekar, D. & Antony, G., 2008. Enhanced heat dissipation of V-trough PV modules for better performance. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 1634-1638.
- Zahedi, A., 2011. Review of modelling details in relation to low-concentration solar concentrating photovoltaic. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp. 1609-1614.

MODELLING AND SIMULATION OF FLAT SOLAR CONCENTRATORS

Abstract. *The use of solar energy for the generation of electric energy with photovoltaic modules is increasing rapidly for some years but, despite this growth, initial investment is still high. One of the solutions to reduce system cost is through the incorporation of solar concentrators, which reduce the required area of photovoltaic modules for the generation of the same amount of energy. However, as the total incident radiation increases, module temperature increases reducing module efficiency. This work evaluates the energy generated by photovoltaic modules for different geometries of flat solar concentrators with a single-mirror thorough simulation. This study also evaluates the difference in generated energy if temperature effects are considered in system modelling. Simulations were evaluated for the city of Viçosa, MG (20° S). The system model which considered temperature effects resulted in energy generation about 8.2 % smaller. The potential use of concentrating solar systems in different locations was evaluated using data from five cities with different latitudes and in both hemispheres and it was found that regions with lower values of temperature showed higher potential for installation of higher concentration ratios solar systems.*

Keywords: *Solar Energy, solar concentration*