

## **Orientação de Painéis Fotovoltaicos e Possíveis Soluções de Otimização da Eficiência introduzindo Refletores Planos Fixos.**

### *Photovoltaic Panels Orientation and Possible Solutions for Optimization of Efficiency by Introducing Plane Fixed Reflectors*

**Giovanni Maria Arrigone, PhD, SENAI-SC.**

giovanni@edu.sc.senai.br

**Cristine do Nascimento Mutti, PhD, UFSC.**

Cristine.Mutti@ufsc.br

**Edevaldo João Pereira Junior, Estudante, SENAI-SC.**

edevaldo\_joao@estudante.sc.senai.br

#### **Resumo**

O propósito deste artigo é mostrar os resultados e conclusões de um estudo sobre a disposição e orientação de painéis fotovoltaicos, incluindo o uso de refletores fixos para aumentar a corrente produzida. O estudo quantitativo foi executado utilizando um painel fotovoltaico de pequenas dimensões (área  $72 \text{ cm}^2$ ) e um painel real (área  $5760 \text{ cm}^2$ ) simulando o uso em várias condições de exposição à luz solar. Neste estudo foi considerada uma configuração de instalação típica do painel fotovoltaico com orientação norte-sul e outra, menos usada, leste-oeste, coletando dados de corrente produzida para várias posições solares e usando refletores (tipo 1 branco, tipo 2 espelho) acoplados ao painel para direcionar luz solar para a superfície do painel incrementando a eficiência e a produção de corrente. Os resultados mostraram um melhoramento sensível (até 67% em laboratório e 10% em condições reais) da produção de corrente na configuração norte-sul utilizando refletores a  $90^\circ$  com a superfície do painel fotovoltaico.

**Palavras-chave:** Painel Fotovoltaico; Orientação; Refletor.

#### **Abstract**

*The purpose of this article is to show the results and conclusions of a study on the arrangement and orientation of photovoltaic panels including the use of fixed reflectors to increase the current produced. The quantitative analysis was performed using a photovoltaic panel of small dimensions (area  $72 \text{ cm}^2$ ) and a real one (area  $5760 \text{ cm}^2$ ) simulating its use in various conditions of exposure to sunlight. This study considered a typical installation configuration of the photovoltaic panel with north-south orientation and one, less popular, east-west orientation, collecting data of current produced for various solar positions and using reflectors (type 1 mirror, type 2 white) coupled to*

*the panel to direct sunlight to the panel surface increasing the efficiency and output current. The results showed substantial improvement (up to 67% in the laboratory and up to 10% in the field) of the production of current in the north-south configuration using reflectors at 90° with the surface of the photovoltaic panel.*

**Keywords:** *Photovoltaic Panel; Orientation; Reflector.*

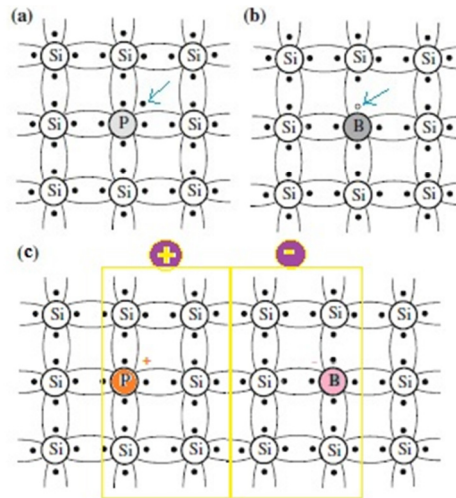
## 1. Introdução

Energia fotovoltaica (PV) é energia gerada por especiais dispositivos a semicondutores chamados painéis fotovoltaicos (painéis PV ou painéis solares) onde tensão é produzida a partir do efeito fotovoltaico. Um exemplo popular de painéis PV é a luminária de jardim ou de caminho a energia solar. Outros exemplos incluem câmeras de trânsito, placas iluminadas, antenas repetidoras e luminárias de estacionamento com um painel solar na parte superior. Estes sistemas são geralmente chamados de *off-grid*, ou sistemas de "*stand-alone*" e são particularmente interessantes em lugares remotos ou de difícil acesso; sua única fonte de energia é a energia solar e não são conectados a rede (*grid*). Sistemas conectados a redes de alimentação e híbridos são mais complicadas porque a energia solar é combinada com outras fontes de energia, como a rede de uma concessionária de energia, geradores eólicos, ou geradores movidos a combustível fóssil e deve ser "condicionada" (frequência) antes de ser introduzida na rede.

O uso de painéis PV se enquadra em uma tendência generalizada hoje em dia de potenciar o uso de fontes de energia não poluentes e renováveis em uma ótica de sustentabilidade energética cada vez mais avançada.

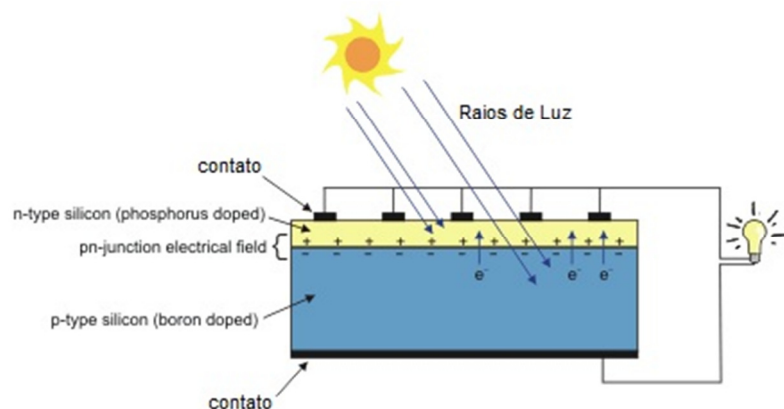
Energia fotovoltaica é produzida quando raios de luz, que transportam energia, incidem sobre materiais especiais chamados semicondutores. Um semicondutor é um material como sílica (Si); este material não é nem um bom isolante nem um bom condutor quando puro (sílica intrínseca). Quando sílica é "contaminada" (dopada) com impurezas particulares ela muda e vira um potencial bom condutor. Sílica pode ser dopada, por exemplo, com átomos de fósforo (P) que contem um extra elétron (uma carga negativa pouco ligada ao átomo parente que, assumindo energia, vira potencialmente livre de "passear" para o material, livremente) que não participa às ligações entre os átomos. A sílica dopada com fósforo é agora rica de cargas negativas e é chamada de tipo-n. Também é possível dopar com boro (B) que, em vez, tem falta de um elétron criando assim um buraco (ou falta de elétron) que pode ser considerado uma carga oposta ao elétron, ou seja, uma carga positiva. A sílica dopada com boro é agora rica de cargas positivas e é chamada de tipo-p (Lynn, 2010).

Juntando dois pedaços de semicondutor, um de tipo-n e um de tipo-p, acontece algo interessante: perto da junção elétrons e buracos se encontram anulando-se um com outro e deixando os átomos parentes, de fósforo e boro, sozinhos assim virando íons carregados positiva e negativamente. A junção vira uma terra de ninguém onde nada se move, cheia de íons que formam uma área com polaridade positiva (fósforo) e negativa (boro) que, como uma barreira, não deixa mais elétrons e buracos deslocar-se e encontrar-se (ver Figura 1).



**Figura 1: Sílica de tipo-n dopada com fósforo (a), sílica de tipo-p dopada com boro (b), junção np (c).**  
**Fonte: Elaborada pelos autores.**

Agora os elétrons do lado de tipo-n e buracos do lado de tipo-p não podem mais encontrar-se, mas existem outros portadores de carga que podem usufruir da polaridade da junção para migrar de um lado para o outro. No lado p existem poucos elétrons livres (portadores minoritários) em um mar de buracos. Estes portadores minoritários são produzidos quando elétrons adquirem bastante energia para liberar-se e “passear”. Normalmente eles caem quase imediatamente em um buraco, mas se estão perto da junção podem ser acelerados pela polaridade presente na região e enviados pelo lado de tipo-n. A região de tipo-n vira assim com um excesso de elétrons que faz essa parte ter um potencial maior do que o lado de tipo-p. A junção, se iluminada por luz, pode ser considerada uma célula fotovoltaica (célula PV) virando uma espécie de bateria que bombeia elétrons de um lado para outro. Isto cria um fluxo de corrente elétrica, quando a célula fotovoltaica é ligada a uma carga externa (Figura 2). A tensão criada por uma célula típica de silício é de cerca de 0,5 a 0,6 volts dc em condições de circuito aberto, sem carga.



**Figura 2: Geração de portadores minoritários (eletrons em material tipo-p) por efeito de luz solar.**  
**Fonte: RensselaerPolytechnicInstitute, 2015.**

A potência de uma célula PV depende da intensidade da radiação luminosa, da sua frequência, da área de superfície da célula fotovoltaica, e da sua eficiência global (FSEC,2005).

Os elétrons (portadores minoritários) responsáveis pela corrente gerada pela célula fotovoltaica precisam de energia para poder libertar-se e ser acelerados pela junção. Eles podem receber energia exatamente suficiente a libertar-se usando a energia de raios de luz. A luz pode ser considerada, em maneira muito simples, uma chuva de pacotes de energia (fótons) com energia proporcional á frequência da luz. Assim um fóton de luz vermelha conterá menos energia de um fóton de luz violeta. Durante o processo de absorção de um fóton de energia por um elétron do lado de tipo-p o elétron:

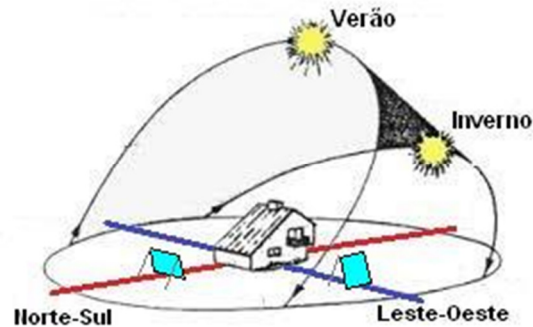
- 1) Recebe um raio de luz correspondente a um fóton de energia suficiente a libertar se;
- 2) Libera-se e começa a “passear” no material;
- 3) Encontra a área da junção;
- 4) Fica preso no campo elétrico da junção e é acelerado para o lado de tipo-n.

Este processo não é muito eficiente; a luz incidente, por exemplo, pode ter frequência (e por isso energia) insuficiente para libertar os elétrons ou pode ter intensidade fraca (reflexão, absorvimento do material). Mesmo libertando elétrons, estes (sendo gerados no lado de tipo-p) podem-se recombinar quase imediatamente com os buracos e ser perdidos. Somente os elétrons “bons” localizados perto da junção terão chances de evitar buracos e entrar na junção. A eficiência de painéis fotovoltaicos disponíveis comercialmente é tipicamente 7-17% (Green et al., 2015),

Para uso prático, as células são agrupadas em painéis fotovoltaicos (painéis PV) que contêm muitas células e podem ser expostos à luz do Sol para produzir corrente normalmente armazenada em baterias (*off-grid*) ou introduzida na rede de distribuição da concessionária local de energia elétrica. Por causa da grande importância da exposição aos raios solares a instalação dos painéis PV deve considerar alguns fatores importantes (Figura 3).

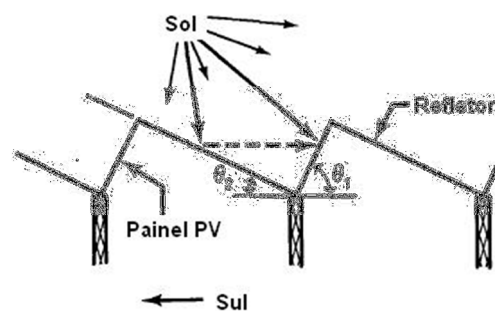
- 1) O sol muda de posição ao longo do dia (a cada hora);
- 2) A trajetória do sol no céu muda de inclinação de acordo com as estações (a não ser no equador) descrevendo arcos que se aproximam ao Zênite (ponto ideal no céu diretamente perpendicular a posição sobre a Terra) no verão e ficam mais baixos no inverno:

A orientação na instalação de um painel PV pode ser influenciada pela necessidade ou de usufruir do pico de energia, por exemplo, somente de manhã, usando uma orientação Leste-Oeste ou para manter constantemente iluminado o painel durante o dia todo com uma orientação norte-sul.



**Figura 3: Possíveis trajetórias do Sol ao longo do ano e possíveis orientações de painéis PV. Fonte: Bluelight, 2015 (adaptado pelos autores).**

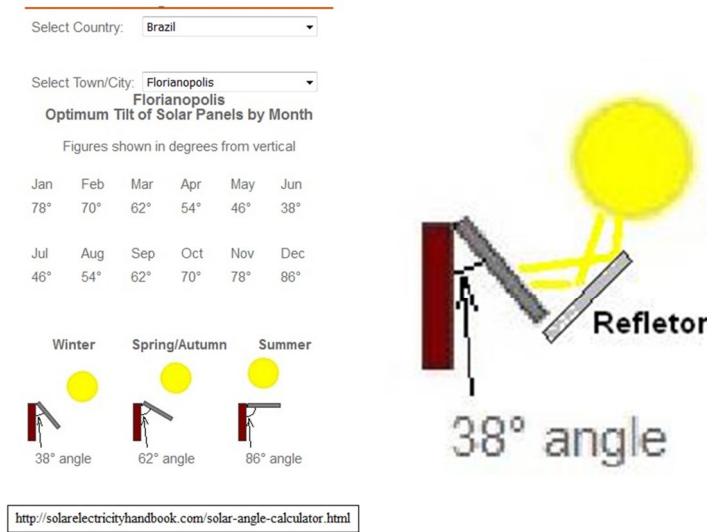
Nos dois casos o movimento diário do Sol e a sua inclinação sobre o horizonte podem introduzir variações de incidência dos raios luminosos sobre a superfície do painel PV e com isso influenciar a produção de corrente. A ideia de introduzir refletores para aumentar a captação de radiação do painel PV foi sugerida no trabalho “Basic Photovoltaic Principles and Methods” (Hersch e Zweibel, 1982) onde é descrito um arranjo para incrementar a eficiência de painéis fixos adicionando refletores (Figura 4):



**Figura 4: Arranjo de painéis refletivos. Fonte: Hersch e Zweibel, 1982.**

Os refletores são colocados em um ângulo com a horizontal que deve ser escolhido com atenção para evitar bloquear o Sol no período de inverno quando a sua trajetória é muito baixa. Os refletores podem ser superfícies simples, levemente refletorizadas ou película plástica fina de poliéster.

O problema da inclinação destes painéis refletivos pode ser resolvido através de um estudo sobre a irradiação solar do lugar específico onde eles serão utilizados. No caso presente foi considerada a área da cidade de Florianópolis no estado de Santa Catarina (Brasil). Os dados de irradiação solar podem ser obtidos através de um “Calculador de Ângulo Solar”, disponível na internet, que permite de visualizar a altura do sol no horizonte por vários períodos do ano para um local específico (Figura 5).



**Figura 5: Possíveis ângulos de inclinação da trajetória solar para vários períodos do ano em Florianópolis (Brasil) e possível posicionamento de um refletor. Fonte: Solar Electricity Handbook, 2015.**

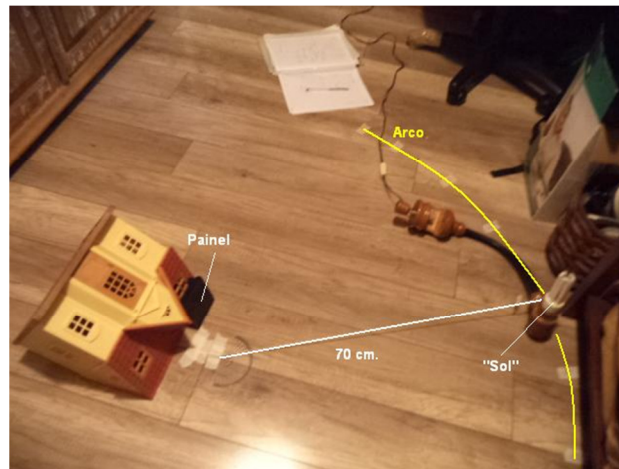
Como é possível observar na Figura 5, a inclinação do Sol muda de 38° (inverno) até 86° (verão) sobre o horizonte no arco do ano. Um refletor angulado a 90° com o painel PV poderia representar a solução ótima (Figura 5) para incrementar a captação luminosa.

## 2. Desenvolvimento

Para obter dados quantitativos sobre a produção de corrente de painéis PV e detectar melhoramentos com a introdução de refletores, foi desenvolvida uma versão reduzida de uma instalação predial real, simulando a iluminação de um painel PV durante o arco do dia (modelo em escala reduzida). Também foram executadas medições utilizando um painel real com e sem refletor para confirmar os dados obtidos com o modelo em escala reduzida.

### 2.1 Arranjo Experimental

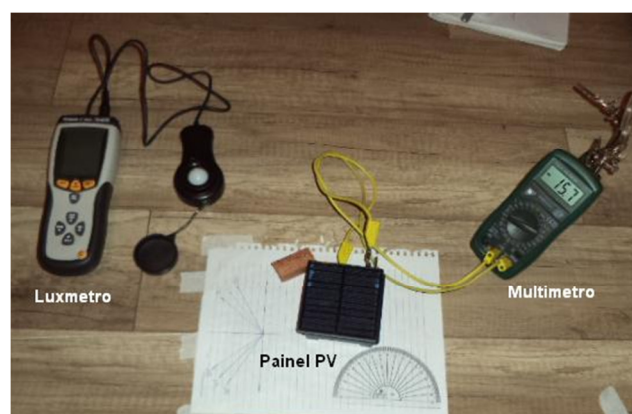
O arranjo experimental do modelo em escala reduzida usado neste artigo pode ser observado na Figura 6:



**Figura 6: Arranjo experimental pela coleta de dados. Fonte: Elaborada pelos autores.**

Um painel PV de sílica (dimensões 8,5×8,5 cm, área de 72 cm<sup>2</sup>), colocado sobre o teto de uma habitação (em escada reduzida), foi iluminado pela luz de uma lâmpada que simula a luz branca produzida pelo Sol. A lâmpada é conectada por um fio de comprimento de 70 cm a um ponto no teto da habitação e pode assim ser rodada em um arco no plano do chão simulando a posição do Sol por varias horas do dia.

Medidas de corrente (em unidades de micro-Amperes,  $\mu\text{A}$ ) foram obtidas conectando o painel PV a um multímetro digital e registradas para vários ângulos entre 10° e 170° do arco da trajetória diária solar (não foram utilizados ângulos mais baixos para simular a presença de obstáculos como árvores, edifícios ou montanhas para posições muito baixas no horizonte). A intensidade luminosa, em lux (que representa a Iluminância, ou seja, a razão entre o fluxo luminoso e a superfície iluminada a certa distância da fonte) foi obtida usando um Luxímetro ARW 8809A (Figura 7).

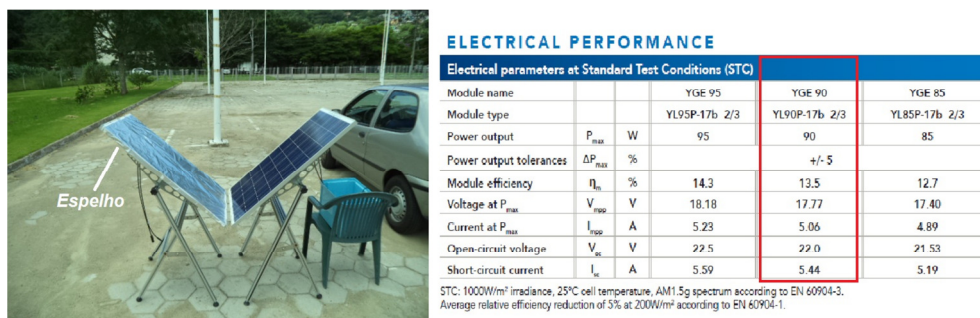


**Figura 7: Luxímetro, multímetro e painel PV usados pelas medidas. Fonte: Elaborada pelos autores.**

Dados experimentais foram também obtidos utilizando um painel solar policristalino (dimensões 90×64 cm, área de 5760 cm<sup>2</sup>) Yingli Solar do Brasil – Painéis Fotovoltaicos - modelo YL90P disponível na Bancada Solar Fotovoltaica do SENAI-CTAI de

Florianópolis em 29 de fevereiro de 2016 para detectar, principalmente, o impacto do refletor sobre o desempenho do painel para varias orientações.

Dados foram obtidos acoplando o painel PV a uma superfície refletora formada de folhas de alumínio (Figura 8):



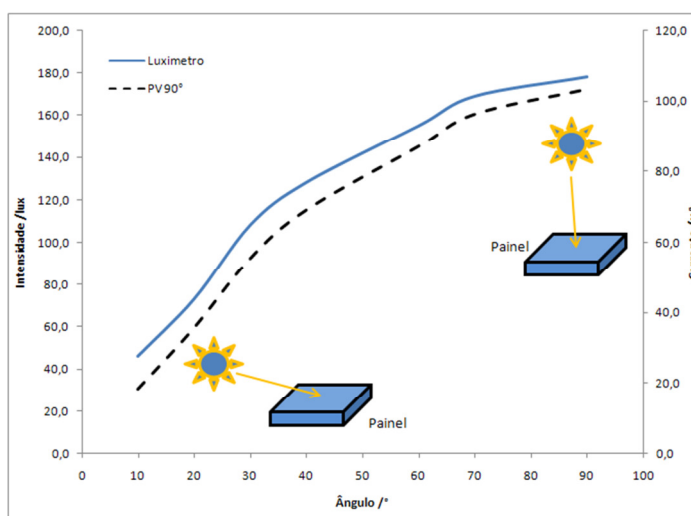
**Figura 8: Arranjo experimental e dados técnicos do módulo fotovoltaico utilizado. Fonte: Elaborada pelos autores e Yingli, 2016.**

Os dados obtidos foram manipulados usando a ferramenta computacional Microsoft Excel.

### 3. Resultados

#### 3.1 Modelo em Escala Reduzida

A iluminância, relativa ao arranjo experimental considerado, foi medida para vários ângulos da lâmpada simulando as posições no céu do Sol por varias horas do dia. O painel PV foi posicionado perfeitamente horizontal simulando perfeita incidência com o sol ao zênite para obter, ao meio-dia, a leitura máxima. As duas curvas na Figura 9 (continua para iluminância e tracejada para a corrente) mostram uma boa concordância em termos de variações e de previsão de aumento desde 10° até 90°.



**Figura 9: Gráfico de iluminância e de corrente. Fonte: Elaborada pelos autores.**



Para um ângulo de 90° correspondente, na simulação, ao período do meio-dia, foi obtida uma leitura de corrente do painel PV de  $101,2 \pm 1,5 \mu\text{A}$  por uma iluminância de  $178,2 \pm 2,0 \text{ lux}$ .

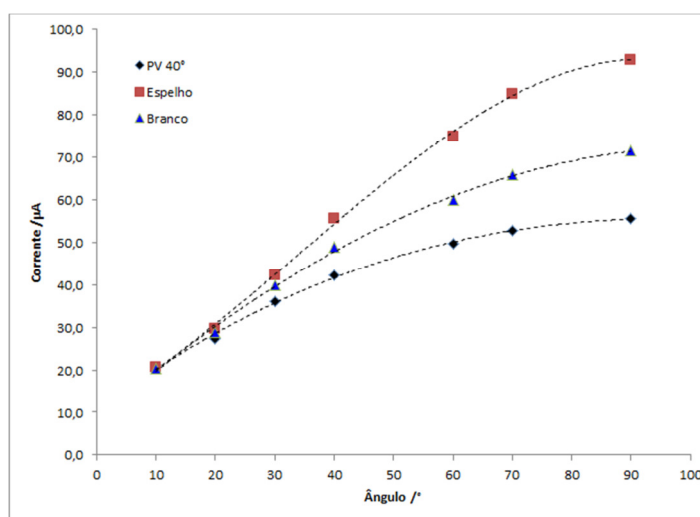
### 3.1.1 Orientação Norte-Sul

A orientação do painel PV Norte-Sul é a mais usada na instalação predial (quando permitido pela conformação do telhado) devido à possibilidade de usufruir da iluminação solar (mesmo se oblíqua) todo o dia e para todo o ano.

Esta configuração foi simulada com uma inclinação de 40° do painel PV considerando que (Figura 5) a posição mais baixa do Sol em Florianópolis será de 38° no inverno. Dados foram coletados para obter o gráfico da Figura 10 onde é também mostrada uma comparação com dados de corrente produzida pelo painel PV depois da introdução de painéis refletores estáticos (de área  $70 \text{ cm}^2$ ) angulados a 90° com a superfície do painel PV para aumentar a eficiência de captação luminosa. Os painéis refletores usados foram de dois tipos:

- 1) Espelho: altamente refletor formado por uma folha de alumínio;
- 2) Branco: menos refletor, mas com alto poder de difusão da radiação em todas as direções.

O refletor branco foi considerado por ser bastante barato em termos reais (uma parede pintada de branco, por exemplo) e pelo o fato de criar uma reflexão difusa, ou seja, em todas as direções.



**Figura 10:** Gráfico dos dados de corrente produzida pelo painel PV em orientação Norte-Sul incluindo também refletores estático para incrementar a eficiência do painel. Fonte: Elaborada pelos autores.

Observando o gráfico da Figura 10 é possível detectar um aumento sensível da produção de corrente em particular utilizando um refletor de tipo espelho com um aumento de 55,5 para 93  $\mu\text{A}$  para o refletor espelho (aumento de 67%) e para 71,4  $\mu\text{A}$  para o refletor branco (aumento de 29%). Este aumento de geração de corrente justificaria a introdução deste tipo de solução para aumentar a captação de radiação solar mesmo utilizando soluções mais baratas como painéis de giz branco ou janelas que não

precisariam introduzir nenhuma modificação na instalação do painel PV e, dependendo do comprimento deles, poderiam ter pouco impacto visual (Figura 11).

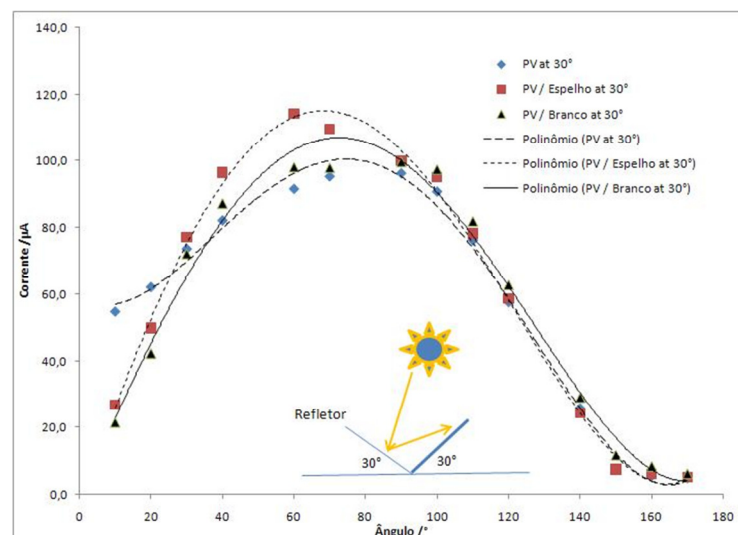


**Figura 11: Painéis refletores integrados na estrutura do edifício. Fonte: Dualsun, 2015.**

### 3.1.2 Orientação Leste-Oeste

A orientação Leste-Oeste não é muito popular como solução de instalação pelo fato de perder praticamente metade da irradiação solar durante o dia. Um uso possível desta configuração poderia ser em situações onde a estrutura de base (telhado) não pode ser orientada diferentemente ou onde particulares conformações reduzem a exposição (por exemplo, refúgios alpinos em vales estreitos e com montanhas atrás deles).

Simulações foram efetuadas para medir a geração de corrente nesta configuração e testar o melhoramento na eficiência obtido introduzindo refletores (Figura 12):



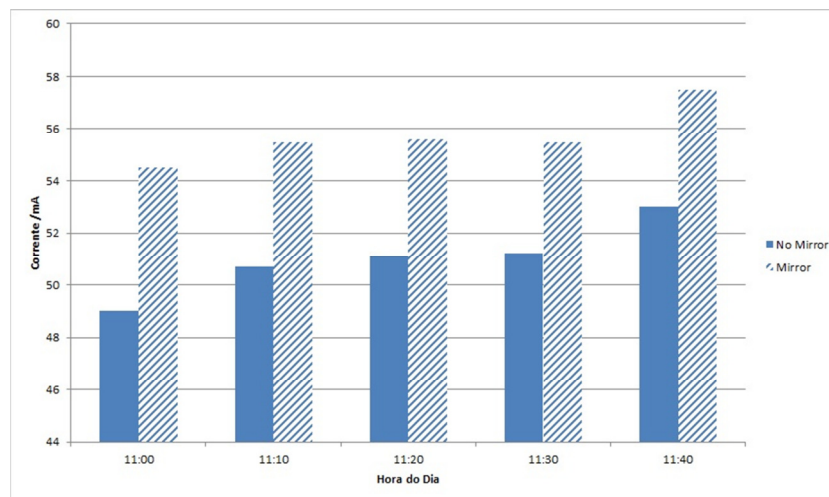
**Figura 12: Gráfico dos dados de corrente produzida pelo painel PV em orientação leste-oeste incluindo também refletores estáticos para incrementar a eficiência do painel. Fonte: Elaborada pelos autores.**

Com um ângulo de inclinação do painel e do refletor de 30°, somente com o uso do refletor espelho se teve um aumento sensível da corrente gerada (de 95,5 para 114 µA) sem um sensível melhoramento na captação para ângulos maiores de 90°. No outro lado foi

registrada uma perda bastante sensível para ângulos mais baixo ( $10^\circ$  até  $20^\circ$ ) onde o refletor cobre o painel PV. O ângulo de  $30^\circ$  foi escolhido para evitar ao máximo interferir com a iluminação direta do Sol. É interessante notar o pequeno incremento produzido pelo refletor branco que com a sua reflexão difusa permite de redirecionar radiação sobre o painel PV para ângulos maiores de  $90^\circ$ .

### 3.2 Painel Fotovoltaico Real

Na orientação Norte-Sul foram registrados dados de corrente obtida com e sem o refletor aplicado ao painel PV real Yingli nas condições parecidas com aquelas do ponto 3.1 deste artigo (ver Figura 10) por varias horas do dia observando um aumento de até 5 mA no desempenho quando o refletor está presente (Figura 13):



**Figura 13: Gráfico do desempenho do painel fotovoltaico com (Mirror) e sem (No mirror) refletor por varias horas do dia. Fonte: Elaborada pelos autores.**

Na Figura 13 a intensidade da radiação solar no dia das medidas experimentais foi bastante uniforme devido à falta de nuvens que poderiam reduzir a intensidade luminosa incidente sobre o painel PV (iluminância de 130 kLux).

Um experimento adicional foi executado para testar o efeito da presença do refletor no caso que o Sol esteja atrás do painel PV como no caso de orientação Leste-Oeste quando o painel recebe radiação somente de manhã, enquanto, depois do meio dia, fica sem iluminação direta. O Sol nesta configuração experimental ficou atrás do painel PV e o refletor foi usado para redirecionar os raios solares sobre a sua superfície. Os resultados obtidos confirmam um aumento máximo e muito interessante da corrente produzida que passa de  $21,8 \pm 0,1 \mu\text{A}$  para  $30,0 \pm 0,1 \text{ mA}$  (as incertezas correspondem à menor divisão do multímetro digital usado nas medidas) mas que diminuem mão a mão que o Sol fica coberto pelo painel PV. Em vez de usar um painel refletor acoplado como em Figura 8 (que atrapalha o Sol da manhã e fica coberto de tarde pelo mesmo painel PV) seria interessante utilizar dois refletores laterais orientados e até convexos para aumentar a captação no período da tarde sem interferir na captação de manhã.

#### 4. Conclusões

Neste artigo foram descritos uma série de experimentos para detectar melhoramentos no desempenho de um painel PV com a introdução de simples painéis refletores a fim de aumentar a captação luminosa e com isso a produção de corrente.

Os experimentos foram efetuados usando um modelo em escala de um sistema real para pesquisar a viabilidade de acoplar um refletor a um pequeno painel PV e, in seguida, um painel PV real para confirmar as observações obtidas com o modelo em escala.

Os resultados do modelo em escala mostram um sensível melhoramento da eficiência na configuração Norte-Sul com a introdução de um refletor angulado a 90° com a superfície do painel PV chegando a um aumento de até 67% da corrente gerada (painel espelho). Particularmente interessante é o fato que este resultado foi obtido para uma inclinação do painel de 40° correspondente à inclinação da trajetória solar no inverno onde a necessidade de energia poderia ser mais relevante (aquecimento, iluminação) que não é particularmente favorável no verão quando o Sol (pelo menos na área de Florianópolis) alcança uma elevação de 86°. A configuração de instalação Leste-Oeste produziu resultados mais limitados, em termos de melhoramento na geração de eletricidade, introduzidos pelos refletores. Mesmo assim esta configuração poderia ser estudada mais a fundo no futuro para desenvolver configurações geométricas de refletores mais eficientes (*side-boosters* ou refletores laterais) e introduzir retro-refletores para redirecionar os raios solares quando o painel fica na sombra.

Os resultados com o painel real mostraram um melhoramento no desempenho do painel em ambas as orientações mesmo com aumentos, nos valores de corrente, não tão elevados como no modelo em escala (um aumento máximo de 10% da corrente quando o refletor é acoplado ao painel PV na orientação Norte-Sul). Isto pode ser devido a vários fatores entre os quais: qualidade relativamente baixa do refletor espelho (feito de folhas de alumínio não perfeitamente planas); aumento da temperatura do painel PV e conseqüente redução da eficiência (foram registradas flutuações nas leituras quando o vento assoprava resfriando a superfície do painel).

No futuro seria útil e interessante medir, no arco do dia, a corrente produzida e as variações de temperatura introduzidas pela presença do refletor. Seria também interessante testar, usando um painel real, a configuração de refletores laterais para melhorar a detecção de radiação solar na configuração Leste-Oeste.

#### Referências

BLUELIGHT. Em:

<<http://www.e-bluelight.com/article-372-Solar%20Panels%20%28Photovoltaic%20Panels%29%20Overview.html>>. Acesso em dec. 2015.

DUALSUN. Em:

<<https://dualsun.fr/en/installations/optimum-orientation-tilt-angle-for-solar-panels/>>. Acesso em dec. 2015.

FSEC (Florida Solar Energy Center). 2005. Photovoltaic fundamentals. Photovoltaics and distributed generation. <http://www.fsec.ucf.edu/pvt/pvbasics/> (accessed June 30, 2005).

GREEN, M. A., EMERY, K., KING, D. L., IGARI, S. and WARTA W. Solar cell efficiency tables (Version 26). Prog. Photovolt.: Res. Appl.; 13:387-392, 2005.

HERSCH, P., ZWEIBEL, K. Basic Photovoltaic Principles and Methods. SERI/SP-290-1448 Solar Information Module 6213. Published: February 1982.

LYNN, P. A. Electricity from Sunlight An Introduction to Photovoltaics. John Wiley & Sons, Ltd, 2010.

MESSENGER, R. A. and VENTRE, J. Photovoltaic Systems Engineering. 2nd edition. CRC Press LLC, 2004.

RENSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE. Em:

<<http://www.lrc.rpi.edu/programs/nlpip/lightingAnswers/photovoltaic/04-photovoltaic-panels-work.asp>>. Acesso em dec. 2015.

SOLAR ELECTRICITY HANDBOOK. Em:

<<http://www.solarelectricityhandbook.com/solar-angle-calculator.html>>. Acesso em dec. 2015.

Yingli Solar - Data Sheet:

<http://www.yinglisolar.com/al/products/multicrystalline/yge-60-cell-series/>>. Acesso em fev. 2016.

### **Agradecimentos**

Os autores gostariam de agradecer os colegas do RELAB do SENAI-CTAI de Florianópolis e em particular Arthur Weschenfelder pela ajuda e disponibilidade durante o trabalho experimental.