

OTIMIZAÇÃO DA INCLINAÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS EM FUNÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR INCIDENTE NA REGIÃO DE PELOTAS, RS

Clênio Renê Kurz Böhmer – bohmer@cefetrs.tche.br
Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas, Curso Técnico de Eletrotécnica
Simone Vieira de Assis – assis@ufpel.edu.br
Universidade Federal de Pelotas, Departamento de Meteorologia

1.1. Radiação Solar

Resumo. *A radiação solar é, sem dúvida, a principal fonte de energia para o nosso planeta, entretanto seu aproveitamento para a conversão direta em energia elétrica ainda é bastante limitado. Esta limitação se deve, em parte, ao custo de instalação. Além disso, o processo de fotoconversão não consegue aproveitar toda a energia solar incidente no módulo. Pesquisadores concordam que a energia gerada é influenciada pelo ângulo de inclinação com a horizontal. Assim, este trabalho tem por objetivo determinar a melhor inclinação de módulos fotovoltaicos, de acordo com as características e a disponibilidade da radiação solar na região de Pelotas, visando a diminuir custos e aproveitando melhor a energia solar. Foram calculados os melhores ângulos de inclinação mensal, sazonal e anual, assim como a quantidade de energia anual recebida pelo módulo com estes ângulos. Foi verificado o ganho na quantidade de energia recebida, à medida que diferentes inclinações eram comparadas entre si. Nestes cálculos, foi usado o modelo isotrópico, desenvolvido por Liu & Jordan (1963); a radiação solar difusa no plano horizontal foi obtida através do modelo de Collares-Perreira & Rabl (1979). Os resultados demonstraram que o melhor ângulo de inclinação mensal varia de 0°, no verão, a 59°, no inverno, e o melhor ângulo de inclinação sazonal varia de 0°, no verão, a 54° no inverno. A adoção do melhor ângulo mensal comparado ao sazonal propicia um ganho de 0,9 %. O melhor ângulo de inclinação anual é o de 26°. O melhor ângulo de inclinação mensal e sazonal apresentam ganhos na quantidade de energia recebida pelo módulo de 5,5% e 4,6% respectivamente, quando comparados ao melhor ângulo anual.*

Palavras-chave: Energia Solar, Fotovoltaico, Radiação Solar

1. INTRODUÇÃO

A geração fotovoltaica possui um grande potencial, entretanto o custo de instalação ainda é bastante elevado, além de que o processo de fotoconversão não consegue aproveitar toda a energia solar incidente no módulo. Para o Silício, somente a radiação solar com comprimento de onda aproximado entre 0,4 μm e 1,1 μm consegue excitar os elétrons, dando origem à corrente elétrica (Sayigh, 1977). Os fótons que não geram corrente elétrica produzem apenas calor, o que proporciona uma perda de aproximadamente 31%, no caso de usarmos o semicondutor Silício. Como cada célula fotovoltaica consegue converter apenas uma pequena parte da energia solar incidente em energia elétrica, é fundamental conhecer o comportamento da radiação solar no local da instalação dos módulos.

A cidade de Pelotas, por se localizar bem ao Sul do país, está sujeita a baixas temperaturas durante a estação fria, apresentando grande quantidade de dias nublados e parcialmente nublados durante todo o ano, o que é perfeitamente explicado pelas freqüentes incursões de sistemas meteorológicos tipo frentes frias, linhas de instabilidade, etc. O índice de limpidez atmosférica média mensal não apresenta níveis muito altos, com média anual em torno de 0,47, significando que

em 53% do ano os dias se apresentam nublados. Outra informação importante é que a radiação solar global apresenta valores bem definidos e diferenciados, variando entre 7,90 MJ.m⁻² e 11,00 MJ.m⁻² (inverno) e 17,55 MJ.m⁻² e 22,00 MJ.m⁻² (verão) (Marques et al, 2000; Sacco & Assis, 2003; Silveira et al, 2000).

Assim sendo, este trabalho visa a otimizar a inclinação de módulos fotovoltaicos, de acordo com as características e a disponibilidade da radiação solar na região de Pelotas, e de fornecer subsídios a pesquisadores e projetistas para a sua correta instalação, visando a diminuir custos e aproveitando melhor a energia solar disponível.

Foram calculados, com base nos dados de radiação solar global na horizontal, medidos na Estação Agroclimatológica de Pelotas, convênio EMBRAPA/UFPEL, durante 10 anos (1993-2002):

- O melhor ângulo de inclinação mensal, sazonal e anual para módulos fotovoltaicos localizados na região de Pelotas;
- A radiação solar global anual recebida pelo módulo fotovoltaico, à medida em que se adota o melhor ângulo de inclinação mensal, sazonal e anual;
- A radiação solar global anual recebida pelo módulo fotovoltaico, à medida em que se adota o ângulo de inclinação igual à latitude local;
- A radiação solar global anual recebida pelo módulo fotovoltaico na posição horizontal;
- O ganho na radiação solar global recebida pelo módulo fotovoltaico, à medida em que se comparam os valores de radiação solar global anual recebidos, com os diferentes ângulos de inclinação citados anteriormente.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados de radiação solar global diária no plano horizontal foram obtidos na Estação Agroclimatológica de Pelotas – Convênio EMBRAPA/UFPEL, localizada no município do Capão do Leão (Latitude: 31°52'00''S; Longitude: 52°21'24''W GRW; altitude: 13,24 m), e são relativos ao período de 1993 a 2002. A radiação solar global foi medida por piranômetro com sensor LI-COR (Lambda Instruments Corp.) modelo LI-200SB, com integrador LI-COR 510B, com constante de calibração 80μA/1000W.m⁻².

Para estimar a radiação global e a radiação difusa em um plano inclinado, voltado para o Norte Geográfico (ângulo azimutal $\gamma = 180^\circ$) são necessárias as seguintes definições:

2.1 Fator geométrico (R_b)

É a razão entre a radiação solar direta sobre uma superfície inclinada e a radiação solar direta sobre um plano horizontal. De acordo com o método desenvolvido por Liu e Jordan (1963) e citado por Duffie & Beckman (1980), para o hemisfério sul, deve ser aplicada a seguinte equação:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin \omega'_s + (\pi/180) \omega'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (\pi/180) \omega_s \sin \phi \sin \delta} \quad (1)$$

onde:

ϕ - latitude;

β - inclinação do módulo fotovoltaico em relação ao plano horizontal em graus;

δ - declinação solar;

ω_s - ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície horizontal;

ω'_s - ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície inclinada.

A declinação solar (δ), em graus, foi obtida através da seguinte equação:

$$\delta = 23,45^\circ \sin\left(\frac{284 + DJ}{365} 360^\circ\right) \quad (2)$$

onde:

DJ - dia Juliano é o dia do ano contado a partir de primeiro de janeiro: dia juliano número 1; até o dia trinta e um de dezembro: dia juliano número 365.

O Ângulo Horário do pôr-do-sol para a superfície horizontal (ω_s), em graus, foi obtido pela equação:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (3)$$

2.2 Ângulo horário do pôr-do-sol para a superfície inclinada (ω'_s)

É o ângulo horário do pôr-do-sol ajustado para a superfície inclinada. Segundo Duffie & Beckman (1980), para o hemisfério sul, foi calculado por:

$$\omega'_s = \min \left[\begin{array}{l} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \\ \arccos(-\tan (\phi + \beta) \tan \delta) \end{array} \right] \quad (4)$$

Sendo que min significa o mínimo valor calculado pelas duas equações acima, e os ângulos são medidos em graus.

2.3 Radiação solar global em uma superfície inclinada (H_β)

De acordo com o método desenvolvido por Liu e Jordan (1963) e aperfeiçoado por Klein (1977), o cálculo da radiação solar global em um plano inclinado, apresentado em Duffie & Beckman (1980), para o hemisfério sul, é resultante da equação:

$$H_\beta = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (5)$$

onde:

H - radiação solar global em uma superfície horizontal;

H_d - radiação solar difusa em uma superfície horizontal;

ρ - albedo.

Segundo Duffie & Beckman (1980), esta relação é válida para um período qualquer de tempo.

Assumiu-se que $\rho=0,25$, pois a maioria dos pesquisadores usa valores entre 0,20 e 0,25. Estes valores contemplam o índice de reflexão de um grande número de superfícies, conforme pode ser observado em Iqbal (1983). Sempre que possível, o ideal é usar-se o índice de reflexão medido para o local da instalação do módulo fotovoltaico.

2.4 Radiação extraterrestre (H_0)

É a radiação obtida no topo da atmosfera, isto é, incidente numa superfície horizontal fora da presença da atmosfera. De acordo com o desenvolvimento matemático apresentado em Vianello & Alves (2002), seu valor diário é calculado, em MJ.m^{-2} , pela seguinte expressão:

$$H_0 = \frac{24 \cdot 3600 \text{ CS}}{\pi} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360 \text{ DJ}}{365} \right) \right] \cdot \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \left(\frac{2 \pi \omega_s}{360} \sin \phi \sin \delta \right) \right] \quad (6)$$

onde:

CS - constante solar, em W.m^{-2} ;

Obs: Dados recentes da OMM (Organização Meteorológica Mundial) indicam um valor médio de 1367 W.m^{-2} para a Constante Solar.

Os ângulos são medidos em graus.

2.5 Índice de limpidez atmosférica (K_t)

É definido como sendo a relação entre a radiação solar incidente na superfície terrestre e a radiação solar no topo da atmosfera, de acordo com Duffie & Beckman (1980):

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (7)$$

2.6 Fator de radiação difusa (K_d)

A partir de uma série de dados experimentais, Collares-Perreira & Rabl (1979) propuseram a seguinte relação, a fim de estimar a contribuição da radiação solar difusa na radiação solar global incidente em um plano horizontal:

$$K_d = \frac{H_d}{H} \quad (8)$$

Para valores de radiação diária média mensal, a seguinte relação é válida:

$$K_d = 0,775 + 0,00653(\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455(\omega_s - 90)]\cos(115K_t - 103) \quad (9)$$

Os ângulos são medidos em graus.

2.7 Dia médio do mês

O dia médio do mês, conforme Klein (1977), torna mínimo o erro do valor que representa a radiação extraterrestre média mensal, principalmente nos meses de junho e dezembro. O dia médio do mês para cada mês do ano é apresentado na Tab. 1.

Tabela 1 – Dia médio do mês

mês	jan	fev	mar	abr	maio	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
dia	17	16	16	15	15	11	17	16	15	15	14	10

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Melhor ângulo de inclinação mensal

Para o cálculo, partiu-se de valores totais diários de radiação solar global, medidos por um período de 10 anos no plano horizontal. A seguir, foi calculada a média aritmética destes valores diários para cada mês. Assim, a radiação solar global no plano horizontal, em cada um dos meses do ano, passou a ser representada por um valor total diário médio. A partir deste valor, foi estimada a radiação solar difusa diária, média mensal. O dia médio do mês, conforme Tab. 1, foi a data utilizada nesta estimativa, bem como foi utilizado para calcular outros dados, tais como o ângulo horário do pôr-do-sol e a declinação solar. Para cada dia médio do mês, foi calculada a radiação solar global incidente no plano inclinado, fazendo-se variar o ângulo de inclinação de 0° a 90° , em intervalos de 1° . Foi considerado, nos cálculos, que o módulo está voltado para o Norte, isto é, com ângulo azimutal $\gamma = 180^\circ$. O melhor ângulo, conseqüentemente, é aquele que faz com que o módulo receba a maior quantidade de radiação solar global durante aquele dia. Assim, foi gerado um valor

de ângulo para cada mês do ano. No cálculo da média, não foi utilizado o dia 29 de fevereiro. O valor de radiação solar global, no plano inclinado para o dia médio do mês, foi multiplicado pelo número de dias do mês, a fim de se obter o total mensal, conforme Tab. 4. O melhor ângulo mensal é apresentado na Tab. 2.

Tabela 2 – Melhor ângulo de inclinação mensal para módulos fotovoltaicos na região de Pelotas

mês	jan	fev	mar	abr	maio	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
ângulo	0°	9°	24°	41°	54°	59°	56°	46°	30°	13°	0°	0°

Ibrahim, em 1995, usou dados de radiação solar global no plano horizontal, coletados na cidade de Guzelyurt ($\phi = 35,18^\circ \text{ N}$), ilha de Chipre e aplicou o modelo isotrópico de Liu & Jordan (1963), verificando que o melhor ângulo para junho é 10° e para dezembro é 52° . Considerando que a latitude de Pelotas ($\phi = 31,87^\circ \text{ S}$) não difere muito da latitude de Guzelyurt e considerando também a correspondência dos meses do Hemisfério Norte com o Hemisfério Sul, verificou-se que os resultados não diferem muito, pois para a região de Pelotas os melhores ângulos são: 59° em junho e 0° em dezembro.

3.2 Melhor ângulo de inclinação sazonal

Para o cálculo do melhor ângulo de inclinação sazonal o ano foi dividido em quatro períodos de três meses; verão: dezembro, janeiro e fevereiro; outono: março, abril e maio; inverno: junho, julho e agosto; primavera: setembro, outubro e novembro - em cada período, verificou-se qual ângulo de inclinação do módulo faz com que o mesmo receba mais radiação solar global, somando-se os totais mensais. O total mensal da radiação solar global, recebida no plano inclinado, obtida através do melhor ângulo de inclinação sazonal para módulos fotovoltaicos na região de Pelotas é apresentado da Tab. 4, e o melhor ângulo sazonal, na Tab. 3.

Tabela 3 – Melhor ângulo de inclinação sazonal para módulos fotovoltaicos na região de Pelotas

estação	verão	outono	inverno	primavera
ângulo	0°	40°	54°	13°

Compararam-se estes dados com os resultados obtidos por Ibrahim, em 1995, na cidade de Guzelyurt ($\phi = 35,18^\circ \text{ N}$), ilha de Chipre, observaram-se valores bastante semelhantes no outono e no inverno, 40° e 48° , respectivamente, e valores ligeiramente diferentes na primavera e verão, 22° e 14° , respectivamente.

3.3 Melhor ângulo de inclinação anual

O melhor ângulo de inclinação fixo para o ano é aquele que, somando-se os valores mensais de radiação, faz com que o módulo receba maior quantidade de energia. Assim, verificou-se que o ângulo de 26° faz com que o módulo receba mais energia durante o ano, comparado com outros valores de inclinação. O total mensal da radiação solar global recebida no plano inclinado, obtida através do melhor ângulo de inclinação anual para módulos fotovoltaicos na região de Pelotas é apresentado da Tab. 4.

Verificou-se que o melhor ângulo, para o ano, é ligeiramente inferior ao valor da latitude local, conforme obtido por outros pesquisadores, como Nijegorodov et al (1994), Ibrahim (1995), Oliveira (1997) e Yakup & Malik (2001).

3.4 Ângulo de inclinação anual igual à latitude

Para este cálculo, usou-se a inclinação do módulo fotovoltaico igual a 32°, valor aproximado da latitude do local da instalação do piranômetro que mediu os dados de radiação, base deste trabalho. O total anual da radiação solar global resultou da soma dos totais mensais, com o ângulo de 32°, obtidos pelo método desenvolvido por Liu & Jordan (1963). O total mensal da radiação solar global, recebida no plano inclinado, obtida através de 32° de ângulo de inclinação fixo anual para módulos fotovoltaicos na região de Pelotas, é apresentada na Tab. 4.

Tabela 4 – Total mensal da radiação solar global recebida no plano inclinado em MJ.m⁻².mês⁻¹, obtida através dos melhores ângulos de inclinação para módulos fotovoltaicos, na região de Pelotas.

mês	Radiação solar global MJ.m ⁻² .mês ⁻¹				
	ajuste mensal	ajuste sazonal	ajuste anual	ângulo 32°	ângulo zero
janeiro	640,62	640,62	602,17	584,55	640,62
fevereiro	513,44	509,73	499,60	488,33	509,73
março	525,03	512,02	524,90	521,93	493,54
abril	446,42	446,32	434,73	442,03	365,54
maio	427,13	417,48	388,71	403,30	291,13
junho	381,41	380,36	333,01	348,82	234,91
julho	367,09	366,92	329,02	342,54	241,72
agosto	412,63	410,02	393,52	403,04	318,34
setembro	425,64	412,81	424,86	425,51	386,78
outubro	483,08	483,08	475,63	467,18	475,47
novembro	606,37	597,47	571,25	553,55	606,37
dezembro	680,97	680,97	624,32	601,35	680,97
Total	5909,83	5857,81	5601,72	5582,11	5245,11

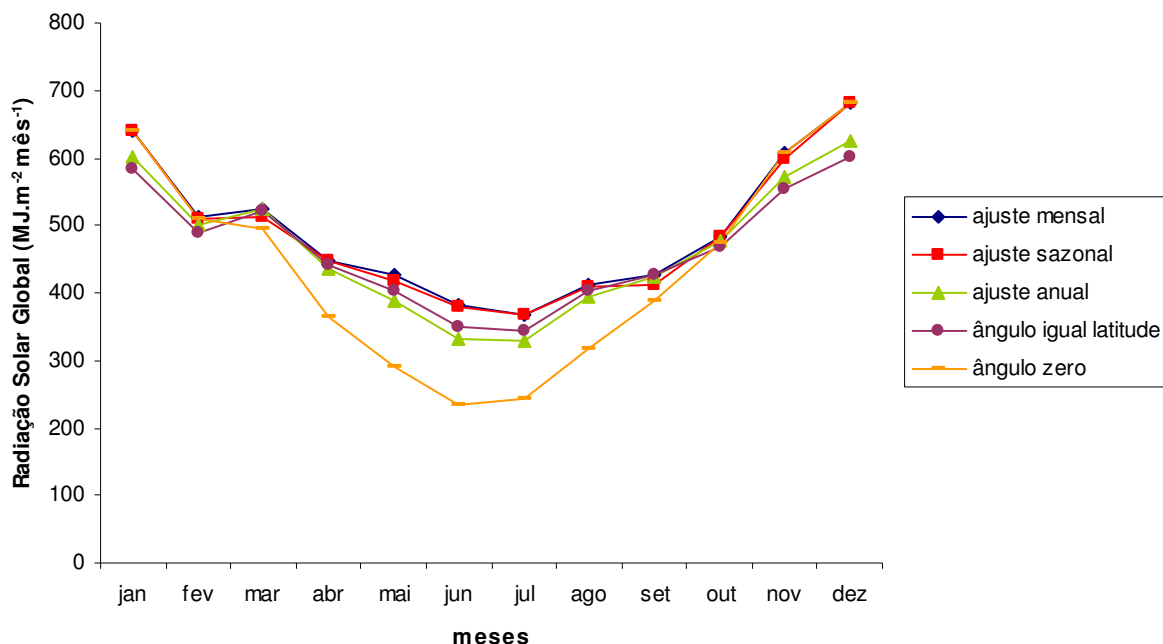


Figura 1 – Variação dos totais mensais da radiação solar global recebida pelo módulo posicionado nos melhores ângulos mensal, sazonal, anual, ângulo igual à latitude e com ângulo de inclinação zero.

Ganho na quantidade de radiação solar global recebida

Foram feitas comparações nas quantidades de radiação solar global recebidas pelo módulo fotovoltaico à medida que diferentes inclinações foram adotadas ao longo do ano, conforme apresentado na Fig. 1.

Melhor ângulo mensal

Comparando-se o ajuste mensal com os ajustes sazonal e anual, verificaram-se ganhos de 0,9% e 5,5 %, respectivamente.

Melhor ângulo sazonal

Ao se confrontar o melhor ângulo sazonal com o melhor ângulo anual, observou-se um ganho de 4,6 %.

Melhor ângulo anual

Comparando-se o melhor ângulo anual com o ângulo igual à latitude, verificou-se um ganho de 0,4%

4. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos, nos dados de radiação solar global medidos entre 1993 e 2002, na região de Pelotas; nos cálculos realizados e na análise dos resultados, chegou-se às seguintes conclusões:

- a) O melhor ângulo de inclinação mensal para módulos fotovoltaicos, na região de Pelotas, varia entre 0°, nos meses de novembro, dezembro e janeiro, e 59°, no mês de junho;
- b) Considerando-se o melhor ângulo de inclinação sazonal para módulos fotovoltaicos na mesma região, tem-se uma variação entre 0°, no verão (dezembro, janeiro e fevereiro), e 54°, no inverno (junho, julho e agosto);
- c) O melhor ângulo de inclinação anual para módulos fotovoltaicos é de 26°, valor ligeiramente inferior à latitude do local das medições;
- d) A diferença entre a radiação solar global anual, usando-se o melhor ângulo de inclinação mensal, comparada à radiação solar global anual, usando-se o melhor ângulo de inclinação sazonal, é de 0,9%, podendo-se usar, portanto, o ajuste sazonal do ângulo de inclinação, sem grandes prejuízos na quantidade de energia solar recebida pelo módulo;
- e) Quando dificuldades de acesso ao módulo impedem ajustes constantes no ângulo de inclinação, o melhor ângulo anual se torna uma alternativa bastante viável, já que o melhor ângulo mensal e sazonal proporcionam ganhos de 5,5% e 4,6%, respectivamente, na quantidade de radiação solar global recebida pelo módulo, não implicando grandes perdas de energia;
- f) O ajuste do ângulo de inclinação no valor igual à latitude local pode ser também usado quando os dados da radiação solar são desconhecidos e não se pode fazer ajustes por dificuldade de acesso ao módulo, já que a perda em relação ao melhor ângulo anual é de 0,4 %.

REFERÊNCIAS

- Collares-Pereira, M.; Rabl, A. 1979. The average distribution of solar radiation correlations between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*, vol. 22, pp. 155 – 164.
- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., 1980, *Solar Engineering of Thermal Processes*, John Wiley & Sons.

- Ibrahim, D. 1995. Optimum tilt angle for solar collectors used in Cyprus, Renewable Energy, vol. 6, pp. 813 - 819.
- Iqbal, M., 1983, An Introduction to Solar Radiation. New York: Academic Press.
- Klein, S. A. 1977. Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces. Solar Energy, vol. 19, pp. 325 - 329.
- Liu, B. Y. H.; Jordan, R. C. 1963. The long-term average performance of flat-plate solar-energy collectors. Solar Energy, vol. 7, pp. 53 - 74.
- Marques, K. et al 2000. Análise do comportamento mensal do índice de limpidez. In: XI Congresso Brasileiro de Meteorologia. Anais... Rio de Janeiro, RJ: UERJ.
- Nijegorodov, N. et al, 1994, Atmospheric transmittance models and an analytical method to predict the optimum slope of an absorber plate, variously oriented at any latitude. Renewable Energy, vol. 4, pp. 529 - 543.
- Oliveira, S. H. F., 1997, Dimensionamento de sistemas fotovoltaicos autônomos: Ênfase na eletrificação de residências de baixo consumo., Dissertação (Mestrado em Energia – Energia Solar Fotovoltaica) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, USP, São Paulo.
- Sacco, F.G. ; Assis, S. V. 2003. Avaliação da cobertura do céu usando distribuição de frequência. In: XIII Congresso Iniciação Científica. Anais... Pelotas, RS: UCPEL.
- Sacco, F.G. ; Assis, S. V. 2003. Potencialidade da insolação para a cidade de Pelotas. In: XII Congresso Iniciação Científica. Anais... Pelotas, RS: UFPEL.
- Sayigh, A. A. M. 1977. Solar energy engineering. New York: Academic Press.
- Silveira, V. P. et al 2000. Distribuição dos valores médios anuais da radiação solar global para a cidade de Pelotas/RS. In: XI Congresso Brasileiro De Meteorologia. Anais... Rio de Janeiro, RJ: UERJ.
- Vianello, R. L.; Alves, A. R., 2002, Meteorologia básica e aplicações. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, Imprensa Universitária.
- Yakup, M. A. H. M.; Malik, A. Q. 2001. Optimum tilt angle and orientation for solar collector in Brunei Darussalam. Renewable Energy, vol. 24, pp. 223 - 234.

OPTIMIZATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES INCLINATION IN FUNCTION OF THE INCIDENT SOLAR RADIATION IN PELOTAS REGION, RS

Abstract. *The solar radiation is, undoubtedly, the main source of energy for our planet, however its use for the direct conversion in electric energy is still quite limited. This limitation is due, in part, to the installation cost. Besides, the photoconversion process does not succeed in utilizing all the incident solar energy in the module. Researchers agree that the generated energy is influenced by the inclination angle with the horizontal one. Thus, this work seeks to determine the best inclination of photovoltaic modules in agreement with the characteristics and the readiness of the solar radiation in Pelotas region, seeking searching for decreasing costs and taking advantage of the best solar energy. The best angles of monthly, seasonal and annual inclination were calculated, as well as the amount of annual energy received by the module with these angles. The gain was verified in the amount of received energy as different inclinations were compared to each other. In these calculations, the isotropic model developed by Liu & Jordan (1963) was used; the diffuse solar radiation in the horizontal plan was obtained by the model of Collares-Perreira & Rabl (1979). The results demonstrated that the best angle of monthly inclination varies from 0°, in the summer, to 59°, in the winter, and the best angle of seasonal inclination varies from 0°, in the summer, to 54° in the winter. The adoption of the best monthly angle compared to the seasonal propitiates a gain of 0,9%. The best angle of annual inclination is 26°. The best angle of monthly and seasonal inclination present a gain in the amount of energy received respectively by the module of 5,5% and 4,6%, when compared to the best annual angle.*

Key words: Solar Energy, Photovoltaic, Solar Radiation