



Análise do Rendimento de um Módulo Fotovoltaico com Suporte de Inclinação Variável

Régis Ferronato, Tiago Cassol Severo

Campus Universitário da Região dos Vinhedos (CARVI)

Universidade de Caxias do Sul (UCS)

(ferronato.regis@gmail.com, tcsevero@ucs.br)

Resumo

Este trabalho apresenta as estimativas e medições da radiação solar incidente em um módulo fotovoltaico para ângulos referentes aos solstícios e equinócios, como também o desenvolvimento de um suporte com ângulo de inclinação variável para módulos fotovoltaicos sem a utilização de energia elétrica. O objetivo deste trabalho foi estudar e analisar o rendimento na captação da radiação solar, através de um suporte que possibilite a variação da inclinação do painel fotovoltaico com as estações do ano. Para o desenvolvimento do sistema foram efetuadas comparações de medidas de radiação solar entre um suporte de inclinação variável frente a um sistema fixo utilizando dados teóricos. Um projeto de protótipo de suporte com ângulo de inclinação variável para um painel fotovoltaico foi desenvolvido, possibilitando regular sua inclinação, em relação à horizontal, para que o módulo fique perpendicular à incidência do feixe de radiação solar.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica. Suporte de Inclinação Variável. Radiação Solar

Área Temática: Energia e Energia Renováveis

Analysis of the Efficiency of a Photovoltaic Module with Variable Tilt Support

Abstract

This work presents the estimates and measurements for solar radiation incident on a photovoltaic module for inclination angles related to solstices and equinoxes, as well as the development of a support with variable inclination angle for photovoltaic modules without the use of electric energy. The objective of this work was the study and analyzes of the yield capture of the solar radiation, through a support that allows the variation of the inclination of the photovoltaic panel with the seasons of the year. For the development of the system, comparisons of solar radiation measurements between a variable slope structures versus a fixed system were carried out using theoretical data. A prototype project of variable angle tilt support for a photovoltaic panel has been developed, making it possible to regulate its inclination, in relation to horizontal, so that the module is perpendicular to the incidence of the solar radiation beam.

Key words: Photovoltaic Solar Energy. Variable Tilt Support. Solar Radiation.

Theme Area: Energy and Renewable Energy



1 Introdução

Segundo CRESESB (2014), o Brasil possui um elevado índice de incidência solar sobre seu território, no entanto é aproveitado muito pouco desse potencial. A tecnologia FV possui um histórico de altos e baixos no Brasil, apesar de existirem diversos laboratórios de pesquisa espalhados pelo seu território, ainda existe a deficiência de políticas públicas de incentivo ao setor.

Peraza (2013) afirma que a intensidade de radiação solar que incide sobre uma célula solar influencia na sua eficiência. Então os módulos devem estar instalados de forma a maximizar a incidência solar sobre eles.

Para obter uma maior eficiência na captação solar fotovoltaica, Oliveira (2008), afirma que seguidores solares são uma alternativa para aumento de captação de energia solar, já que ao longo do dia os painéis mantêm-se perpendiculares à incidência de luz, aumentando a eficiência do sistema. No entanto, esses sistemas necessitam consumir parte da energia captada para seu funcionamento, pois utilizam sistemas eletrônicos em conjunto de motores elétricos para alterar a posição dos módulos solares.

Assim sendo, este trabalho apresenta uma alternativa para aumentar a eficiência de captação da energia durante as estações do ano, variando o ângulo de inclinação do módulo fotovoltaico, sem a utilização de energia elétrica, permitindo que essa variação possa ser efetuada manualmente ao longo do ano.

2 O Sol

Segundo Kalogirou (2014), o Sol funciona similar a um reator de fusão nuclear, onde transforma moléculas de hidrogênio em hélio, e emite em todas as direções uma energia correspondente a $3,8 \times 10^{20}$ MW, porém o planeta Terra recebe uma pequena parte dessa radiação, o que corresponde a $1,7 \times 10^{14}$ MW. Por estimativa acredita-se que uma incidência solar de 84 minutos sobre nosso planeta é equivalente a uma energia próxima a 900×10^{18} J.

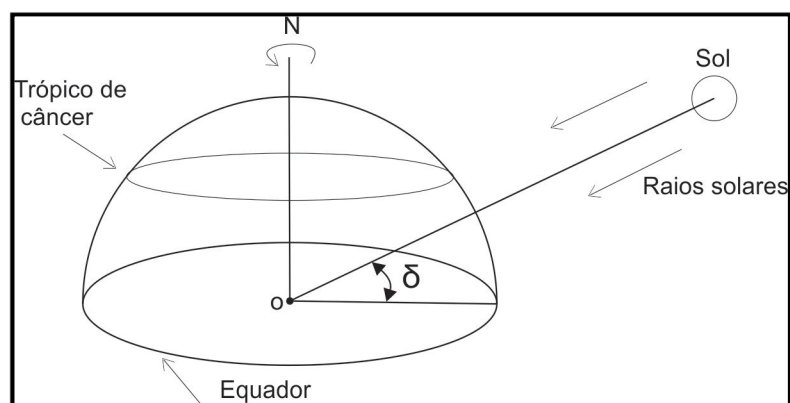
3 Incidência Solar Sobre Superfícies na Terra

Para Iqbal (1983) é necessário conhecer a relação de ângulos formados entre a posição aparente do Sol no céu e as coordenadas na superfície terrestre. Um eixo importante a ressaltar é a posição do zênite local, em que depende da posição do observador. Trata-se de um eixo normal ao plano horizontal do observador e que passa pelo centro da Terra, onde acima dele se chama zênite e no sentido inverso nadir.

Kalogirou (2014), diz que a declinação é um ângulo importante para o estudo da incidência solar, e é o ângulo formado pelo feixe solar e a linha do equador conforme figura 1, onde o solstício de verão descreve um ângulo de $23,45^\circ$ de declinação (δ) para o hemisfério norte e $-23,45^\circ$ para o sul, porém os sinais se invertem para o solstício de inverno no hemisfério norte. Nos equinócios de outono/primavera o ângulo de declinação (δ) é 0° .



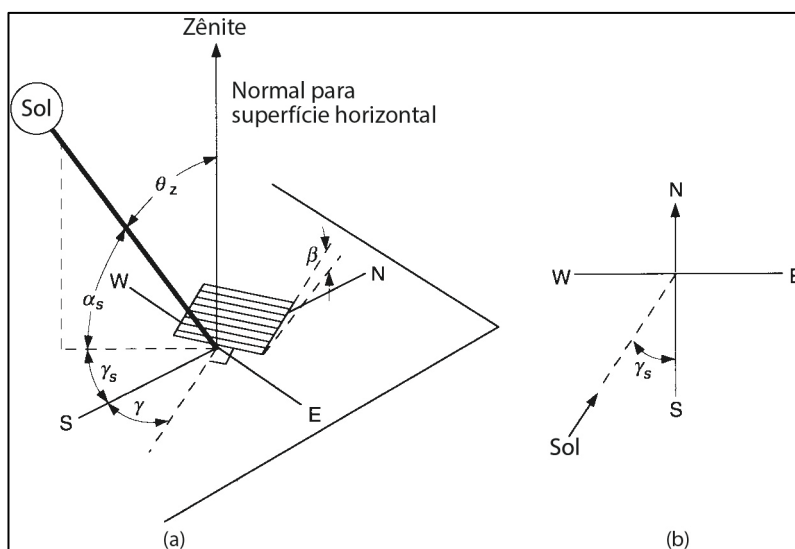
Figura 1 - Ângulo de Declinação



Fonte: Adaptado de Kalogirou (2014)

Duffie e Beckman (2013) definem que para uma compreensão sobre posicionamento solar em relação à Terra a qualquer momento, é necessário conhecer algumas relações trigonométricas que podem ser vistas na figura 2:

Figura 2 - Relação de Ângulos Entre o Feixe de Radiação e a Terra



Fonte: Adaptado de Duffie e Beckman (2013)

- A latitude (φ), que a partir do equador define a localização angular norte-sul. Variando de 90° até -90° , sendo norte positivo.
- O ângulo de zênite (θ_z), que é o ângulo formado pelo feixe de radiação solar incidente sobre uma superfície com a vertical (zênite local).

$$\cos \theta_z = \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \varphi \cdot \sin \delta$$

- O ângulo horário (ω), é a variação do ângulo do sol devido à rotação da Terra, varia 15° por hora de leste a oeste, sendo negativo pela manhã e positivo à tarde.



- O ângulo de azimute de superfície (Υ), que é o desvio da projeção num plano horizontal, normal à superfície do meridiano local, varia de -180° a 180° , sendo leste negativo e sul igual a 0° .
- A altitude solar (α_s) é o ângulo entre a horizontal e a linha para o sol.

$$\alpha_s = 90 - \theta_z$$

- O azimute solar (Υ_s) é o ângulo formado a partir da projeção do feixe de radiação solar no plano horizontal com o eixo norte-sul, variando de leste negativo a oeste positivo.

Algumas funções dependem diretamente da época do ano, como a variação de distância entre Terra e Sol durante o ano, a equação do tempo e o valor do ângulo de declinação (que pode variar até $0,4^\circ$ por dia) e pode ser calculada através da equação abaixo.

$$\delta = (180/\pi)(0,006918 - 0,399912 \cos B + 0,070257 \sin B - 0,006758 \cos 2B + 0,000907 \sin 2B - 0,002697 \cos 3B + 0,00148 \sin 3B)$$

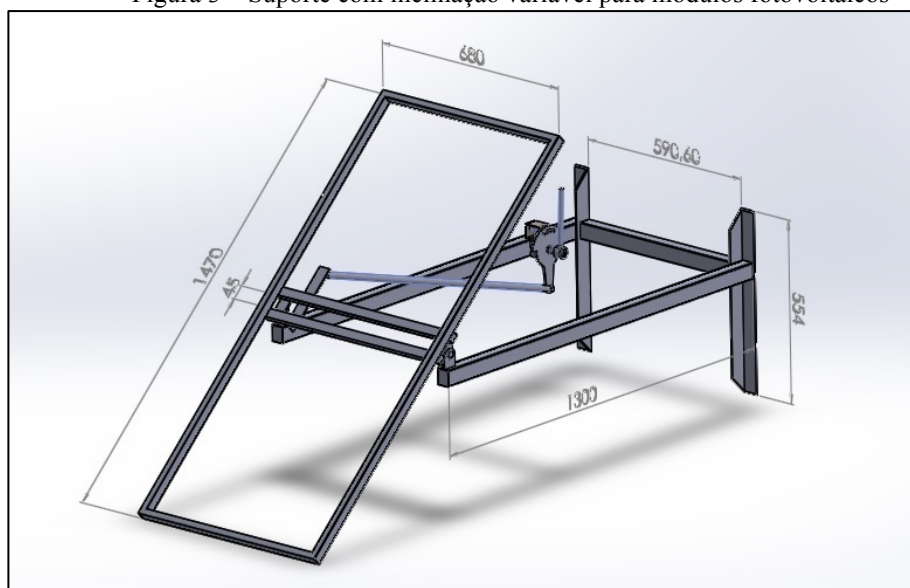
Onde B é encontrado pela equação abaixo, e n representa o dia do ano, que varia de 1 a 365.

$$B = (n - 1) \cdot \frac{360}{365}$$

3 Elaboração do Protótipo

O protótipo de suporte para painel fotovoltaico foi desenvolvido para que o ângulo de inclinação possa ser alterado conforme as estações do ano de forma manual, o desenvolvimento do projeto original possibilita a regulagem para três ângulos diferentes, referentes a equinócios e solstícios e pode ser visto em Ferronato (2017), abaixo segue a figura 3, na qual mostra o projeto do protótipo desenhado através de software paramétrico.

Figura 3 – Suporte com inclinação variável para módulos fotovoltaicos



Fonte: Adaptado de Ferronato (2017).



4 Definindo os Ângulos de Medição

Segundo CRESESB (2014), para a máxima geração de energia durante o período de um ano, recomenda-se a utilização do ângulo de inclinação do painel fotovoltaico igual ao valor da latitude local. Porém, neste trabalho, a proposta é aumentar a geração de energia ao se utilizar ângulos ideais para solstícios e equinócios. Assim, a partir do valor de declinação calculado para a latitude de 29,17° Sul, foram encontrados os seguintes ângulos de inclinação para o módulo fotovoltaico, conforme tabela 1.

Tabela 1 - Inclinação para Bento Gonçalves (graus) do zênite local.

Estação	Ângulo de Inclinação (β)	Duração
Solstício de verão	5,03°	21 de dezembro a 20 de março
Equinócio de outono	28,38°	20 de março a 21 de junho
Solstício de inverno	54,11°	21 de junho a 22 de setembro
Equinócio da primavera	29,28°	22 de setembro a 21 de dezembro
Média para os equinócios	28,83°	-

Fonte: Adaptado de Ferronato (2017).

Para o solstício de verão, foi encontrado um valor de 5,03° de inclinação do painel solar, no entanto, será utilizado o valor de 10°, pois é o valor mínimo necessário para evitar acúmulo excessivo de poeira sobre o painel solar, conforme recomendações do CRESESB (2014). Para os equinócios, foram encontrados valores de inclinação similares, portanto, se aplicou média aritmética simples entre os dois valores, resultando no valor de 28,83°, na qual foi arredondado para 29°.

Para efetuar a comparação teórica entre os novos ângulos calculados e o ângulo fixo utilizado na maioria das instalações fotovoltaicas, utilizou-se de dados retirados do software Radiasol, conforme tabela 2. Esta tabela apresenta o ganho energético teórico para a latitude local, para os equinócios e também para ambos os solstícios.

Tabela 2 - Radiação Solar Segundo Mapas do Software Radiasol em kWh/m²/dia

Mês	Latitude local (39°)	Equinócios Primavera/Outono (29°)	Solstício De Verão (10°)	Solstício De Inverno (54°)
Janeiro	4,67	5,00	5,26	4,10
Fevereiro	5,57	5,84	5,90	4,89
Março	5,24	5,30	5,08	4,91
Abril	5,06	4,99	4,48	4,95
Mai	4,29	4,13	3,49	4,35
Junho	3,81	3,58	2,97	3,95
Julho	4,27	4,09	3,39	4,44
Agosto	4,31	4,18	3,70	4,38
Setembro	5,07	5,08	4,71	4,81
Outubro	5,43	5,60	5,58	4,90
Novembro	5,50	5,90	6,17	4,70
Dezembro	5,29	5,82	6,26	4,60

Fonte: Adaptado de Ferronato (2017).

Para obter os dados do Radiasol, foram utilizados os seguintes parâmetros:

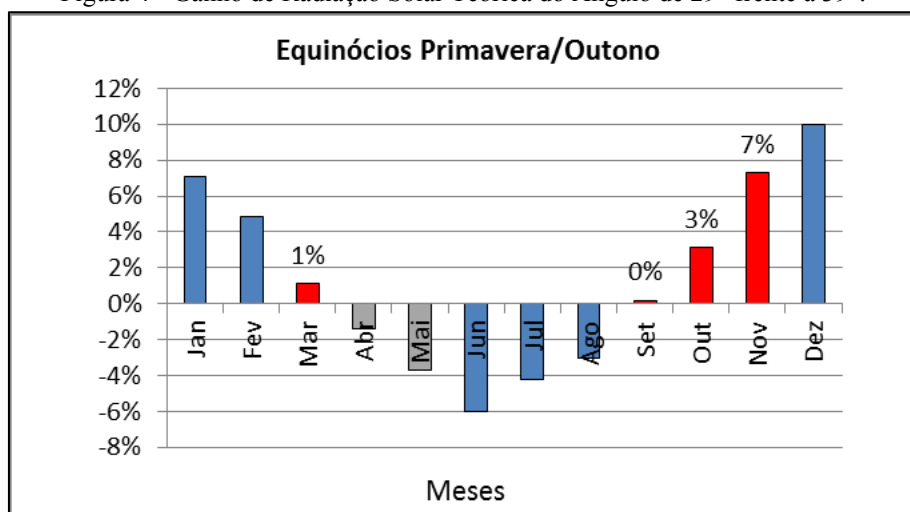
- Cidade: Bento Gonçalves, RS.



- Latitude: 29° 10' 26" S;
- Longitude: 51° 31' 7" W.
- Inclinação do módulo nos ângulos: 39°, 29°, 10° e 54°.
- Origem dos dados: Mapas (Swera).

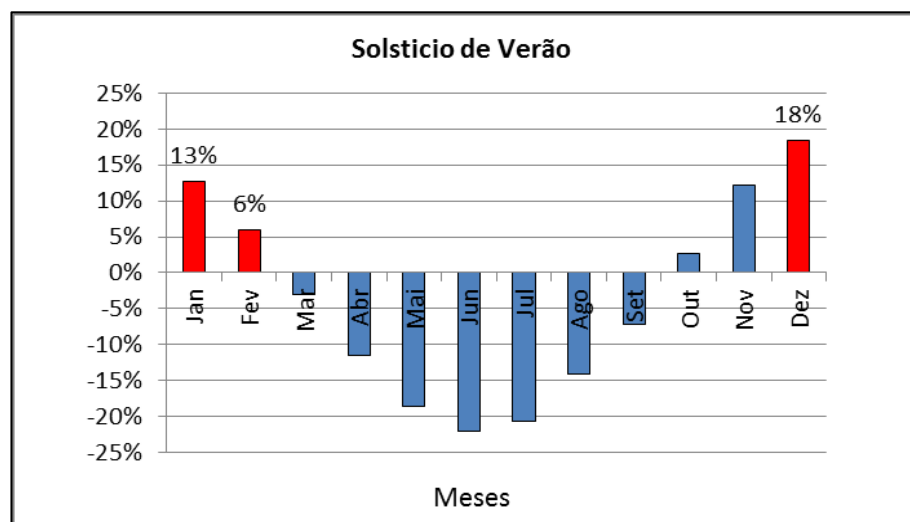
Após retirar os dados do software Radiasol, foram efetuados cálculos comparativos entre o ângulo fixo de 39° e os novos valores de inclinação propostos neste trabalho. Foram utilizados cálculos de porcentagem para demonstrar o ganho dos ângulos variáveis sobre o ângulo fixo de inclinação do módulo FV, demonstrando o ganho que se pode obter inclinando o módulo solar perpendicular à incidência solar. Nas figuras 4, 5 e 6, podem ser observados os dados comparativos de ganho na captação da radiação solar.

Figura 4 - Ganho de Radiação Solar Teórica do Ângulo de 29° frente a 39°.



Fonte: Adaptado de Ferronato (2017).

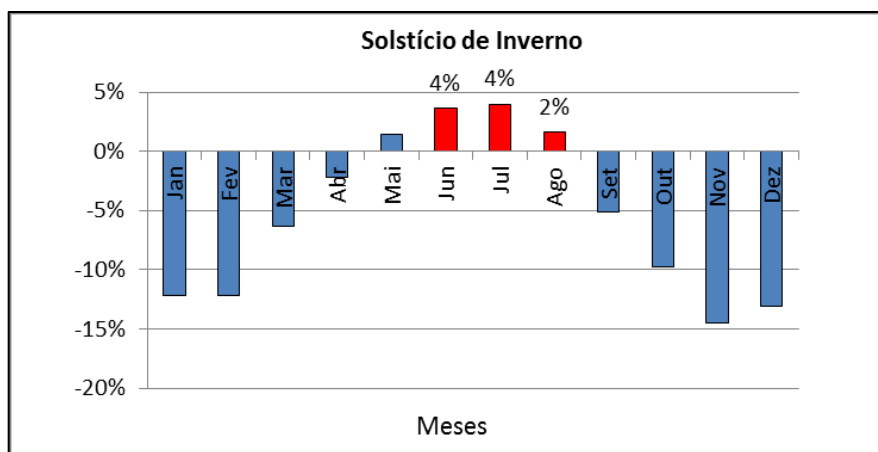
Figura 5 - Ganho de Radiação Solar Teórica do Ângulo de 10° frente a 39°.



Fonte: Adaptado de Ferronato (2017).



Figura 6 - Ganho de Radiação Solar Teórica do Ângulo de 54° frente a 39°.



Fonte: Adaptado de Ferronato (2017).

A comparação efetuada entre o ângulo de 29° frente ao de 39°, para os meses referentes ao equinócio de outono (período de setembro, outubro e novembro), os resultados da captação da radiação solar se mostraram inferiores ao ângulo de 39°, perdendo eficiência em até 6%. Nos meses referentes ao equinócio de primavera (período de março, abril e maio), o novo ângulo proposto demonstrou um ganho de até 7 % em comparação ao de 39°.

Ao se comparar o ângulo de 10° frente ao de 39°, para os meses referentes ao solstício de verão (período de dezembro, janeiro e fevereiro), houve um aumento na captação da radiação solar de até 18% a mais do que no ângulo de 39°.

Ao se analisar o ângulo de 54° frente ao de 39°, o cálculo teórico mostrou que houve um aumento de captação solar que chegou até 4% e um dos meses referentes ao solstício de inverno (período de junho, julho e agosto).

5 Conclusões

As informações adquiridas através do software Radiasol, demonstram que ao se posicionar o módulo FV perpendicular à incidência dos raios solares, a captação solar fotovoltaica aumenta consideravelmente, chegando a um aumento teórico de até 18% no solstício de verão.

Através do comparativo de valores de radiação entre os ângulos, ficou evidenciado que os ângulos de inclinação propostos para solstícios e equinócios demonstraram aumento na captação de radiação solar, onde o ângulo proposto para o solstício de verão obteve maior captação que o ângulo da latitude local nos meses de novembro, dezembro, janeiro e fevereiro. O ângulo proposto para o solstício de inverno obteve maior captação para os meses de maio, junho, julho e agosto. Para o ângulo encontrado para os equinócios, os meses que se obteve melhor captação são março, outubro e novembro, onde nos meses de abril, maio e setembro ficaram equivalentes aos valores obtidos para a latitude local. Os ângulos de inclinação recomendados para o aumento de eficiência de captação de energia solar em módulos fotovoltaicos é de 10° para o verão, 29° para primavera e outono e 54° para o período de inverno na cidade de Bento Gonçalves, localizada no estado do Rio Grande do Sul.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem a UCS por toda a estrutura de medição cedida para este projeto.



Referências

CRESESB, Grupo de Trabalho de Energia Solar. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: 2014.

Duffie, John A.; Beckman, Willian A. **Solar Engineering of Thermal processes**. 4º ed. New Jersey: EUA: Wiley, 2013.

Ferronato, Régis. **Análise do Rendimento de um Módulo Fotovoltaico com Suporte de Inclinação Variável**. Bento Gonçalves, 2017. Trabalho submetido para a Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica, na Universidade de Caxias do Sul, para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Iqbal, Muhammad. **An Introduction to Solar Radiation**. New York: USA: Academic Press, 1983.

Kalogirou, S. A. **Solar Energy Engineering: processes and systems**. 2ª ed. San Diego: USA: Elsevier, 2014.

Oliveira, Maurício M. **Análise do Desempenho de um Gerador Fotovoltaico com Seguidor Solar Azimutal**. Porto Alegre, 2008. Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-graduação e Engenharia Mecânica, PROMEC, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Peraza, Danielle Goulart. **Estudo de Viabilidade da Instalação de Usinas Solares Fotovoltaicas no Estado do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, 2013. Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Software Radiasol 2 – UFRGS. Disponível em: <http://www.solar.ufrgs.br/>. Acesso em: 10 jul. 2017.