

# DIMENSIONAMENTO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA FOTOVOLTAICO UTILIZANDO CONCENTRADOR SOLAR DO TIPO “V”

Samantha Teixeira Marques – samanthaetrica@hotmail.com

José Henrique Martins Neto – henrique@des.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Campus II

Mestrado em Engenharia de Energia - Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** Este trabalho apresenta primeiramente uma metodologia simplificada que foi utilizada para dimensionamento de um coletor concentrador do tipo “V” visando concentrar radiação solar sobre um painel fotovoltaico comercial de 135 W de potência elétrica nominal. O coletor concentrador foi constituído por dois espelhos planos do tipo cristal prata de 6mm de espessura, com refletividade média igual a 0,85, e ângulo de vértice igual a 30°. Uma plataforma de teste foi construída possuindo flexibilidade para testar coletores de diferentes dimensões e ângulos de vértice. Dois testes experimentais foram realizados, sendo o primeiro para um sistema “sem” concentração e o segundo para um sistema “com” concentração. Os testes foram realizados na cidade de Belo Horizonte, (latitude igual a -20°), nos dias 17 e 31 de Julho, estando o céu claro e sem nebulosidade. Para ambos os testes o ângulo de inclinação dos sistemas foi mantido igual a 20° e o azimute igual a 180° em relação ao sul. O sistema “sem” concentração apresentou uniformidade da radiação solar incidente na superfície absorvedora e também das temperaturas medidas em diferentes pontos representativos dessa superfície. Por outro lado, o sistema “com” concentração apresentou não uniformidade da radiação solar incidente na superfície absorvedora e das temperaturas medidas na mesma. Os efeitos de extremidade foram responsáveis pela não uniformidade causando redução da radiação incidente nas regiões laterais do painel na parte da manhã e da tarde. O sistema “com” concentração solar gerou no horário de pico 55% mais energia elétrica do que o sistema “sem” concentração, entretanto, a sua eficiência elétrica média diária foi 2% maior (i.e., aumentou de 3,6% para 5,6%).

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Concentrador Tipo “V”, CPV

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho tem como objetivo principal verificar as possibilidades de aumento da potencia elétrica gerada pelos painéis solares fotovoltaicos através da utilização de concentração da radiação solar incidente no painel. A utilização de coletores concentradores poderá contribuir para a redução da área dos painéis solares possibilitando desta forma redução do custo dos painéis.

Diferentes tipos de coletores concentradores solares são mencionados na literatura (Duffie e Beckman, 2006) podendo se mencionar dentre eles os concentradores lineares do tipo cilindro parabólicos, os coletores compostos parabólicos e os coletores do tipo “V”. Os coletores cilindro parabólicos e parabólicos compostos apresentam desvantagens em relação aos coletores tipo “V”, pois concentram radiação em pequenas regiões lineares o que requer uso de células fotovoltaicas de pequenas dimensões e resistentes a altas temperaturas. Os coletores do tipo “V”, de baixa concentração, podem ser mais indicados para uso com painéis fotovoltaicos devido a sua concentração não ser pontual, além de apresentar custo inferior ao dos demais coletores e sistemas de seguimento do sol mais simplificados.

## 2. REVISÃO LITERÁRIA

Neste capítulo são apresentados alguns conceitos fundamentais necessários para dimensionamento do coletor concentrador tipo “V” e realização dos testes experimentais.

### 2.1 Concentrador solar do tipo “V”

O método de imagens apresentado por Hollands (1971) é considerado um método simples de análise da reflexão dos raios solares possibilitando determinar a concentração solar em função do ângulo de incidência, da refletividade da superfície refletora e do ângulo de abertura da cavidade “V”. O esquema de incidência dos raios solares é apresentado na Fig. 1 onde se pode verificar a reflexão de três tipos de raios incidentes na superfície refletora.

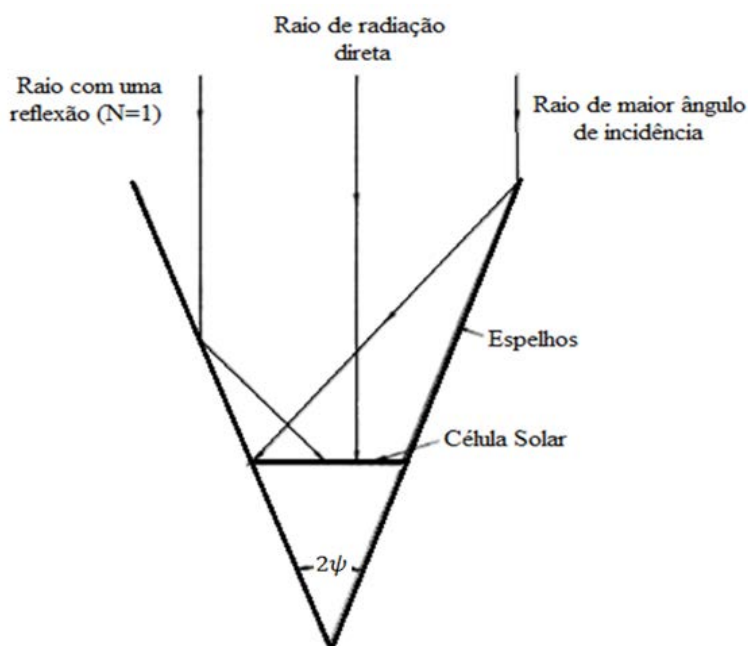


Figura 1 - Concentrador do tipo "V" (HOLLANDS, 1971).

Três raios normais ao plano de abertura do coletor, ou seja, raios com ângulos de incidência iguais a zero são mostrados na Fig. 1, sendo que da direita para a esquerda se observa: (i) raio incidente na extremidade da superfície refletora que atinge a célula solar (i.e., superfície absorvedora) com apenas uma reflexão; (ii) raio direto, ou seja, raio que atinge o absorvedor sem sofrer nenhuma reflexão; (iii) raio incidente em qualquer ponto da superfície refletora que atinge o absorvedor após sofrer uma reflexão ( $N = 1$ ). Observa-se que, na Fig. 1 todos os três raios têm ângulo de incidência máximo igual a zero, entretanto, para outras geometrias esses raios incidentes podem ter ângulo máximo maior que zero e atingir o absorvedor com uma reflexão, de forma similar ao raio do lado direito apresentado na Fig.1. A técnica de imagem, da reflexão dos raios solares incidentes em superfícies refletivas com duas reflexões ( $N = 2$ ) é apresentada na Fig. 2. O raio que chega na imagem da base pode ser considerado ter chegado na sua própria base, entretanto, a reflexão tem que ser diminuída pelo fator  $\rho^n$ , onde "n" é o número de reflexões e "ρ" é a refletividade da superfície refletora (Hollands, 1971).

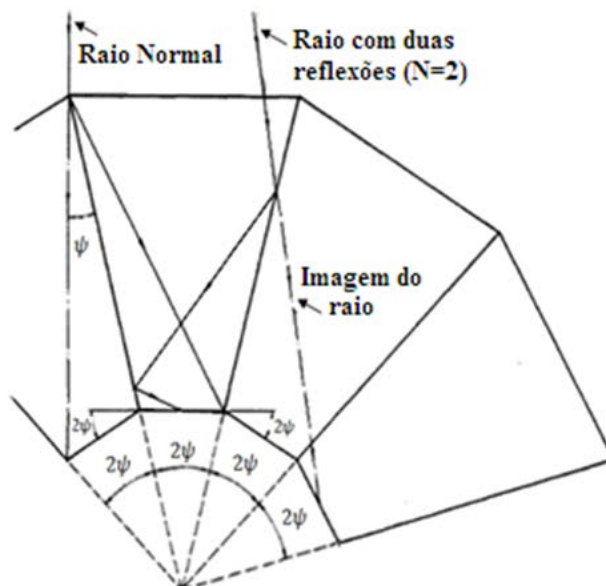


Figura 2 - Método de Imagem aplicado à cavidade "V". (Hollands, 1971).

Verifica-se na Fig. 2 os seguintes dois tipos de raios luminosos: (i) raios aceitos diretamente ( $N = 0$ ); (ii) raios aceitos indiretamente com uma ou duas reflexões ( $N \geq 1$ ). Onde "N" indica o numero de reflexões dos raios antes destes atingirem a superfície absorvedora.

Uma outra situação, característica deste tipo de concentrador, é quanto à possibilidade de haver rejeição de raios solares conforme o ângulo de incidência dos mesmos, ilustrado na Fig. 3.

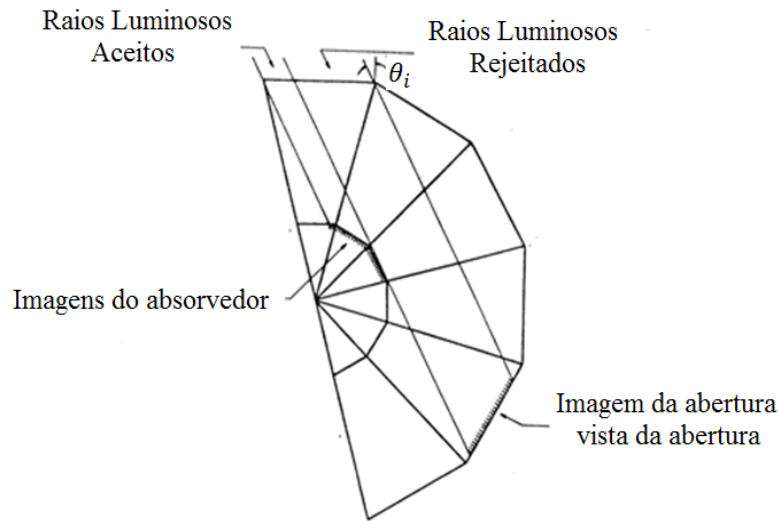


Figura 3 - Método de Reflexão por Imagem (Fraidenraich, 1994).

Verifica-se na Fig. 3 que existem raios luminosos que atingem a superfície absorvedora e outros que são rejeitados retornando pela área de abertura.

A geometria das cavidades do tipo “V” é apresentada na Fig. 4, é composta por dois espelhos laterais e um receptor, no caso, o painel fotovoltaico que funciona como absorvedor da radiação solar.

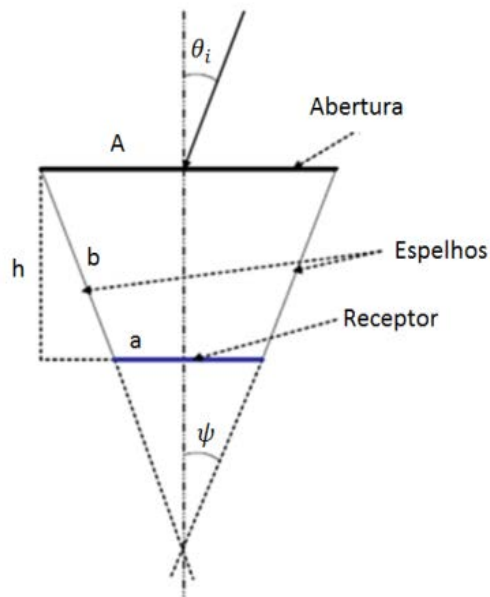


Figura 4 - Grandezas principais da cavidade do tipo “V” (Alonso e Valera, 2003).

A geometria da cavidade “V” é definida pelo ângulo de incidência “ $\theta_i$ ” e pelos seguintes parâmetros: (i) largura da abertura “A”; (ii) largura do absorvedor “a”; (iii) semi-ângulo de vértice “ $\psi$ ”; (iv) comprimento do espelho “b”. A relação de concentração geométrica “C” é definida pela Eq. (3).

$$C = \frac{A}{a} \quad (3)$$

## 2.2 Concentração dos raios e modos de reflexão

Fraidenraich (1994) realizou um estudo detalhado sobre a reflexão ótica em cavidades do tipo “V”, e apresentou soluções analíticas para os modos de reflexão referentes ao número de reflexões. Para satisfazer a condição de iluminação uniforme, ou seja, a condição em que toda a superfície absorvedora esteja iluminada a Eq. (4) tem que ser obedecida.

$$C \geq 1 + \frac{2\text{sen}(N\psi) \cdot \cos[(N + 1)\psi]}{\text{sen}\psi} \quad (4)$$

Para a condição da existência de apenas uma reflexão para todos os raios incidentes “ $N = 1$ ” antes que estes atinjam o absorvedor a Eq. (4) reduz à Eq. (5). Essa é uma condição interessante para sistemas formados por painéis fotovoltaicos e concentradores do tipo “V” como de forma a se evitar erros de não uniformidade e perda de eficiência elétrica dos painéis.

$$C \geq 1 + 2\cos 2\psi \quad (5)$$

O ângulo “ $\mu$ ” é definido como a faixa de desvio do ângulo de incidência, em relação à normal da área de abertura do coletor, estando essa normal apontada para o sol, para que ocorra a situação de iluminação uniforme com apenas uma reflexão dos raios. O ângulo “ $\mu$ ” pode ser calculado conforme apresentado na Eq. (6).

$$\tan(\mu) = \frac{\frac{2}{C-1} \sin(\psi) \cdot \cos(2 \cdot \psi) - \sin(\psi)}{\frac{2}{C-1} \sin(\psi) \cdot \sin(2 \cdot \psi) + \cos(\psi)} \quad (6)$$

A função de aceitação angular “ $F(\theta_i)$ ” representa a fração dos raios de luz que incidem na área de abertura do coletor com ângulo de incidência “ $\theta_i$ ” capazes de atingir a superfície absorvedora. Para a condição de iluminação uniforme do absorvedor  $|\theta_i| \leq \mu$  a função  $F(\theta_i)$  é calculada conforme a Eq. (7).

$$F(\theta_i) = \frac{(1 + 2\cos 2\psi)}{C} \quad (7)$$

### 3. SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO COM CONCENTRAÇÃO

Esta seção apresenta o modelo simplificado utilizado para dimensionamento de um protótipo de coletor solar concentrador do tipo “V” para utilização com um painel fotovoltaico comercial de potência máxima igual a 135 W, com dimensões iguais a 0,668m de largura e 1,5 de comprimento. Também é apresentada a bancada de testes, os testes experimentais realizados no sistema.

#### 3.1 Dimensionamento das superfícies refletoras

Os parâmetros de entrada foram o semi-ângulo de vértice “ $\psi$ ” igual a 30° e a largura do absorvedor “a” igual à largura do painel fotovoltaico utilizado, ou seja, 0,668 m. Ressalta-se que a distância entre os dois espelhos refletoras na sua base, ou seja, no local onde se encontrava o painel fotovoltaico, foi levemente superior à largura do painel fotovoltaico. Desta forma, existiu um pequeno espaço que permitiu a entrada de ar e, provavelmente, isso pode ter contribuído para resfriamento do painel fotovoltaico, embora durante os testes o ar esteve praticamente estagnado. O método de dimensionamento compreendeu os oito passos apresentados a seguir.

**1° passo:** Determinação da concentração mínima para que a condição de iluminação uniforme seja atendida, conforme a Eq. (8).

$$C \geq 1 + 2 \cos(2 \times 30^\circ) \quad \therefore \quad C \geq 2 \quad (8)$$

A concentração geométrica selecionada foi igual a 2,75 (valor maior que 2), estando este valor dentro da faixa utilizável para este tipo de coletor (Fraidenraich, 1998).

**2° passo:** Cálculo da largura de abertura do coletor “A”, conforme da Eq. (9).

$$C = \frac{A}{a} \quad \therefore \quad A = C \cdot a \quad \therefore \quad A = 2,75 \cdot 0,668 \text{ m} \quad \therefore \quad A = 1,837 \text{ m} \quad (9)$$

**3° passo:** Cálculo do comprimento da superfície refletora.

O comprimento da superfície refletora “b” é um fator importante a se considerar no projeto, pois está relacionado diretamente ao peso dos espelhos. Desta forma grandes valores do comprimento dos espelhos acarreta em aumento da estrutura necessária para a sustentação dos mesmos. O valor de “b” pode ser calculado conforme a Eq. (10), através de uma relação trigonométrica simples, considerando o triângulo retângulo formado na Fig. (4).

$$\sin \psi = \frac{(A - a)/2}{b} \quad \therefore \quad b = \frac{(A - a)/2}{\sin \psi} \quad \therefore \quad b = \frac{(1,837 - 0,668)/2}{\sin 30^\circ} \quad \therefore \quad b = 1,169 \text{ m} \quad (10)$$

**4º passo:** Cálculo da altura da superfície refletora.

A altura da superfície refletora (i.e., espelhos), também pode ser calculada conforme a Eq. (11), através da uma relação trigonométrica simples, considerando o triângulo retângulo formado na Fig. (3).

$$\cos\psi = \frac{h}{b} \quad \therefore \quad h = b \cdot \cos\psi \quad \therefore \quad h = 1,169 \cdot \cos 30^\circ \quad \therefore \quad h = 1,012 \text{ m} \quad (11)$$

**5º passo:** Cálculo da faixa de desvio do angulo de incidência angular.

A faixa de desvio do angulo de incidência “ $\mu$ ”, é calculada pela Eq. (6)

$$\tan(\mu) = \frac{\frac{2}{2,75-1} \sin(30^\circ) \cdot \cos(2 \cdot 30^\circ) - \sin(30^\circ)}{\frac{2}{2,75-1} \sin(30^\circ) \cdot \sin(2 \cdot 30^\circ) + \cos(30^\circ)} \quad \therefore \quad \tan(\mu) = -0,1575 \quad \therefore \quad \mu = -8,95^\circ \quad (12)$$

Portanto, ângulos de incidência variando  $-8,95^\circ$  a  $8,95^\circ$  atingiram a superfície absorvedora com apenas uma reflexão ou diretamente (i.e., sem reflexões), promovendo também iluminação uniforme da superfície. Esta grandeza é importante para sistemas que utilizam sistema de seguimento do sol diário, no qual o ângulo de incidência deve estar sempre dentro da faixa de aceitação angular, “ $\mu$ ”. Em sistemas fixos, sem seguimento diário do sol, o angulo de incidência pode apresentar valores fora da faixa angular “ $\mu$ ”, acarretando não uniformidade da iluminação da superfície.

**6º passo:** Cálculo da função de aceitação angular

O calculo da função de aceitação angular “ $F(\theta_i)$ ” (i.e., fração da radiação direta incidente na área de abertura que atinge a superfície absorvedora, na condição de iluminação uniforme desta) é realizado pela Eq. (13).

$$F(\theta_i) = \frac{(1 + 2 \cdot \cos 2 \cdot 30^\circ)}{2,75} \quad \therefore \quad F(\theta_i) = 0,727 \quad (13)$$

O valor calculado indica que 27,0% da radiação direta incidente na abertura do coletor será rejeitada, para ângulos de incidência variando de  $-8,95^\circ$  a  $8,95^\circ$ . Este parâmetro é importante para dimensionamento do sistema e também é um fator de restrição para o sistema, pois valores baixos de  $F(\theta_i)$  significam que sistema tornará inviável por rejeitar grande parte da radiação direta incidente.

**7º passo:** Cálculo do ângulo limite de aceitação de radiação.

O ângulo limite de aceitação “ $\omega$ ”, é definido por Fraidenraich (1994) como sendo o maior ângulo de incidência para que haja aceitação de iluminação, sendo calculado pela Eq. (14).

$$\tan(\omega) = \frac{C + 1}{C - 1} \cdot \tan\psi \quad \therefore \quad \tan(\omega) = \frac{2,75 + 1}{2,75 - 1} \cdot \tan 30^\circ \quad \therefore \quad \tan(\omega) = 1,23718 \quad \therefore \quad \omega = 51^\circ \quad (14)$$

**8º passo:** Cálculo da concentração efetiva.

A concentração efetiva é definida como a razão entre a energia solar incidente no plano de abertura do coletor e a energia solar incidente na superfície absorvedora, ou seja, essa concentração representa efetivamente a radiação que chega no receptor, sendo dada pela Eq. (15).

$$C_{ef} = F(\theta_i) \cdot C \quad \therefore \quad C_{ef} = (0,727) \cdot (2,75) \quad \therefore \quad C_{ef} = 2 \quad (15)$$

Observa-se, portanto, uma redução de 27% da concentração real quando comparada a concentração geométrica, pois este valor corresponde exatamente a fração da radiação incidente que é rejeitada.

O gráfico apresentado na Fig. 5 mostra as seguintes informações óticas geradas no processo de dimensionamento do concentrador solar tipo “V”: (i) regiões de iluminação uniforme e não uniforme; (ii) variação da função de aceitação angular e da concentração efetiva em função do ângulo de incidência; (iii) ângulos de incidência máximo para que haja iluminação uniforme; angulo de incidência máximo para haver concentração efetiva.

A dependência da concentração efetiva em função do angulo de incidência, mostrado na Fig. 5, é tratada como sendo uma linha reta, conforme resultados gráficos do modelo apresentados por Hollands (1971) e resultados do modelo reportado por Fraidenraich (1998). Observando a Fig. 5 se confirma que nem toda a radiação refletida atinge a superfície absorvedora, ou seja, 27% dessa radiação é rejeitada, restando 73% que ilumina uniformemente a mesma.

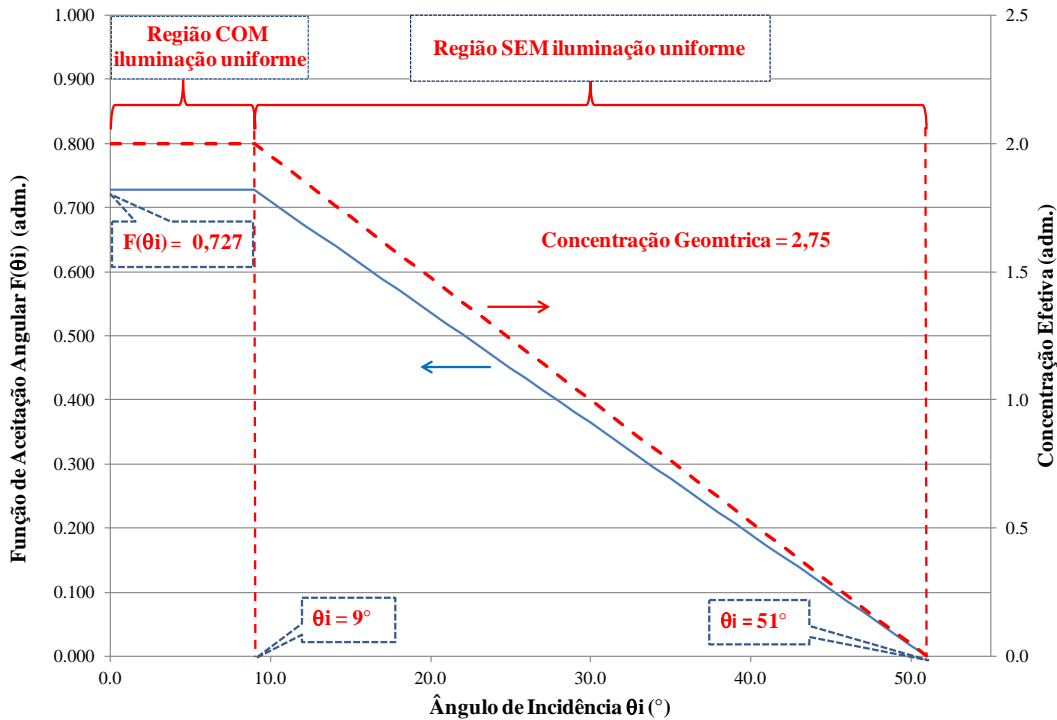


Figura 5 - Resultados óticos do dimensionamento do coletor concentrador tipo “V”.

### 3.2 Testes experimentais

Uma plataforma de testes mostrada na Fig. 6 foi construída com dois graus de liberdade de forma a permitir a realização de testes de diferentes sistemas “coletor tipo “V” - painel fotovoltaico”, com diferentes ângulos de inclinação e ângulos azimute do objeto. Dessa forma é possível realizar testes tanto em sistemas fixos como em sistemas que seguem o movimento aparente do sol (i.e., diurno ou sazonal). A plataforma também possui flexibilidade para testar sistemas com diferentes larguras da área de abertura, comprimentos da superfície refletora e largura da superfície absorvedora.



Figura 6 - Plataforma de testes mostrando a estrutura, o coletor tipo “V” e o painel fotovoltaico testado.

Dois testes são apresentados neste trabalho sendo um com o sistema “sem” concentração e outro “com” concentração utilizando coletor do tipo “V”.

### Teste I: Pannel fotovoltaico “sem” concentração

Para realização deste teste o sistema foi constituído apenas do pannel fotovoltaico montado na plataforma, conforme mostrado na Fig. 7, e ajustado de forma a facear o Norte, ou seja, com um angulo azimute igual a  $180^\circ$  em relação ao sul, e angulo de inclinação igual ao angulo da latitude da cidade de Belo Horizonte, igual à  $20^\circ$ .

Para determinação da radiação solar global incidente na superfície absorvedora do pannel fotovoltaico foi utilizado o piranômetro, modelo CMP 21 da empresa *Kipp e Zonem*, calibrado previamente, sendo este instrumento instalado num plano coplanar ao plano do pannel fotovoltaico.

Vários sensores de temperatura do tipo termopar tipo “T” de alta precisão “SLE” (*Special Limit of Error*), calibrados previamente, foram instalados na superfície posterior do pannel, sendo essas temperaturas consideradas ser um bom indicativo das temperaturas dos diferentes pontos da superfície absorvedora do pannel.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi o modelo 34972A, da empresa *Agilent*, composto por micro voltímetro de 6 1/2 dígitos, três slots de 20 canais cada para entrada de dados analógicos e software que permite configurar e visualizar dados em tempo real. O intervalo de tempo entre medições foi ajustado para um minuto, sendo esses valores gravados em arquivo para posterior tratamento e análise dos dados.

Uma carga resistiva instalada de 300 W foi utilizada para dissipar a potência elétrica gerada pelo pannel fotovoltaico sendo formada por seis lâmpadas de 12 V, 50 W e 4,16 A. As lâmpadas foram montadas na configuração de duas lâmpadas em série e três derivações em paralelo, como apresentado na Fig. 8, desta forma a tensão máxima vista pelo pannel foi igual a 24 V, e a corrente máxima igual a 12,5 A, atendendo assim a potência máxima do pannel.



Figura 7 - Teste I com o sistema “sem” concentração.

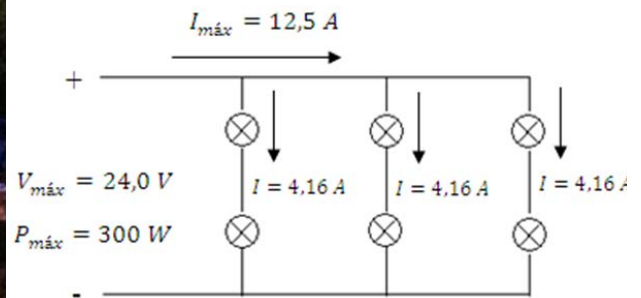


Figura 8 – Circuito elétrico de carga.

Um medidor de corrente elétrica do tipo “shunt”, previamente calibrado, de tensão máxima de saída igual à 60 mVcc e corrente máxima do circuito de potencia igual à 20 A, foi calibrado previamente e foi utilizado para medição da corrente do circuito de potência. A diferença de potencial do circuito de potência foi medido diretamente pelo micro voltímetro do sistema de aquisição de dados.

### Teste II: Pannel fotovoltaico “com” concentração

Para realização deste teste o sistema foi constituído do pannel fotovoltaico e do coletor concentrador do tipo “V”, que foram montados na plataforma, conforme ilustrado na Fig. 6. O sistema foi ajustado de forma similar aquela do teste anterior, ou seja, faceando o Norte com um angulo azimute igual a  $180^\circ$  em relação ao sul, angulo de inclinação igual ao angulo da latitude da cidade de Belo Horizonte (i.e.,  $20^\circ$ ), sendo que o eixo do coletor foi alinhado na direção “leste-oeste”. Essa configuração foi selecionada, pois pode contribuir para simplificar o sistema de seguimento do sol, possibilitando reduzir o número de ajustes anuais para quatro, correspondendo às quatro estações (i.e., ajuste sazonal).

Para a determinação da radiação solar global incidente no plano de abertura do coletor concentrador foi utilizado o mesmo piranômetro utilizado no teste anterior, instalado num plano coplanar ao plano da área de abertura do coletor.

Os mesmos sensores de temperatura descritos na seção anterior foram utilizados para avaliação das temperaturas da superfície absorvedora do pannel em diferentes pontos.

Para determinação da concentração efetiva do coletor foi necessário determinar a radiação solar global incidente na superfície absorvedora do pannel fotovoltaico. Essa radiação foi medida através de seis mini sensores fotoelétricos, calibrados previamente, que foram instalados em seis pontos representativos da superfície absorvedora. Para obter uma resposta linear do sinal da corrente elétrica de curto circuito em toda a faixa da radiação solar incidente (i.e., 200 a  $20000 \text{ W/m}^2$ ) foi necessário adicionar um filtro de vidro de media transmitância sobre as mini células.

#### 4. RESULTADOS E ANÁLISES

Nesta seção são apresentados os resultados e análises dos dois testes realizados, considerando o painel fotovoltaico “sem” e “com” concentração solar. Os dois testes foram realizados em dias praticamente claros, nos dias 17 e 31 de Julho de 2013. Para ambos os testes os sistemas foram inclinados 20° em relação ao plano horizontal e direcionados para o Norte. Os resultados de cada teste consistem de três gráficos referentes ao comportamento temporal das seguintes variáveis: (i) temperaturas medidas em novos pontos do painel; (ii) temperatura do ar ambiente; (iii) radiação solar global medida numa superfície coplanar ao plano inclinado do coletor e(ou) do painel; (iv) radiação global incidente em seis pontos representativos da superfície absorvedora do painel; (v) potência elétrica gerada pelo painel.

##### Teste I: Painel fotovoltaico “sem” concentração

Os gráficos apresentados nas Figs. 9, 10 e 11 referem-se a variação temporal das temperaturas da superfície posterior do painel e temperatura ambiente, radiações solares e potencia para o teste realizado no dia 17 de julho de 2013.

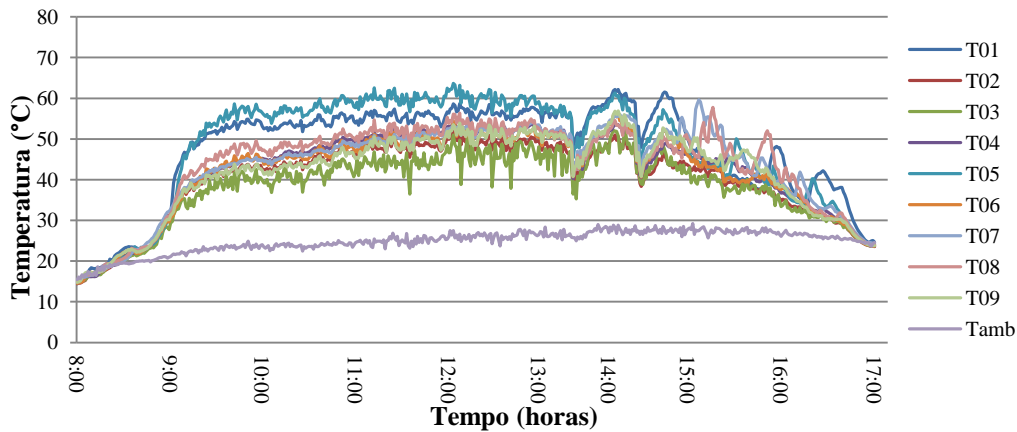


Figura 9 - Variação temporal das temperaturas medidas em diferentes pontos da superfície posterior do painel.

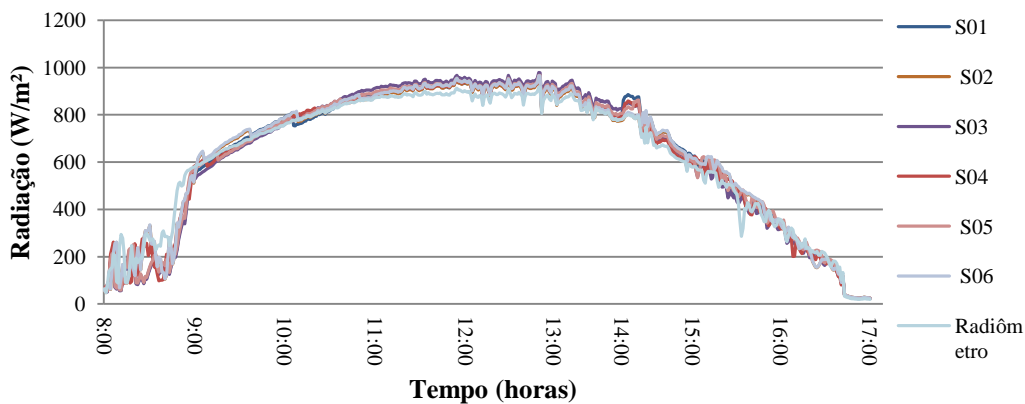


Figura 10 - Variação temporal das radiações solares incidentes em diferentes regiões da superfície absorvedora do painel e da radiação solar medida com o piranômetro medida externamente no plano de abertura do coletor.

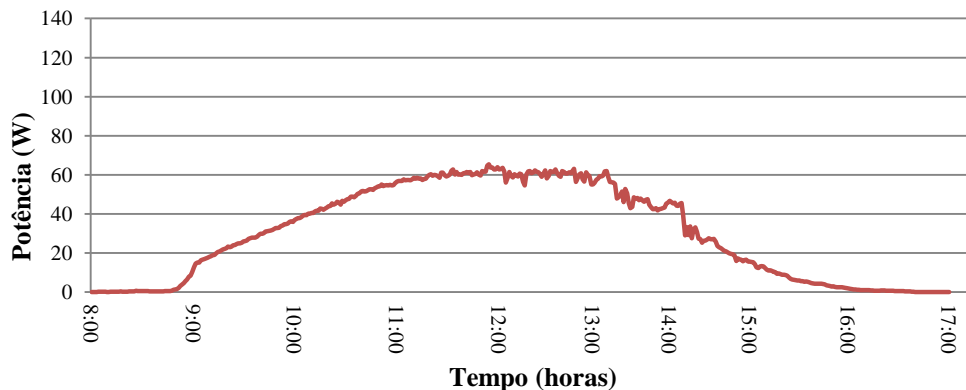


Figura 11 - Variação da potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico.



Analisando as Figs. 9, 10 e 11 observou-se praticamente uma simetria nas distribuições das temperaturas, radiação solar e potencia elétrica em torno do meio dia, devido a uniformidade da radiação solar incidente no painel fotovoltaico. As temperaturas médias do painel e do ar ambiente ao longo do dia foram 43°C e 24,8°C, respectivamente, enquanto, a temperatura máxima foi próxima de 60°C. Durante o período de 10h às 14h ocorreu uma pequena variação das temperaturas para todos os sensores, sendo a maior amplitude 9,5°C. Uma diferença de temperatura ocorreu entre os sensores, sendo as menores temperaturas verificadas nos pontos da parte inferior do painel. Na parte central e superior do painel as temperaturas se aproximaram e a maior temperatura ocorreu no ponto do centro do painel. A provável justificativa são as correntes de convecção natural de ar na superfície do painel, prevalecendo na parte inferior do mesmo. A velocidade do vento, medida em três horários, (i.e., 8h, 12h e 17h), focou praticamente estagnada.

A radiação solar global incidente no painel fotovoltaico, medida pelos seis sensores fotoelétricos e externamente pelo radiômetro apresentou valores praticamente idênticos durante todo o período de teste comprovando a boa calibração dos sensores fotoelétricos. A potência elétrica gerada pelo painel alcançou seu valor máximo de 68 W, ao meio dia, correspondendo a radiação de 918 W/m<sup>2</sup>, sendo a eficiência elétrica média diária igual a 3,6%. Estes valores são inferiores aos valores de potencia e eficiência, respectivamente, 97 W e 12%, informados pelo fabricante na condição NOCT (i.e., radiação solar de 800 W/m<sup>2</sup>, temperatura da célula de 45°C e AM igual a 1,5). Observa-se que os dados medidos das 8h às 17h são inferiores, pois os dados do fabricante são fornecidos na condição de NOCT.

### Teste II: Painel fotovoltaico “com” concentração

Os gráficos apresentados nas Figs. 12, 13 e 14 referem-se a variação temporal das temperaturas da superfície posterior do painel e do ar ambiente, radiações solares e potência elétrica para o teste realizado no dia 31 de julho de 2013.

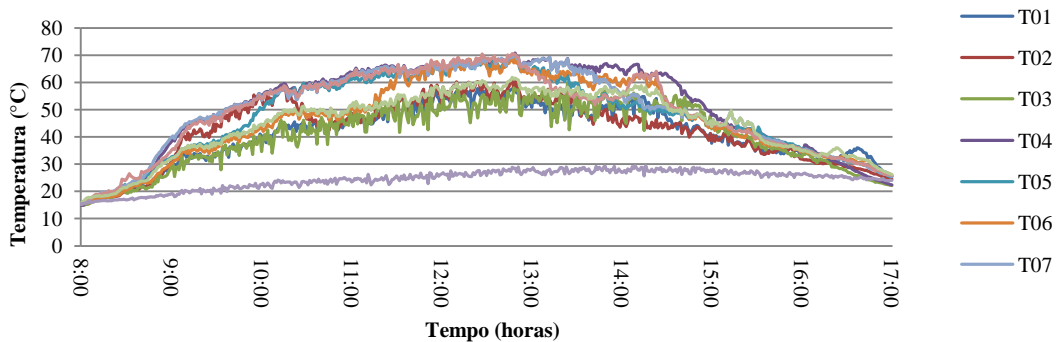


Figura 12 - Variação temporal das temperaturas medidas em diferentes pontos da superfície posterior do painel.

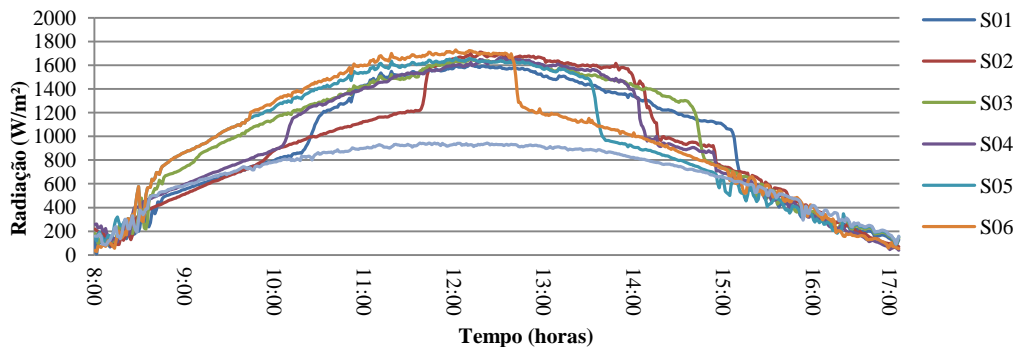


Figura 13 - Variação temporal das radiações solares incidentes em diferentes regiões da superfície absorvedora do painel e da radiação solar medida com o piranômetro medida externamente no plano de abertura do coletor.

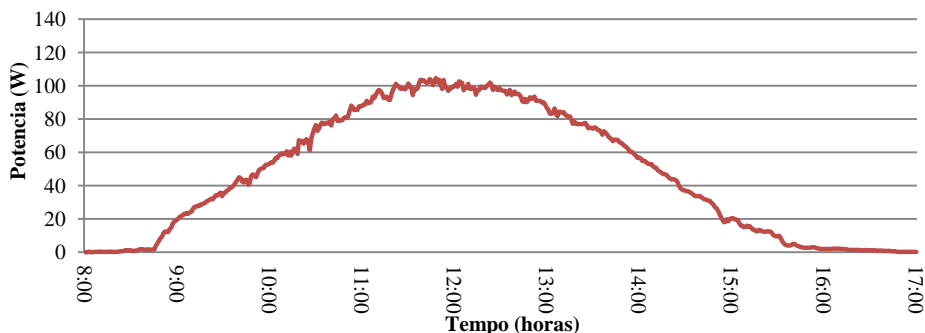


Figura 14 - Variação temporal da potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico.

Analisando as Figs. 12, 13 e 14 observou-se características de uma iluminação não uniforme na superfície absorvedora do painel fotovoltaico ao longo do dia. A distribuição temporal da temperatura e da radiação solar em pontos diferentes do painel não foi simétrica. Os sensores localizados no lado leste do painel apresentaram temperaturas e radiações menores na parte da manhã e maiores na parte da tarde. Os sensores localizados no lado oeste mostraram temperaturas e radiações maiores na parte da manhã e menores na parte da tarde. A explicação se deve aos efeitos de extremidade, uma vez que os comprimentos do coletor e do painel são iguais sendo esta dimensão paralela à direção leste-oeste. Os sensores de temperatura e radiação da parte central do painel apresentaram distribuição simétrica.

As temperaturas médias do painel e do ar ambiente ao longo do dia foram iguais a 46°C e 24,5°C, respectivamente, enquanto que, a temperatura máxima foi igual a 51°C, registrada para um dos sensores localizados na parte central do painel. Durante o período de teste a amplitude da temperatura para todos os sensores foi de aproximadamente 10°C. A velocidade do vento medida às 8h, 12h e 17h e constatou que o mesmo esteve estagnado.

As descontinuidades de radiação solar incidentes no painel apresentadas na Fig. 13 podem ser explicadas pelo efeito de sombreamento que existiu nas extremidades do painel. A uniformidade de iluminação no painel ocorreu de fato entre as 9h e 15h, período em que não foram percebidos os efeitos das extremidades.

Analisando a Fig. 14, observa-se que a distribuição temporal da potência elétrica gerada pelo painel fotovoltaico foi praticamente simétrica em relação ao médio dia, sendo proporcional a radiação solar incidente na superfície absorvedora do painel. A potência máxima ocorreu ao meio dia foi de 105 W, correspondendo a uma radiação no painel de 1650 W/m<sup>2</sup> e uma eficiência elétrica média diária de 5,6%. Quando comparado ao sistema “sem” concentração, o sistema “com” concentração apresentou um aumento de eficiência de 2,0%, mesmo havendo descontinuidades de radiação. Como as temperaturas das superfícies nos dois testes estiveram próximas as perdas térmicas não variaram.

## 5. CONCLUSÃO

Este trabalho constou do dimensionamento, construção e realização de testes num protótipo constituído por um concentrador solar do tipo “V” e um painel fotovoltaico comercial de 135 W de potencia nominal. Os parâmetros de entrada foram o semi ângulo do vértice igual a 30°, a largura do absorvedor igual a 668 mm (largura do painel fotovoltaico) e a concentração geométrica igual a 2,75. Os parâmetros de saída foram o comprimento e altura do coletor iguais a 1,2 m e 1m, respectivamente. As variáveis de saída foram o desvio do angulo de incidência angular, a função de aceitação angular, a concentração efetiva e o angulo limite de aceitação iguais a 9°; 0,727; 2; e 51°, respectivamente.

Dois testes experimentais foram realizados com os sistemas “sem” e “com” concentração, utilizando uma plataforma sobre a qual ambos os sistemas foram instalados, inclinados 20° em relação a horizontal e virados para o norte. O teste “sem” concentração apresentou distribuições temporais da temperatura, radiação solar e potência elétrica simétricas em relação ao meio dia comprovando haver uniformidade da radiação incidente na superfície absorvedora. O teste “com” concentração apresentou distribuições de temperatura, radiação solar e potencia elétrica não simétricas em relação ao meio dia, devido aos efeitos de extremidade, que poderiam ser reduzidos com a utilização de espelhos com comprimentos maiores que o comprimento do painel fotovoltaico. A potencia máxima ocorreu ao meio dia para os dois sistemas. O sistema “com” concentração gerou 55% mais eletricidade e teve aumento de 2,0% da eficiência elétrica.

## REFERÊNCIAS

- Alonso, M., Valera, P., 2003. Estimación de laProducción Eléctrica de la Central Fotovoltaica de 1,2 MWpcon Doble Concentración (Tipo V) y Seguimiento al Sol en Dos Ejes Sevilla PV, Relatório.
- Duffie, J. A. ; W. A. Beckman, 2006. Solar engineering of thermal processes, 3ª edição, 928 p.
- Fraidenraich, N., 1994. Estudo Teórico-Experimental de um Sistema Fotovoltaico Acoplado a Concentradores Tipo V, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 279 p.
- Fraidenraich, N., 1998. Design Procedure of V-Through cavities for Photovoltaic Systems. Progress in Photovoltaic; Research and Applications, Vol. 6, pp. 43-54.
- Hollands, K. G. T., 1971. A concentrator for thin-film.Solar Energy, VoL 13, pp. 149-163.

### -sizing, construction, and experimental evaluation of a photovoltaic system using a solar concentrator dor type “V”

**Abstract.** This work presents a simplified methodology to size a collector concentrator, type “V” aiming to concentrate solar radiation over a commercial photovoltaic panel of 135 W of rate power. The collector was formed by two flat mirrors of reflectance of 0,85 and vertex angle of 30°. Two tests were conducted in the city of Belo Horizonte (-20° latitude), being one “without” and other “with” concentration. Both the systems were tilted 20° from the horizontal and have an azimuth angle of 180°. The system “with” concentration showed an increase in electricity of 55%, as well as, an increase of 2% in the electrical efficiency.

**Key words:** Photovoltaic, CPV, collector type “V”