

## **ESTUDOS PARA POSICIONAMENTO ÓTIMO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS NAS LATITUDES AMAZÔNICAS**

**Arthur da Costa Almeida, Carlos Simões Pereira**

**RESUMO:** O conceito de ângulo de inclinação ótimo para painéis solares é esclarecido com o uso de equações de um sistema de coordenadas celeste equatorial, concluindo com o pensamento geral de que esse ângulo é igual à latitude do lugar, se desprezarmos os efeitos de refração atmosférica dos raios solares. Esse conceito é expandido usando-se fórmulas astronômicas para analisar a variação da incidência solar ao longo do dia e do ano, que combinado com metodologia desenvolvida pelo National Renewable Energy Laboratory e adaptado para as condições locais, permite derivar-se gráficos ou cartas solares, para as latitudes do estado do Pará (0 a 4 graus norte e 0 a 8 graus sul) e até o sul do Brasil, para serem usados na avaliação de perdas de energia em função da direção e inclinação dos painéis solares. Essas cartas também são usadas para confrontar resultados de testes da chamada orientação Leste-Oeste, indicando uma conformidade dos testes com as cartas solares produzidas.

**Palavras-chave:** orientação de painéis solares, cartas solares, montagem Leste-Oeste.

## **INTRODUÇÃO**

Para a máxima captação da energia do sol, o conjunto de painéis solares que compõe um arranjo solar, deveria acompanhar a trajetória do sol, garantindo que os raios desse chegassem sempre perpendicular ao modulo coletor, pois assim se asseguraria a máxima transferência de energia ao longo do trajeto aparente do sol no local considerado (LORENZO, 1994). Isso levaria a adoção de sistemas de rastreamentos caros e dependendo da extensão da área utilizada, quase impossível.

Assim para simplificar e tornar financeiramente viável esse tipo de instalação, os painéis são fixos e levam a orientação e a inclinação dos locais onde são instalados (principalmente telhados): não ha uma escolha, ou quase, pois a correção da inclinação dos telhados levaria a adoção de sistemas de treliças que aumentam os coeficientes de pressão e a força resultante na superfície do painel (BARBOSA, 2013), diminuindo-se sensivelmente a segurança, bem como aumentando o preço da instalação.

Isso posto existe sempre a necessidade de se avaliar o quanto de energia estamos perdendo em função da orientação e inclinação dos painéis, estados herdados dos locais onde são instalados, com o objetivo de compensar eventualmente essas perdas pela adição de mais painéis, o mais utilizado, estudos de técnicas mais avançadas, como a focalização dos raios solares nas células fotovoltaicas (YAMADA, OKOMOTO, IJIRO, 2013).

Outro aspecto que se observa na instalação de painéis fotovoltaicos, principalmente em áreas urbanas, é que ha a tendência de só usarmos um lado do telhado (1 água), o que está mais ou menos orientado na direção que julgamos 'ótimo' ou quase isso; quando pode-se usar os dois lados do telhado (águas), principalmente quando estiverem com orientação Leste-Oeste ou muito próxima, que é uma prática usada na orientação das construções nos trópicos, pois se evita insolação severa (na nossa região) na frente e fundos da habitação. A montagem Leste-Oeste, de acordo com boas práticas de projeto, deve sempre usar dois MPPT's (Maximum Power Point Tracking) a fim de evitar perdas por diferença de captação entre o(s) *string* de uma água e o(s) *string* da água oposta.

## **FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Estimar valores de radiação solar em painéis com diferentes graus de inclinação é complexo e difícil, por isso é sempre adotado uma abordagem de radiação isotrópica para modelar radiação solar, que normalmente causa discussões, principalmente pelo tratamento

que se dá a parcela de radiação difusa (GULIN,VASAK, PERIC, 2013). Tem sido observado nesses modelos incertezas da ordem de 10% a 15% (WILLMOTT, 1982) .

Para se ter uma ideia dessa complexidade considere que durante seu trajeto aparente o sol estará no hemisfério norte na máxima declinação, (entre Cuba e a Florida) no solstício de junho - um painel em Belém voltado pro norte estaria bem orientado. O sol começa então a voltar, e em setembro ele cruza o equador na direção do sul - o painel de Belém ainda tá bem. Em dezembro ele chega ao outro solstício, com máxima declinação sul  $-23^{\circ} 27'$  (lá pelo Rio de Janeiro). Nesse momento o painel em Belém esta de costa para o sol ao meio dia; só em março é que o sol chega de novo ao equador, agora caminhando para o norte.

Como se vê, por mais elaborada que seja a metodologia o nível de acurácia nos valores obtidos ainda precisam melhorar bastante.

No entanto essas aproximações dão uma visão critica dos valores de radiação solar que eventualmente estamos perdendo com esta ou aquela inclinação e orientação. A sugestão básica é de que a inclinação deve ser igual à latitude e a orientação deve ser norte para o hemisfério sul e sul para o hemisfério norte, simples assim.

Para o ângulo de inclinação essa recomendação é tido com uma indicação apenas pratica - uma regra do polegar -, mas na verdade está baseada em relações da trigonometria esférica, como veremos a seguir.

Com relação à posição de uma estrela como vista de um determinado ponto na superfície da Terra, usamos um sistema de coordenadas celeste que tem como plano básico, o plano do equador, por isso é conhecido como um sistema de coordenadas celeste equatorial. Com o uso desse sistema de coordenadas e baseado na lei do cosseno, da trigonometria esférica, a equação seguinte é valida.

$$\cos\theta = \text{sen}\phi.\text{sen}\delta + \text{cos}\phi.\text{cos}\delta.\text{cosh} \quad (1)$$

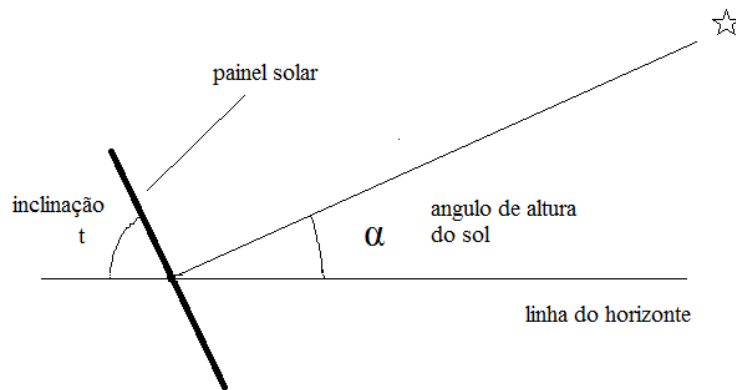
onde  $\theta$  e o angulo zenital

$\delta$  e a declinação

$h$  e o angulo horário

O ângulo de elevação  $\alpha$  - a altura angular do sol - é o complemento de  $\theta$  ( $90-\theta$ ), o angulo zenital. O ângulo de elevação do sol ( $\alpha$ ) esta relacionado com o ângulo de inclinação do painel ( $t$ ), também denominado *tilt*, do nome em inglês. A relação entre a inclinação do painel e o ângulo de elevação, a altura do sol no horizonte, esta mostrado na figura 1.

**Fig.1** Relação do ângulo  $t$ , de inclinação do painel com a altura do sol



**Fonte:** elaborado pelos autores (2016).

Da Figura 1 depreende-se que  $t = (90 - \alpha)$ , que substituindo na eq. 1 fica

$$\text{sen}(90-t) = \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{cosh} \quad (2)$$

aplicando-se a relação trigonométrica do seno de uma diferença no lado esquerdo da eq.2 fica:

$$\text{cost} = \text{sen}\phi \cdot \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \cdot \text{cos}\delta \cdot \text{cosh} \quad (3)$$

A declinação do sol varia de 0 nos equinócios a cerca de 23 graus nos solstícios, logo usando-se as posições nos equinócios, que concentra os maiores valores de irradiação temos, na eq. 3,  $\delta=0$ , e considerando a análise na passagem meridiana quando temos o máximo de irradiação solar, temos que o ângulo horário  $h=0$ . Aplicando-se essas considerações a eq. 3 concluímos que

$$\text{cost} = \text{cos}\phi \quad (4)$$

Portanto o ângulo ótimo para um painel solar fixo é igual à latitude do local, desprezando-se o desvio angular imposto aos raios solares devido à refração atmosférica (lei de Snell-Descartes), situação válida para pontos localizados nos trópicos.

Além desse limite a refração atmosférica (THOMAS, RICHARD, 1996) aumenta o ângulo da altura do sol, podendo ser necessário levar em conta esse fenômeno em regiões extratropicais, embora esses valores sejam bem pequenos (ANEXO B).

Como a parcela da radiação difusa aumenta para menores ângulos de incidência, (máximo em 0°) alguns autores usam englobar a refração atmosférica e a provável melhoria de recepção da radiação difusa em altas latitudes, como um parâmetro de tempo meteorológico que se subtrai ao valor da latitude do local (DUMAN, 2015), gerando ângulos de inclinação menores.

Como a parcela de radiação difusa ocorrer em todas as direções, esse fato impacta na escolha de um ângulo de inclinação específico (o ótimo para esse caso seria 0°), observando-se também que em situação de exclusiva presença de radiação difusa, os painéis fotovoltaicos funcionam com apenas 10 - 20% de sua capacidade (NREL, 2016) o que torna incerta a introdução de parâmetros para diminuição do ângulo de inclinação dos painéis, como usado em metodologias apresentadas neste trabalho.

## **METODOLOGIA**

A avaliação das perdas de absorção de energia solar em função do posicionamento do sistema captor é complexa e difícil, por obra da extrema variação da radiação solar em função da sua trajetória ao longo dos dias e ao longo do ano, como já ressaltado acima. Essas metodologias normalmente não fornecem dados exatos e sim valores médios em base anual ou mensal, de radiação, que através de simulações matemáticas podem ser visualizadas em um mapa, aqui denominado de 'carta solar', que corresponde a topologia de orientação da instalação fotovoltaica a ser analisada (ECA, 2012).

Uma metodologia aqui descrita brevemente, pois ainda está em avaliação, usa a equação 1, oriunda de um sistema de coordenadas equatorial, simulando o movimento de um astro (neste caso o sol), ao longo do espaço do sistema de referência; essa equação se presta a automatização da determinação da incidência dos raios solares como na referência (CAMPOS, ALCÂNTARA, 2013).

Nessa metodologia a eq. 1 é associada à geometria do painel e sua relação com o sistema equatorial de coordenadas, e considera o trajeto do sol nos equinócios e o valor da radiação na passagem meridiana, como uma media máxima de irradiação solar ao longo do ano, derivando suas saídas em função desses valores máximos e dos diversos ângulos entre os raios solares e o plano do painel fotovoltaico.

Outra metodologia também usada neste trabalho, publicada na referência (CHRISTIANSEN, BARKER, 2001) por pesquisadores do NREL - National Renewable

Energy Laboratory (que neste trabalho estamos considerando como uma metodologia do NREL), gera um banco de dados para valores de ângulo de inclinação, rumo (ou azimute) e irradiação solar, banco que é utilizado para fazer correlações com uma formula da forma

$$a_0+a_1.t + a_2.t^2 \quad (5)$$

onde os parâmetros  $a_0$   $a_1$  e  $a_2$  são função da latitude e da orientação dos painéis. Derivando com relação a  $t$ , obtém-se o valor ótimo, zerando-se a 1ª derivada da eq. 5, o que está de acordo com o desenvolvimento da eq. 4 para o ângulo de inclinação.

Ajustando o banco de dados com a eq.5. obtém-se em seguida uma formula que nos dá os valores de irradiação em função do ângulo de inclinação ( $t$ ) e a orientação, medida pelo rumo ou azimute ( $az$ ) do painel solar, da forma

$$(([\varphi-r]+[\varphi-r]^2)az^2 + az^3)t +(az^2+az^3)t^2 \quad (6)$$

Usando-se uma adaptação da técnica estatística do NREL e a variação dos ângulos do de posição do sol em um sistema equatorial de coordenadas, além de adaptações que expurgam o componente de tempo meteorológico usado nessa metodologia, foram gerados cartas solares (ANEXO A) para pontos de latitude ( $\phi$ ) específicos que orientarão análises da dispersão de recebimento da energia do sol, analise essa que tem aplicação na especificação de medidas mitigatórias, quando for o caso.

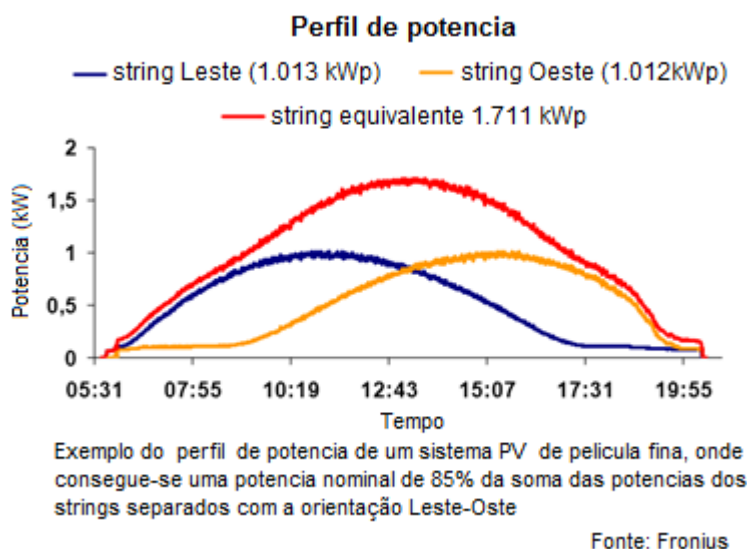
### **Orientação Leste-Oeste**

Um item interessante que pode ser avaliado com essa técnica, a denominada orientação Leste-Oeste, que se contrapõe ao tipo corriqueiro de orientação para sul ou para norte, de acordo com o hemisfério. Este tipo de montagem usa distribuir os painéis solares nas duas águas de um telhado, separadas em *strings* diferentes, como uma técnica de melhor aproveitamento da disponibilidade da radiação solar ao longo do dia. Além disso, essa montagem leva a um espalhamento do instante de pico da irradiação recebida que normalmente se concentraria apenas em uma água - a que está voltada para a direção do sol do meio dia - que ocorre pela parte da manhã. Com o uso de inversores que registram os dados coletados, pode-se ver o efeito da utilização das duas águas do telhado, como mostrado

na figura 2 (levantado por um fabricante de inversores), (FRONIUS, 2011).

Como a montagem Leste-Oeste, em um dado momento, expõe os painéis a diferentes níveis de radiação solar, esperava-se um aumento de perdas por descasamento entre os níveis de insolação nos painéis de leste em relação aos painéis de oeste, por isso essas instalações pediam o uso de inversores diferentes para cada água, depois suavizado para um inversor com 2 MPPT's, para diminuir esse descasamento, no entanto testes de uso dessa configuração têm mostrado que se consegue bons resultados mesmo com um só MPPT's. O gráfico da figura 2 mostra o desempenho da montagem Leste-Oeste com o uso de um MPPT, conforme reportado por um desses arranjos de teste (ISE, 2009).

**Fig. 2 - Uso da montagem Leste-Oeste com um só MPPT**



Fonte: Elaborado peloso autores (2016).

## RESULTADOS

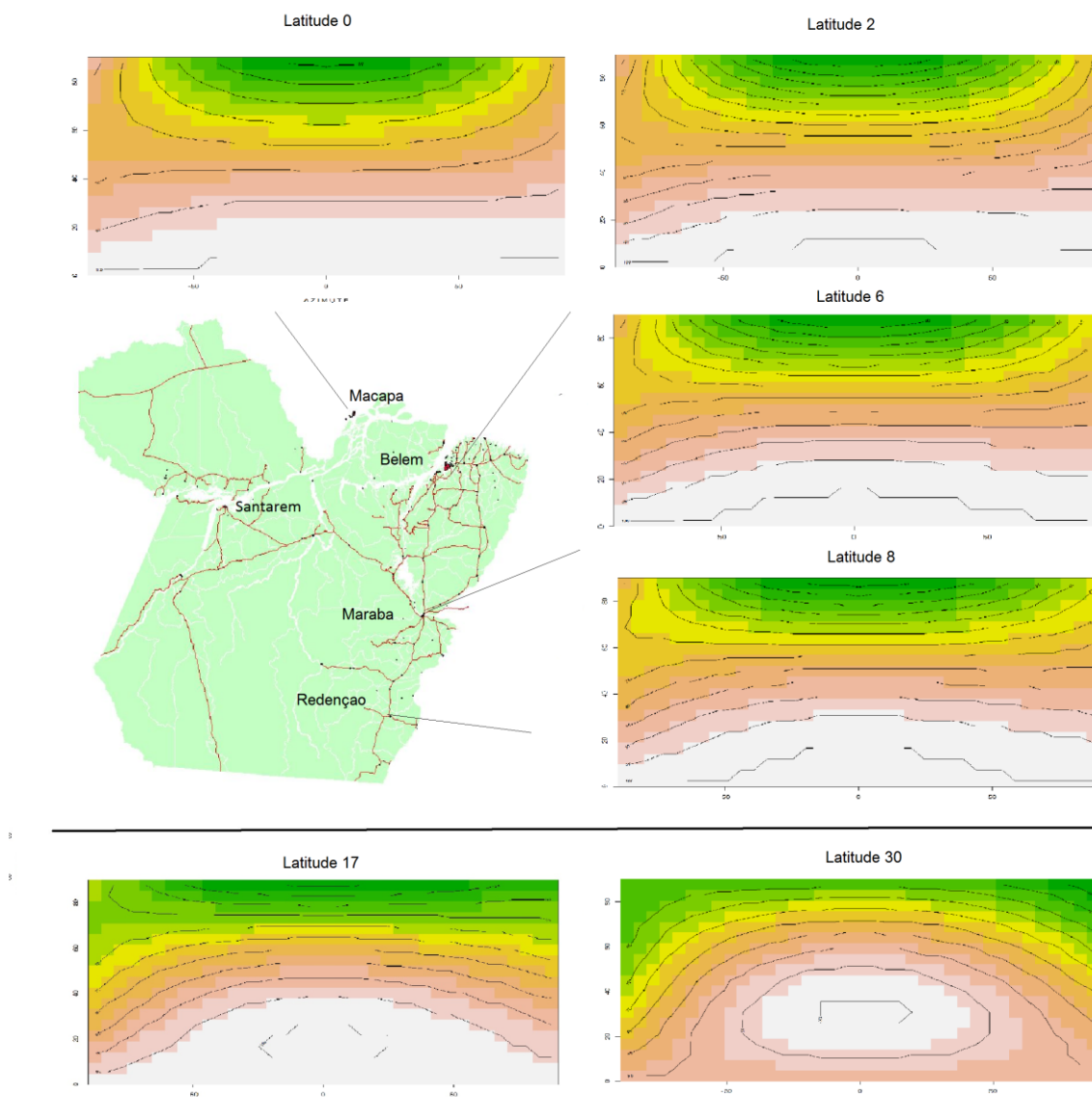
Neste trabalho demonstra-se que o ângulo de inclinação ótimo corresponde ao ângulo de latitude do lugar, e que as discrepâncias para latitudes maiores se deve ao desvio angular imposto na trajetória dos raios solares pela refração atmosférica e pela tentativa de se aumentar a captação da radiação difusa com menores ângulos de inclinação nas altas latitudes.

Pela manipulação da equação de um sistema equatorial de coordenadas celeste é possível obter-se informações sobre a melhor inclinação e orientação.

Adaptando-se a metodologia NREL com as conclusões acima obteve-se cartas solares que expõem visualmente os percentuais de perdas de captação de energia solar para uma latitude considerada, quando varia-se o ângulo de inclinação e orientação do painel

fotovoltaico de localização fixa. Na figura 3 mostram-se algumas dessas cartas, associadas a áreas do estado do Pará, além de cartas de maiores latitudes, observando-se a variação do formato das cartas com a mudança da latitude.

**Fig. 3 - Cartas solares para as latitudes no Pará**



**Fonte: Elaborado pelos autores (2016).**

Como se observa dos gráficos da figura 3 há pouca variação entre latitudes 0° a 8° sul, correspondente a superfície do estado do Pará. Na parte de baixo da figura 3 estão mostrados os gráficos para latitudes maiores, como 17° e 30°, englobando todo território brasileiro. No anexo A, esta a coleção de cartas geradas neste trabalho.



## **CONCLUSÕES**

Este trabalho faz uma análise breve dos tópicos: ângulo ótimo de inclinação de painéis fotovoltaicos e perdas com o rumo ou azimute e o uso da montagem Leste-Oeste.

1- O ângulo ótimo de inclinação foi derivado com o uso de equações de sistema de coordenadas equatorial e usado junto com metodologia NREL, modificada para geradas cartas solares, mostrando a variação da captação de insolação em função do azimute e da inclinação.

Essas cartas devem ser usadas em cada local para avaliar as perdas devidas aos ângulos de telhados (10° a 20° na nossa região) e orientação dos mesmos, com o objetivo de quantificar o projeto e eventual adição de um ou mais painéis para compensar as perdas, se for o caso.

2 - Confrontando resultados de testes da montagem Leste-Oeste com as cartas geradas verificou-se a conformidade destes com as perdas indicadas nas cartas, o que elege as mesmas ao uso nas avaliações da montagem Leste-Oeste, dando suporte a distribuição de painéis num e outro lado do telhado, propiciando uma captação uniforme, com uma distribuição do pico na parte da manhã e da tarde. Observe-se também das cartas, que a montagem Leste-Oeste é factível até em altas latitudes, como a de 30°, lá pelo Rio Grande do Sul. No anexo A mostramos as cartas em tamanho mais apropriado.

## **CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Observa-se que a metodologia para a geração das cartas solares pode ser materializada com o uso das equações de um sistema de referência equatorial, fazendo-se variar os ângulos de inclinação/elevação e o ângulo horário (variando a orientação), tendo como premissa a colinearidade da normal ao plano do painel, com o ângulo de elevação do sol no ângulo horário considerado. Esse conhecimento foi usado na adaptação de metodologia NREL para produção de cartas solares. Pode-se também usar as tabelas de desvio angular por efeito da refração atmosférica, como a mostrada no anexo B, para ajustar o ângulo de inclinação dos painéis, principalmente em altas latitudes.

O objetivo final desta pesquisa é formalizar uma metodologia usando as equações do sistema de coordenadas celestes equatorial, com *feedback* de modelos de insolação e técnicas de sensoriamento remoto para a produção de cartas solares, com um nível de incerteza menor que 10%.

## **REFERENCIAS**

- BARBOSA, Rúben A. G. Efeitos do Vento Sobre Painéis Fotovoltaicos Aplicados Em Coberturas de Edifícios - Martifer Solar - Dissertação de Mestrado, FEUP-Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2013
- CAMPOS, M. S; ALCANTARA, L. D. S; Programa pra o Calculo da Variação da direção de incidencia dos Raios Solares ao longo do ano, XLI Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia, Gramado, RS, 2013
- CHRISTIANSEN, Craig B; BARKER, Greg M; Effects of tilt and azimuth on annual incidente solar radiation for United States locations, Proceedings of Solar Forum 2001, Washington, DC
- DUMAN, S. K; Effect of Tilt angle and Azimuth angle on Solar Output and optimum Tilt and Azimuth angle for Chandigarh, India, Intern. Jour. of adv. Resr. in Electrical Electronics and Instrumentation Engineering, v. 4 n. 5, 2015
- ECA -Guide to the Installation of Photovoltaic Systems, Microgeneration Certification Scheme ('MCS'), Website [www.eca.co.uk](http://www.eca.co.uk) © 2012
- FRONIUS; Efficient East-West oriented PV Systems with one MPP Tracker, Technical Report 2011
- GULIN, M; VASAK, Mario; PERIC, Nedjeljko; Dynamical optimal positioning of a photovoltaic panel in all weather conditions, Applied Energy, June 7,2013
- ISE - Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, How fast does an MPP Tracker really need to be, 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Germany, 2009
- LORENZO, E, Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems, POGENSA, 1994 Seville Espanha
- NREL - Renewable Resource Data Centre -NREL, Shining On, [www.nrel.gov](http://www.nrel.gov)
- THOMAS, Michael; RICHARD, Joseph; Astronomical Refraction, Johns Hopkins Apl. Technical Digest, V. 17, n.3, 1996
- WILLMOTT, C. J; On the climatic optimization of the tilt and azimuth of flat-plate solar collectors. Solar Energy, Vol. 28, pp. 205–216. 1982.
- YAMADA, N; OKOMOTO, K; IJIRO, T; Feasibility study of harvesting diffuse solar radiation in a high concentration CPV module for better solar energy conversion, Proceedings of the 23<sup>rd</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference, Taiwan, 2013