

EFEITO LENTE PRODUZIDO POR NUVENS NA IRRADIAÇÃO SOLAR GLOBAL MEDIDOS EM ÁGUA BRANCA-AL E MACEIÓ-AL LOCALIDADES DO 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 medidos 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 nas cidades de Água Branca e Maceió, Brasil, para o período de Janeiro a Dezembro de 2008. Valores de Irradiação Total Solar Extrema acima da CSC foram medidos durante 7,4% dos dias totais que foram registrados neste período. O intervalo horário do fenômeno de amplificação, para a condição acima da extraterrestre estão compreendidos entre 9:30 a 10:30 em horas solar para a localidade de Água Branca e entre 8:30 a 9:30 horas para a localidade de Maceió.

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

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 o percentual de ocorrência da irradiância solar que ultrapassou a condição extraterrestre, assim como o intervalo horário 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:

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

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 estimação 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 Água Branca - AL (longitude de $-37^{\circ}56'$ e latitude de $-9^{\circ}15'$) e Maceió - AL (longitude de $-35^{\circ}44'$ e latitude de $-9^{\circ}39'$), regiões do Nordeste do Brasil, Fig. 1. O Equipamento encontra-se instalado nestas localidades, os quais realiza uma medida a cada minuto de intervalo.

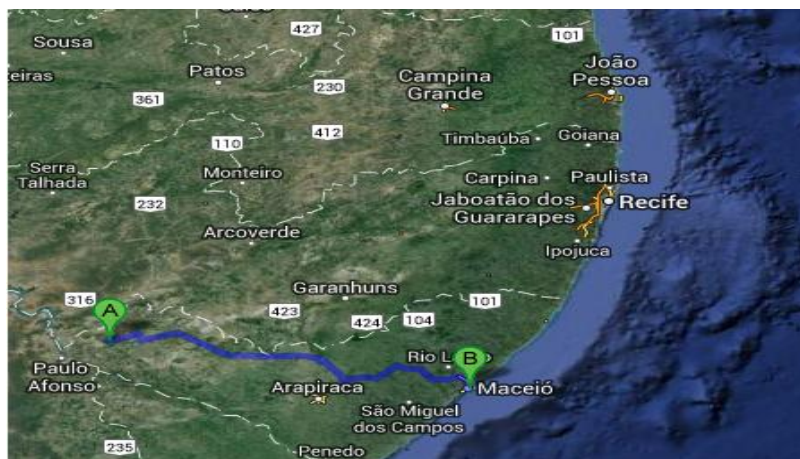


Figura 1 – Mapa de parte do Nordeste do Brasil apresentando a localização de: (A) Água Branca - AL e (B) Maceió - AL.

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 nascer e pôr-do-sol para dias de céu claro e também para irradiância extraterrestre para os meses de janeiro a dezembro de 2008.

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 condição extraterrestre. Os dados estimados foram comparados com os dados medidos. A Fig. 2 apresenta um exemplo da simulação feita para o dia 3 de agosto de 2008, mostrando a variação temporal da irradiância solar.

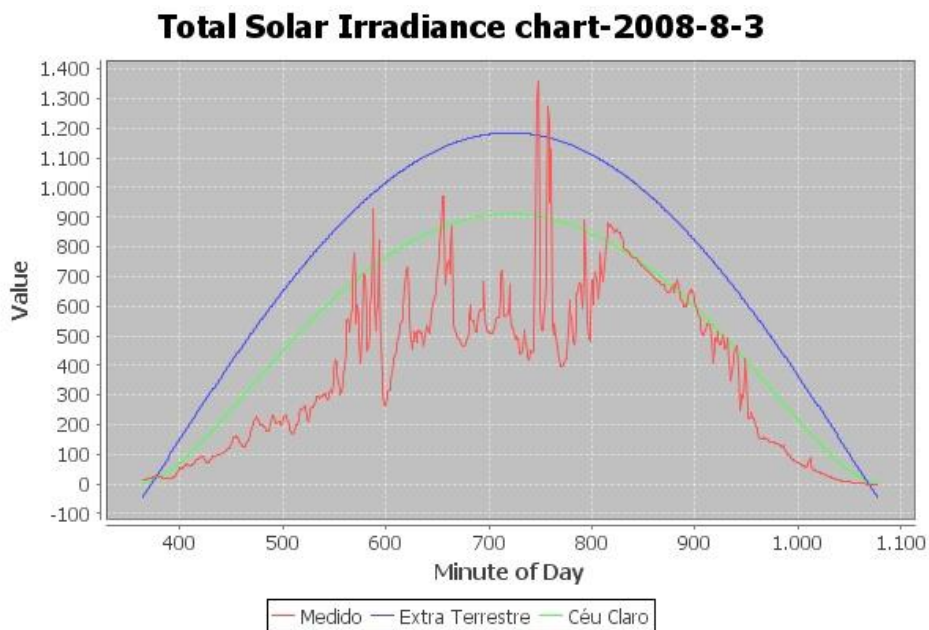


Figura 2 – Exemplo da variação temporal da irradiância solar ao longo do dia 3 de agosto de 2008.

Na Fig. 3 podem ser observados as ocorrências das irradiâncias medidas pelo PSP da Eppley que ultrapassaram os valores da irradiância extraterrestre.

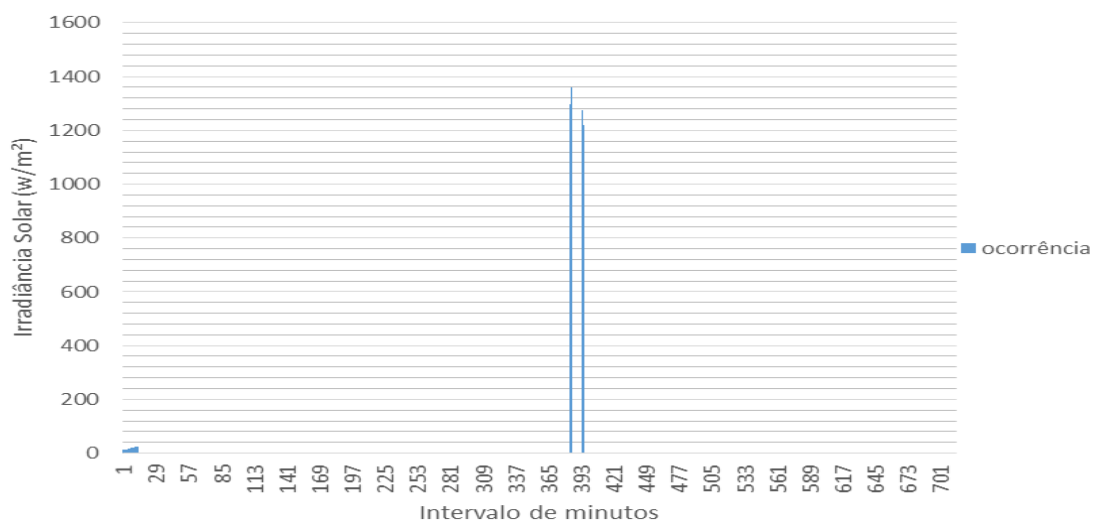


Figura 3 – Identificação dos intervalos com irradiância solar acima da

irradiância solar extraterrestre para o dia 3 de agosto de 2008.

4.2 Amplificação acima da irradiância extraterrestre

Para o período de janeiro a dezembro de 2008, obtivemos como resultado, 6.9 ± 6 minutos de duração para as ocorrências do fenômeno de amplificação acima da irradiância extraterrestre.

Para o período em questão podemos verificar na Fig. 4 que para a localidade de Água Branca, os meses com maior frequência relativa de ocorrência desse fenômeno foram os meses de março, abril, maio e outubro de 2008, com frequências relativas compreendidas entre 11% a 16% das ocorrências. Já na Fig. 5 para a localidade de Maceió, os meses março, agosto e setembro apresentaram maior frequência relativa de ocorrência, compreendidas entre 13% a 17% das ocorrências.

Frequência relativa de ocorrência da radiação extrema para os meses de 2008 na cidade de Água Branca

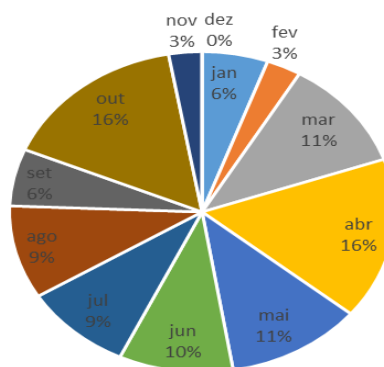


Figura 4 – Frequência relativa da soma das ocorrências diárias das irradiância solar acima dos valores estimados pelo ESRA para o período de janeiro a dezembro de 2008 para a localidade de Água Branca.

Frequência relativa de ocorrência da radiação extrema para os meses de 2008 na cidade de Maceió

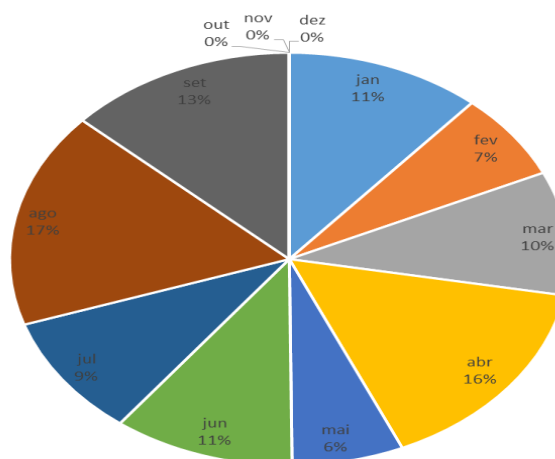


Figura 5 – Frequência relativa da soma das ocorrências diárias das irradiância solar acima dos valores estimados pelo ESRA para o período de janeiro a dezembro de 2008 para a localidade de Maceió.

A Fig. 6 apresenta a frequência relativa da média da soma das ocorrências do fenômeno de amplificação solar em função da hora solar para o período de janeiro a dezembro de 2008 para a localidade de Água Branca em intervalos de

30 em 30 minutos. Percebemos que a maior frequência para o período da manhã ocorreu no intervalo compreendido entre 9:30 as 10:30 em horas solar, centrado em 10:00, indicando uma maior probabilidade de ocorrência para esse intervalo horário. 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.

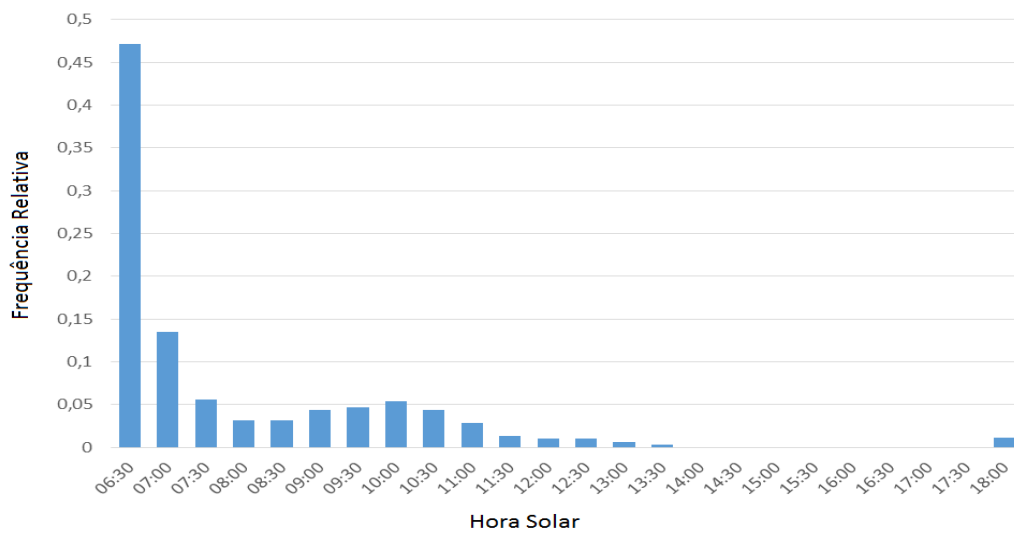


Figura 6 – frequência relativa da média da irradiância para ocorrências acima da irradiância extraterrestre em função do intervalo angular para a localidade de Água Branca.

A Fig. 7 apresenta a frequência relativa da média da soma das ocorrências do fenômeno de amplificação solar em função da hora solar para o período de janeiro a dezembro de 2008 para a localidade de Maceió em intervalos de 30 em 30 minutos. Percebemos que a maior frequência para o período da manhã ocorreu no intervalo compreendido entre 8:30 as 9:30 em horas solar, centrado em 9:00, indicando uma maior probabilidade de ocorrência para esse intervalo horário.

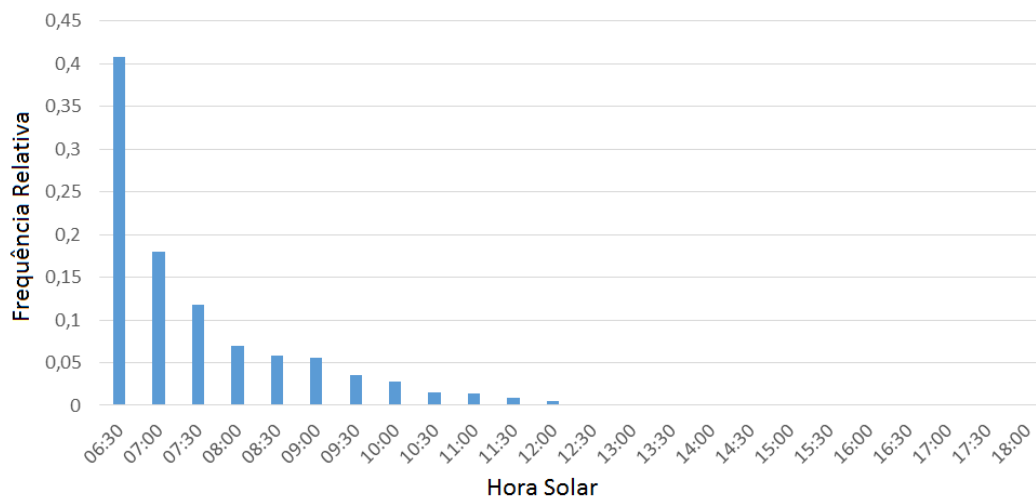


Figura 7 – frequência relativa da média da irradiância para ocorrências acima da irradiância extraterrestre em função do intervalo angular para a localidade de Maceió.

Outra análise para calcular o intervalo horário 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 30 em 30 minutos em hora solar, visto na figura 8 e figura 9 para as localidades de Água Branca e Maceió, respectivamente. Na Fig. 8 temos uma indicativa de ocorrência pela manhã para o intervalo de 9:30 a 10:30 horas. Já na Fig. 9 temos uma indicativa de ocorrência pela manhã para o intervalo de 8:30 a 9:30 horas. Percebemos que temos os mesmos intervalos da análise descritos anteriormente para as duas localidades.

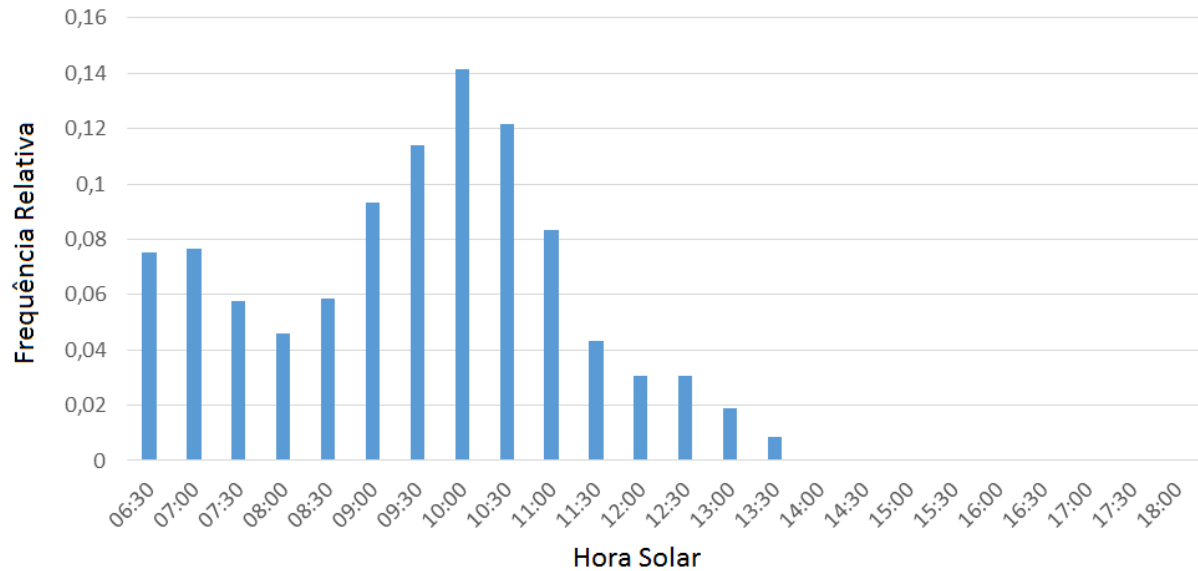


Figura 8 – frequência relativa da soma média das ocorrências acima da irradiância extraterrestre para o período de janeiro a dezembro de 2008 para a localidade de Água Branca.

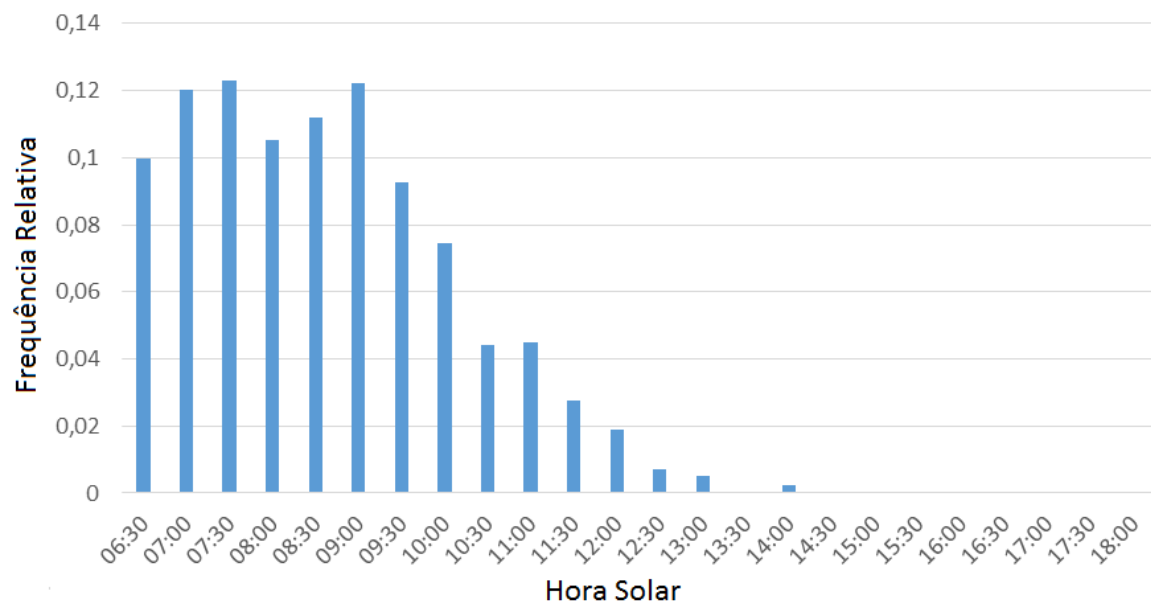


Figura 9 – frequência relativa da soma média das ocorrências acima da irradiância extraterrestre para o período de janeiro a dezembro de 2008 para a localidade de Maceió.

5. CONCLUSÃO

O estudo apresentado neste trabalho localiza os intervalos de ocorrência da irradiância solar numa superfície horizontal acima da condição extraterrestre. O intervalo horário para a ocorrência do fenômeno de amplificação para a condição de valores de irradiância acima da extraterrestre está compreendida entre 9:30 a 10:30 em horas solar para a localidade de Água Branca e entre 8:30 a 9:30 para a localidade de Maceió. Os resultados mostram que ocorrem níveis de irradiação solar na faixa de 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.

OVER-IRRADIANCE (CLOUD ENHANCEMENT) IN GLOBAL SOLAR IRRADIATION MEASURED IN ÁGUA BRANCA AND MACEIÓ-AL AL 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 cities of White Water and Maceio, Brazil, for the period January to December 2008. Extreme total solar irradiation values higher than CSC were measured during 7.4% of the days within the total registered period. The time intervals of the phenomenon of amplification, for the above condition of extraterrestrial are between 9:30 to 10:30 solar time to the location of White Water and between 8:30 to 9:30 hours for the town of Maceio.*

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