

EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MEDIDO NO NORDESTE DO BRASIL

Ricardo Cesar de Andrade – ricardo26andrade@hotmail.com

Chigueru Tiba – tiba@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Naum Fraidenraich – nf@ufpe.br

Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Energia Nuclear

Resumo. A irradiância solar extraterrestre total é atenuada pela atmosfera em diferentes proporções, dependendo principalmente do ângulo solar zenital e altitude do ponto de medição. Neste trabalho, valores muito altos e extremos da irradiância solar total medido na superfície são apresentados, que em alguns dias, ultrapassaram a Constante Solar Corrigida para a distância Terra-Sol (CSC). Este artigo relata as medições de irradiância solar global magnificadas pelas nuvens, feitas na cidade de Recife, Brazil, para o período de Fevereiro de 2008 - Fevereiro de 2009. Valores de Irradiação Total Solar Extrema acima da CSC foram medidos durante 7,4% dos dias totais que foram registrados neste período. Mais comumente, valores muito altos da irradiância solar total foram observados: 15% acima da condição de céu claro. O intervalo angular do fenômeno de amplificação, para a condição de céu claro ou acima da extraterrestre estão compreendidos entre -45 à -15 graus para o período da manhã e de 30 a 45 graus para o período da tarde

Palavras-chave: Irradiância Solar Total, Valores Extremos, Efeito Lente Provocado Pelas Nuvens, Brasil, Recife

1. INTRODUÇÃO

A radiação solar na superfície terrestre é função de muitas variáveis como, o ângulo solar zenital, a altitude em relação ao nível do mar, o ozônio total, a coluna atmosférica de aerossóis, o albedo superficial, entre outros (Kirchhoff, 2000). Além destas, temos as nuvens: um conjunto visível de partículas minúsculas de água líquida ou de gelo, ou de ambas ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera. Este conjunto pode também conter partículas procedentes de vapores industriais, fumaças ou poeiras. Os principais fatores que intervêm na descrição do aspecto de uma nuvem são suas dimensões, sua forma, sua estrutura e sua textura, assim como sua iluminância e cor. As nuvens são o principal atenuador da irradiação solar. São elas que tornam a irradiação solar de caráter estocástico. Trabalhos realizados por Piacentini et al. (2011) mostraram que em condições especiais, o tipo, a densidade e as coberturas de nuvens (entre 50% a 90% do céu) juntamente com regiões de céu claro, resultam em aumento da radiação solar acima das condições previstas para céu claro.

O objetivo do presente trabalho é mostrar percentual de ocorrência da irradiância solar que ultrapassou a condição de céu claro e/ou extraterrestre, assim como o intervalo do ângulo de ocorrência do fenômeno.

2. MODELO DE CÉU CLARO

Modelagem de irradiância solar espectral são necessários em muitas aplicações, tais como ciências atmosféricas, biologia, física médica e tecnologias energéticas (sistemas fotovoltaicos, iluminação natural, sistemas para aquecimento de água e ar, dentre outros). Destacam-se, dois tipos de modelagem da irradiância solar espectral: códigos computacionais detalhados e sofisticados, e modelos paramétricos simples (Gueymard, 1993). O primeiro tipo considera a atmosfera constituída de diferentes camadas, e usa medidas do perfil vertical de gases e aerossóis constituintes. Este código requer entradas de dados detalhadas; além disso, o tempo de execução e algumas limitações de entrada o tornam um instrumento não apropriado para certas aplicações, particularmente em engenharia (Anderson, 1993). Já o segundo tipo são modelos de parametrização simples e adequação com dados meteorológicos disponíveis (Bird, 1986). O ESRA (European Solar Radiation Atlas) é um exemplo bem conhecido do segundo tipo, criado há mais de 27 anos atrás (Kasten, 1984), foi atualizado em 1994 para o Novo Atlas Solar Europeu (Scharmer, 1994). O ESRA é um algoritmo baseado em um modelo simples que utiliza os seguintes parâmetros de entrada para a estimação da irradiância solar no plano horizontal: longitude, latitude, altitude, constante solar, ângulo zenital e fator de turbidez Linke. Este modelo é inteiramente baseado em expressões algébricas (ESRA, 1994), que estão descritos mais detalhadamente abaixo:

2.1 Irradiância solar no plano horizontal

A irradiância solar direta recebida por uma superfície horizontal para um dia de céu claro é dado por

$$I_{cs} = I_0 \varepsilon \exp[-0.8662mT_{LK}\delta_R(m)] \cos \zeta_s \quad (1)$$

onde I_0 é a constante solar, ε a excentricidade da órbita terrestre, T_{LK} é o fator de turbidez de Linke, $\delta_R(m)$ é a profundidade ótica de Kasten – Raleigh, m é a massa de ar e ζ_s é o ângulo zenital.

A massa de ar m , $\Delta\gamma_{ref}$, $\delta_R(m)$ e ε são expressas respectivamente por:

$$m = \left(1 - \frac{z}{10^4}\right) / \left[\sin \gamma_s^{true} + 0.50572(57.29578\gamma_s^{true} + 6.07995)^{-1.6364} \right] \text{ para } z < 4000 \text{ metros} \quad (2)$$

onde, z a altitude em relação ao nível do mar, γ_s^{true} e $\Delta\gamma_{ref}$ são:

$$\gamma_s^{true} = \gamma_s + \Delta\gamma_{ref} \quad (3)$$

$$\Delta\gamma_{ref} = 0.061359 \frac{0.1594 + 1,1203\gamma_s + 0.06565\gamma_s^2}{1 + 28.9344\gamma_s + 277.3971\gamma_s^2} \quad (4)$$

e γ_s é o ângulo de elevação solar.

A profundidade ótica de Kasten – Raleigh, $\delta_R(m)$ é dada por

$$\delta_R(m) = \begin{cases} 1 / (6.62960 + 1.75130m - 0.12020m^2 + 0.00650m^3 - 0.00013m^4) & \text{para } m \leq 20 \\ 1 / (10.4 + 0.718m) & \text{para } m > 20 \end{cases} \quad (5)$$

$$\varepsilon = 1 + 0.03344 \cos\left(\frac{2\pi j}{365.25}\right) \quad (6)$$

onde j é o dia juliano

A irradiância solar extraterrestre I_{ET} pode ser estimada a partir da seguinte expressão

$$I_{ET} = I_0 \varepsilon \cos \zeta_s \quad (7)$$

2.2 Irradiância solar difusa

A irradiância solar DIFUSA recebida numa superfície horizontal aos raios solares para um dia de céu claro é dado por

$$D_c = I_0 \varepsilon F_d(\gamma_s) Tn(T_{LK}) \quad (8)$$

Onde $F_d(\gamma_s)$ é chamada de função de elevação solar, pois depende apenas da elevação solar γ_s , $Tn(T_{LK})$ é chamada de função de transmissão difusa, a qual depende exclusivamente do fator de turbidez de Linke T_{LK} .

A função de elevação solar $F_d(\gamma_s)$, e a função de transmissão difusa $Tn(T_{LK})$, são expressas respectivamente por:

$$Tn(T_{LK}) = -0.015843 + 0.030543T_{LK} + 0.0003797T_{LK}^2 \quad (9)$$

$$F_d(\gamma_s) = A_0 + A_1 \sin \gamma_s + A_2 \sin^2 \gamma_s \quad (10)$$

onde, A_0 é expresso a partir da condição estabelecida pelo produto de A_0^* e $Tn(T_{LK})$

$$A_0^* = 0.26463 - 0.061581T_{LK} + 0.0031408T_{LK}^2 \quad (11)$$

Se $A_0^*Tn(T_{LK}) < 0.0022$, $A_0 = 0.0022/Tn(T_{LK})$

Se $A_0^*Tn(T_{LK}) \geq 0.0022$, $A_0 = A_0^*$

onde, A_1 e A_2 é dada por:

$$A_1 = 2.04020 + 0.018945T_{LK} - 0.011161T_{LK}^2 \quad (12)$$

$$A_2 = -1.3025 + 0.039231T_{LK} - 0.0085079T_{LK}^2 \quad (13)$$

2.3 Irradiância solar total para uma superfície horizontal

Na equação (14) podem ser vistas as partes constituintes da irradiância total, I_G , sendo a mesma a soma das irradiância direta, I_{cs} , com a irradiância difusa, D_c . Onde estas são os valores de saída obtidos através das simulações para um plano horizontal.

$$I_G = I_{cs} + D_c \quad (14)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Dados de entrada para ESRA

Os dados de entrada requeridos pelo modelo do ESRA para a estimativa da irradiância solar total em um plano horizontal na superfície terrestre em condição de céu claro são: latitude, longitude e altitude do local especificado, dia Juliano, hora solar e fator de Linke para massa de ar 2. O fator de Linke foi considerado 3,8 que corresponde aos dias mais límpidos para a localidade em estudo.

3.2 Irradiância solar total

As medidas da irradiância solar total foram obtidas através do piranômetro PSP da Eppley, localizado na Cidade de Recife - PE (longitude de $-34^{\circ}55'$ e latitude de $-8^{\circ}3'$), região do Nordeste do Brasil, Fig. 1. O Equipamento encontra-se instalado na UFPE (Universidade Federal de Pernambuco), o qual realiza uma medida a cada minuto de intervalo.



Figura 1 – Mapa de Pernambuco apresentando a localização de Recife.

As simulações computacionais para a obtenção da irradiância solar, utilizando o modelo do ESRA, foram comparadas com os dados experimentais do piranômetro PSP da Eppley. Essas simulações foram realizadas para as horas correspondentes ao intervalo de 06:00h às 18:00h para dias de céu claro e também para irradiância extraterrestre para o mês de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Intervalo de ocorrência da irradiância solar extrema

A partir do conjunto de dados medidos pelo PSP foram identificados os intervalos cujas irradiância ultrapassaram os valores estimados pelo ESRA para condições de céu-claro e/ou extraterrestre. Os dados estimados foram comparados com os dados medidos. A Fig. 2 apresenta um exemplo da simulação feita para o dia 345, mostrando a variação temporal da irradiância solar.

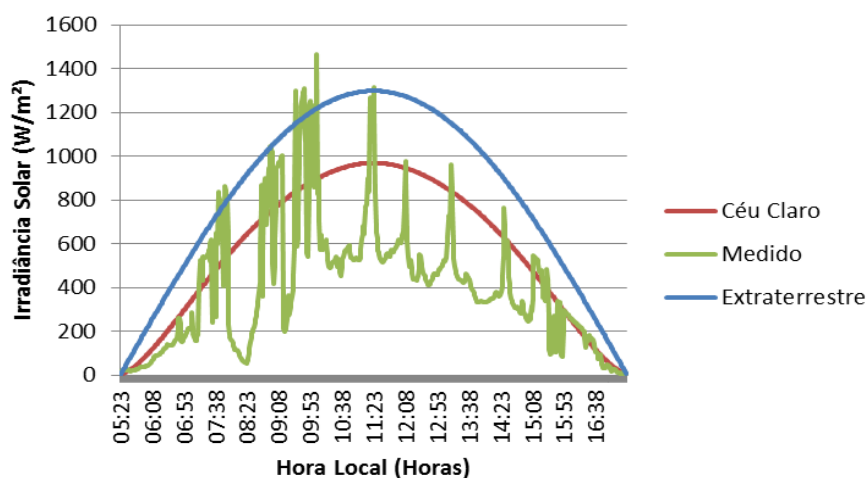


Figura 2 – Exemplo da variação temporal da irradiância solar ao longo do dia 345.

Na Fig. 3 pode ser visto, o gráfico das irradiâncias medidas pelo PSP da Eppley que ultrapassaram os valores estimados pelo modelo ESRA para a condição de céu claro com o fator de turbidez de Linke de 3,8. Na Fig. 4 podem ser observados as ocorrências das irradiâncias medidas pelo PSP que ultrapassaram os valores da irradiância extraterrestre. Para os dois casos mencionados foram considerados os valores de irradiância acima de 5% dos valores estimados pelo ESRA. Pois deve-se considerar a hipótese de que parte dos valores da irradiância que ultrapassa os valores estimados pelo modelo ESRA podem estar dentro da margem de erro do modelo.

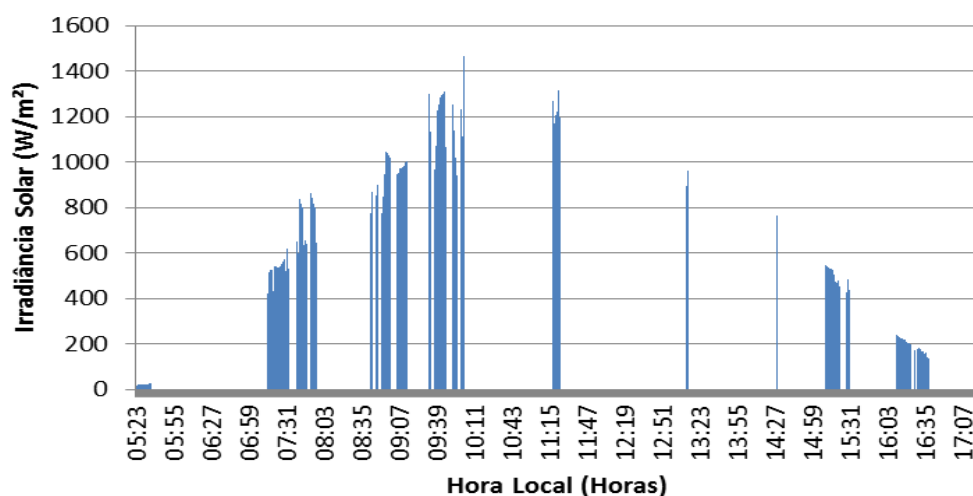


Figura 3 – Identificação dos intervalos com irradiância solar acima da irradiância solar estimada pelo ESRA para a condição de céu claro para o dia 345.

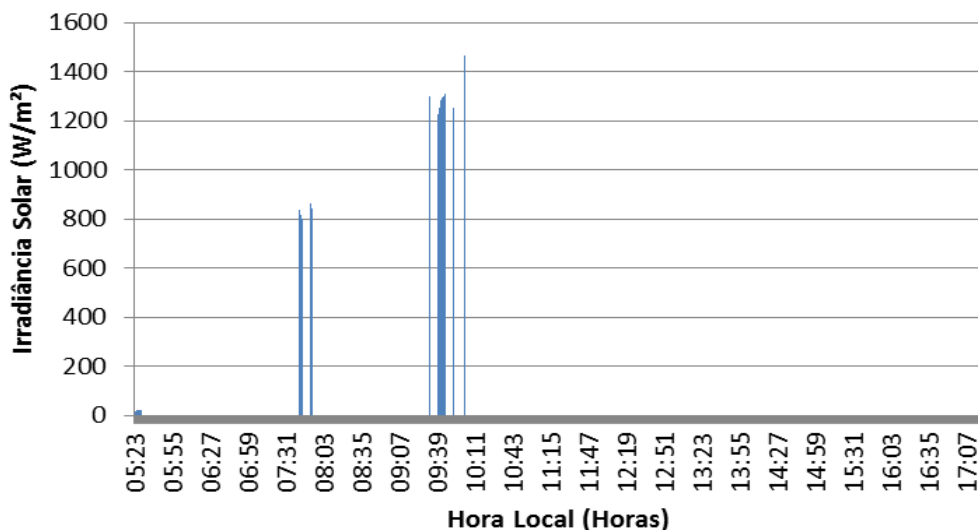


Figura 4 – Identificação dos intervalos com irradiância solar acima da irradiância solar extraterrestre para o dia 345.

4.2 Amplificação acima da condição de céu claro

As simulações computacionais utilizando o modelo do ESRA para condição de céu claro foram comparadas com os dados experimentais do piranômetro PSP da Eppley ao longo do período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009. Na Fig. 5 podem-se observar a frequência relativa da média mensal das somas das ocorrências diárias para as irradiâncias acima dos valores estimado para os dias de céu claro com fator de turbidez de Linke de 3,8. Os meses de outubro, novembro e dezembro de 2008 são os que apresentam maior frequência relativa de ocorrência, com valores acima de 11% chegando a 18% das ocorrências ao longo do ano de 2008.

Calculou-se o valor percentual médio da irradiância solar ocorrida acima do dia de céu claro com fator de turbidez de Linke de 3,8. Para o nosso nível de resolução constatou-se que para intervalo do ângulo zenital compreendido entre $-75 \leq \zeta_s \leq 75$ temos irradiância com valores mínimos de 12% acima da condição de céu claro, chegando a 17%.

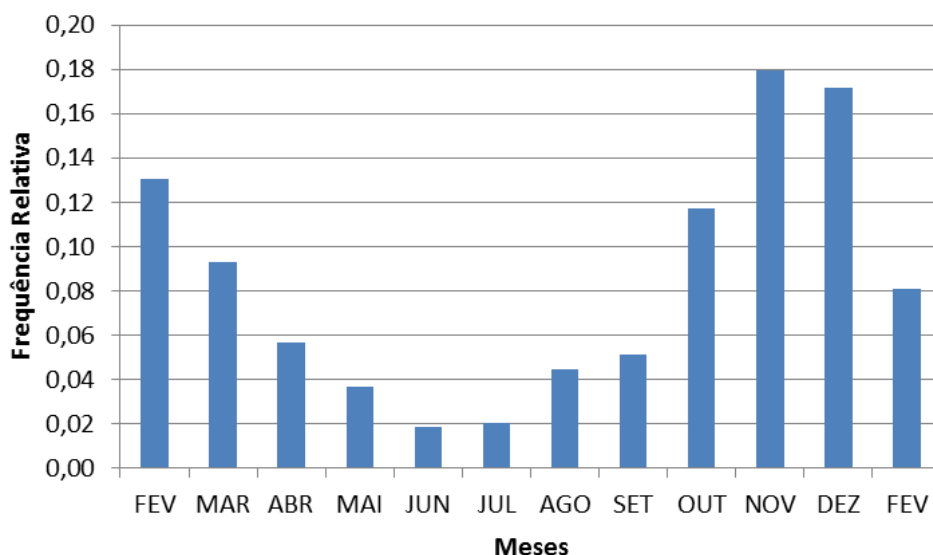


Figura 5 – Frequência relativa da soma das ocorrências diárias das irradiâncias solar acima dos valores estimados pelo ESRA para a condição e céu claro para o período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009.

Onde na Fig. 6 apresenta a frequência relativa da soma das ocorrências do fenômeno de amplificação solar em função do ângulo zenital para o período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009 em intervalos de 15 em 15 graus.

Verificou-se que a maior probabilidade de ocorrência do fenômeno de amplificação está compreendida no intervalo de -45 a -15 graus.

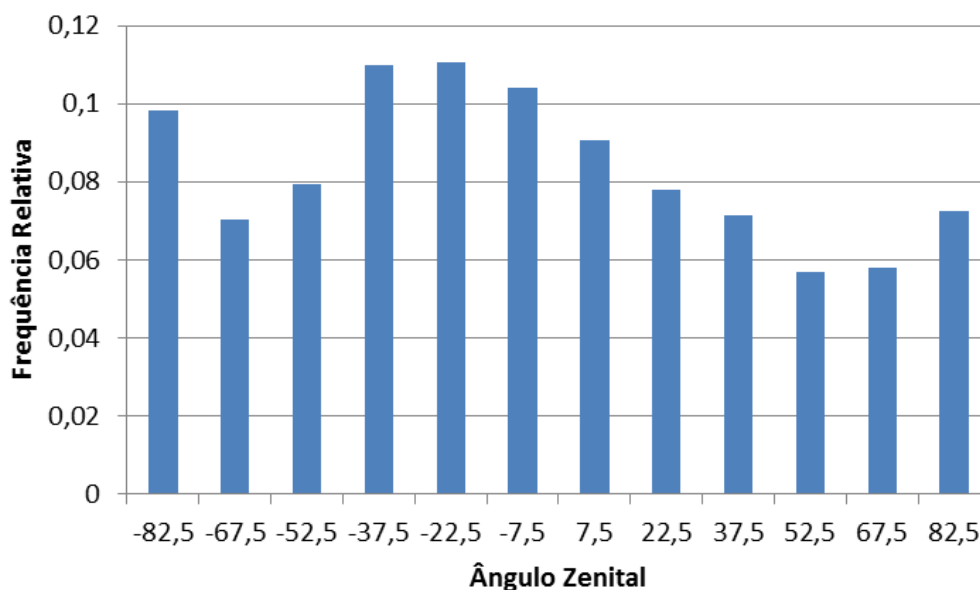


Figura 6 – Frequência relativa da soma das ocorrências do fenômeno de amplificação solar em função do ângulo zenital para o período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009.

4.3 Amplificação acima da irradiância extraterrestre

Para o período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009, obtivemos como resultado, $6,9 \pm 6$ minutos de duração para as ocorrências do fenômeno de amplificação acima da irradiância extraterrestre.

Para o período em questão podemos verificar na Fig. 7 que os meses com maior frequência relativa de ocorrência desse fenômeno foram os meses de outubro, novembro e dezembro de 2008, com frequências relativas compreendidas entre 17% a 29% das ocorrências.

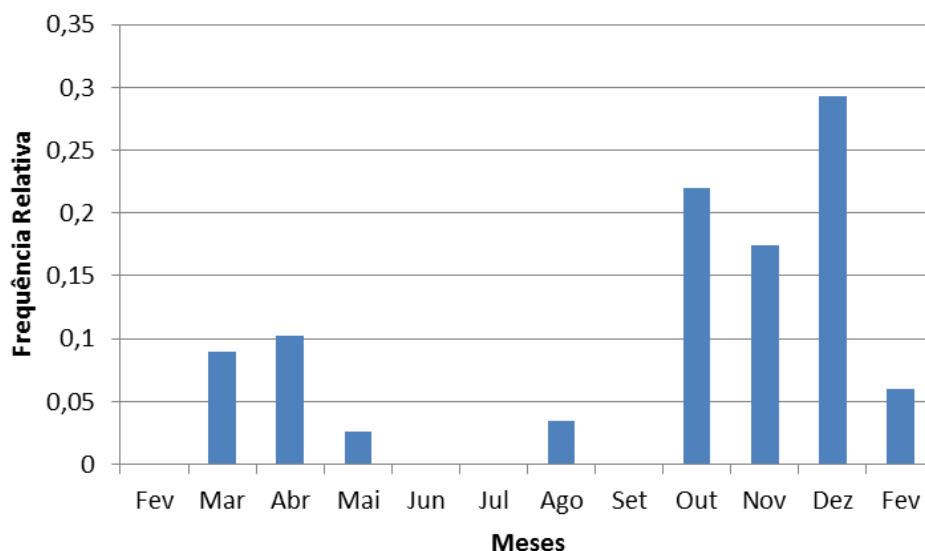


Figura 7 – Frequência relativa da soma das ocorrências acima da irradiância extraterrestre para o período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009.

A porcentagem da irradiância média, acima da irradiância extraterrestre em função do ângulo zenital foi de $7,4 \pm 3,8\%$ para o intervalo angular compreendido entre ± 75 graus.

Na Fig. 8 tirou-se a frequência relativa da média da soma de ocorrências em intervalos de 15 em 15 graus. Percebemos que a maior frequência para o período da manhã ocorreu no intervalo compreendido entre -30 e -15 graus, centrado em -22.5°, indicando possivelmente uma maior probabilidade de ocorrência para esse intervalo angular. Já para o período da tarde o intervalo angular de maior probabilidade de ocorrência para o intervalo compreendido entre 30 e 45 graus.

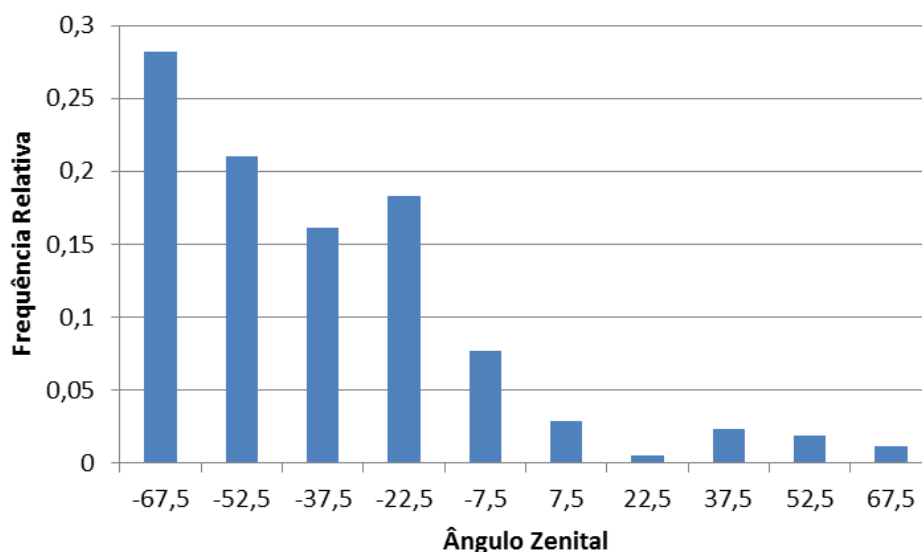


Figura 8 – frequência relativa da soma média das ocorrências acima da irradiância extraterrestre para o período de fevereiro de 2008 a fevereiro de 2009.

Outra análise para calcular o intervalo angular de maior ocorrência do fenômeno de amplificação da irradiância solar foi utilizar a frequência relativa da média da irradiância acima da irradiância extraterrestre para intervalos angulares de 15 em 15 graus, visto na figura 9. Na Fig. 9 temos uma indicativa de ocorrência pela manhã para o intervalo de -30 e 0 graus. Já para o período da tarde o intervalo está compreendido entre 30 e 45 graus. Percebemos que temos quase os mesmos intervalos da análise descritos anteriormente.

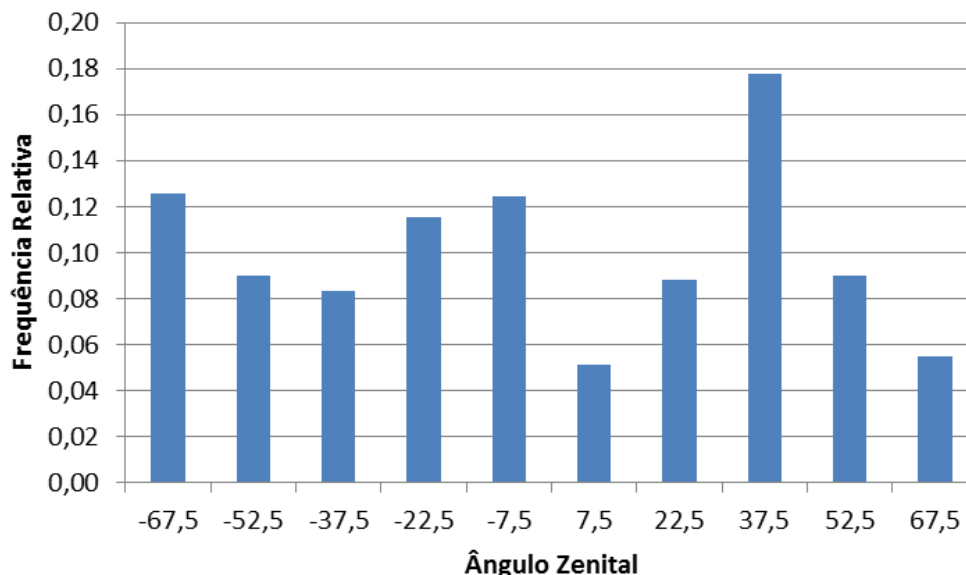


Figura 9 – frequência relativa da média da irradiância para ocorrências acima da irradiância extraterrestre em função do intervalo angular.

5. CONCLUSÃO

O estudo apresentado neste trabalho localiza os intervalos de ocorrência da irradiância solar numa superfície horizontal acima das condições de céu claro e/ou extraterrestre. O intervalo angular para a ocorrência do fenômeno de amplificação, tanto para a condição de céu claro como para valores de irradiância acima da extraterrestre está compreendida entre -15 a -45 graus para o período da manhã e entre 30 e 45 graus para o período da tarde. Os resultados mostram que ocorrem níveis de irradiação solar na faixa de 15% acima da condição de céu claro e valores 7,4% acima da irradiância extraterrestre.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, PróEngenharias (CAPES) pelo suporte às pesquisas relacionadas a Energia Solar.

REFERÊNCIAS

- Anderson, G. P., 1993. Suitability for remote sensing, Proc. Conf. Atmospheric Propagation and Remote Sensing II, A. Kohnle and W. B. Miller eds., Orlando, SPIE, Vol. 1968, pp. 514-525.
- Bird, R. E., 1986. Simple solar spectra model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres. J. Clim. Appl. Meteorol, Vol. 25, pp. 87-97.
- Gueymard, C., 1993. Development and performance assessment of a clear sky spectra radiation model, Proc. 22ndASES Conf., Solar, Washington, DC, American Solar Energy Society, pp. 433-438.
- Kasten, F., Dolchert, H. J., Dogniaux, R., Lemoine, M., 1994. European Solar Radiation Atlas, Commission of the European Communities, Vol.1. Cologne.
- Kirchhoff, V. W. J. H., 2000. A variação sazonal da radiação ultravioleta solar biologicamente ativa, Brazilian Journal of Geophysics, Vol. 18, n. 1, pp. 63-73.
- Piacentini, Rubén D., 2011. Extreme total solar irradiance due to cloud enhancement at sea level of the NE Atlantic coast of Brazil, Renewable Energy, Vol. 36, pp. 409-412.
- Scharmer, K., 1994. ESRA HANDBOOK, International Journal of Solar Energy, Vol. 15, Chapter III, pp. 81-87.

CLOUD ENHANCED FOR GLOBAL SOLAR IRRADIATION MEASURED AT SITE IN THE NORTHEAST OF BRAZIL

Abstract. *Extraterrestrial total solar irradiation is attenuated by the atmosphere in different proportions, depending mainly on solar zenith angle and altitude of the measurement point. In this work, very high and extreme total solar irradiation surface measurements are presented which, on some days, have surpassed the Solar Constant corrected(CSC) by the actual Sun-Earth distance. This paper reports a detailed analysis of ground based measurements of cloud enhanced solar global irradiation at a sea level site of the inter-tropical Atlantic coast, in the city of Recife, Brazil, in the period February 2008 – February 2009. Extreme total solar irradiation values higher than CSC were measured during 7.4% of the days within the total registered period. More commonly, very high total solar irradiation was observed: 15% higher than the clear sky condition. The angular interval of the amplification phenomenon, for the clear sky condition or above the extraterrestrial one is comprised of 15 to 45 degrees for the morning period and 30 to 45 degrees in the afternoon period.*

Key words: Total Solar Irradiation, Extreme value, Cloud Enhancement, Brazil, Recife