

ANÁLISE DA TENDÊNCIA DA IRRADIAÇÃO SOLAR E TEMPERATURA AMBIENTE NO AGRESTE NORDESTINO EMPREGANDO DADOS MEDIDOS DE LONGO PRAZO

Manoel Henrique de Oliveira Pedrosa Filho – manoel@pesqueira.ifpe.edu.br

Valdemir Mariano – valdemir@pesqueira.ifpe.edu.br

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, Campus Pesqueira

Resumo. *Existem diversos projetos em desenvolvimento para a implantação de usinas solares fotovoltaicas no Nordeste brasileiro. Simulações de longo prazo são empregadas, devido principalmente a grande vida útil dos módulos fotovoltaicos. Porém, diversos estudos apontam que existe uma tendência de variação de grandezas climáticas e ambientais. Este trabalho apresenta os resultados de uma análise com dados de longo prazo (43 anos) do comportamento e da tendência da temperatura máxima e mínima, e da irradiação solar diária para o município de Arcoverde, localizado no agreste pernambucano. Para compor o banco de dados de irradiação solar diária do período que não existem dados disponíveis, foram testados modelos de insolação solar. O modelo que apresentou os melhores indicadores estatísticos foi o de Angström-PreScott mensal. Foram utilizados também, filtros de qualidade, para garantir que os dados não apresentem problemas de medição que possam influenciar as análises. Utilizando-se o teste de tendência de Mann-Kendall, verificou-se que, tanto a temperatura máxima como a temperatura mínima apresentaram forte tendência de aumento nos últimos 13 anos. Em relação à irradiação solar, foi verificada uma tendência de aumento do Kt diário, porém com intensidade menor. Em uma análise da média diária mensal ao longo dos anos, observou-se que, o mês de março apresentou a maior tendência de aumento do Kt, seguido pelos meses de julho e setembro, os outros meses não apresentaram tendência de aumento. Embora a temperatura ambiente e a irradiação solar sejam correlacionadas, aponta-se neste trabalho a necessidade de que estudos mais abrangentes sejam realizados no sentido de identificar as causas da tendência verificada. Destaca-se que, conforme foi constatada a tendência de aumento da temperatura máxima, as simulações de longo prazo necessitam considerar a existência desta elevação para que os resultados sejam mais próximos da realidade a longo prazo, o que poderá influenciar na viabilidade de determinado projeto.*

Palavras-chave: *Irradiação solar, Temperatura ambiente, Análise de tendência Mann-Kendall.*

1. INTRODUÇÃO

Nestes últimos anos, o aproveitamento da radiação solar tem tomado destaque com a crescente e constante instalação de micro e minicentrais fotovoltaicas principalmente em residências e comércios. Observa-se também que, devido aos recentes leilões de compra de energia realizados por governos estaduais e federais, existem diversos projetos em elaboração ou em execução para a instalação de usinas de grande porte no Brasil. A grande maioria destes projetos estão localizados no Nordeste brasileiro onde, diversos estudos (Tiba, 2000), (Pereira et al., 2006) e o mais recente lançamento (2017) da nova versão do mapa solarimétrico brasileiro apontam que a região citada possui elevados níveis de radiação, o que permite a viabilização da grande maioria dos projetos.

As medições da radiação solar no território brasileiro tiveram início a pelo menos 40 anos com a instalação de estações meteorológicas para registro de variáveis climáticas como temperatura, umidade, velocidade do vento e insolação, realizadas pelos escritórios do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), com o objetivo principal de realizar a previsão do tempo e monitoramento das variáveis climáticas.

Por outro lado, os projetos que empregam a conversão da radiação solar utilizam em sua maioria, dados da radiação médios disponibilizados tanto pelo INMET como pelo projeto SONDA (INPE). Outras fontes de dados são os mapas solarimétricos já citados, que utilizam modelos de satélite com 17 anos de dados de imagens, e os dados diários médios mensais fornecidos pelo projeto SWERA.

Porém, nas últimas décadas, vem sendo observado e divulgado no meio acadêmico, a existência de uma variabilidade interanual da radiação solar global, denominada Global Dimming. Conforme Silva et al. (2010), um dos primeiros trabalhos a abordar este tema foi Ohmura e Lang (1989) apontando que os valores da radiação global estariam reduzindo de maneira mais acentuada desde os anos 1950. Seguiram-se a ele, estudos em diversos locais do mundo: Rússia, Austrália, Alemanha, Hong Kong, Israel, Antártica, Índia, entre outros. No Brasil, citam-se os trabalhos de: Silva et al. (2008), Stanhill e Cohen (2001), Tiba e Fraidenraich (2004), Silva et al. (2010).

A importância destes estudos está no fato que os projetos que fazem uso da radiação solar necessitam levar em conta a ocorrência destas tendências apontadas pelos autores, uma vez que a especificação e garantia dos equipamentos ultrapassam duas décadas. Observa-se que, a geração de energia elétrica ao longo do tempo, realizada por meio de simulação, necessita considerar a existência desta variação, uma vez que podem existir dois efeitos concorrentes, o aumento dos valores da irradiação que colabora positivamente na geração e o aumento das temperaturas que provoca

uma redução da geração. Outro fato, citado por Silva et al. (2008), é que tais variações podem ter efeito catastróficos uma vez que podem alterar o regime hidrológico e de temperatura na superfície da Terra.

Observa-se que os estudos deste tipo para o território brasileiro apresentam uma dificuldade relacionada com a disponibilidade de dados de radiação solar global. Existindo, porém uma grande disponibilidade de dados de insolação (horas de brilho de sol) fornecidas facilmente pelo INMET, o que requer que se utilize modelos de estimativa da irradiação solar com base em valores de insolação.

Considerando o exposto e que na Região Nordeste apenas as cidades de Petrolina-PE e Juazeiro-BA foram objetos de estudo semelhante utilizando dados meteorológicos da Embrapa Semiárido (Silva et al., 2010), este trabalho apresenta uma metodologia desenvolvida de forma que permita utilizar 43 anos de dados de insolação de longo prazo fornecidos pelo INMET com o objetivo de realizar um estudo de variabilidade no município de Arcoverde-PE, por sua localização geográfica (Agreste pernambucano, distante de 250 km do litoral), podendo ser estendido para qualquer outro município que tenha dados de insolação e radiação solar de longo prazo.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados coletados para este trabalho foram obtidos no site do INMET, para a estação localizada no Município de Arcoverde-PE (latitude $-8,41^\circ$; longitude $-37,08^\circ$; altitude 680m), consistindo de dados diários de insolação, temperatura mínima e máxima do período de julho de 1974 a maio de 2017 (máximo período com dados que são disponibilizados pelo INMET). Do período total, foram separados dados do período de janeiro de 2012 a maio de 2017 com a finalidade de ajuste dos modelos de estimativa da irradiação solar diária, necessários para converter os valores da insolação em irradiação. Este período foi escolhido, pois é o que fornece simultaneamente valores de irradiação e insolação.

Para a realização do presente estudo, inicialmente foi feita uma avaliação sobre os modelos de estimativa da irradiação solar diária (Wh/m^2) tendo como valores de entrada a insolação (horas de brilho do Sol). Uma vez definido o modelo, este foi aplicado a todo o período de dados de insolação (1974 a 2011), formando assim um banco de dados de valores de irradiação solar diária. Com base neste banco e após a aplicação de filtros de qualidade, foram realizadas análises sobre a variabilidade da radiação na localidade em estudo.

2.1 Definição do modelo de estimativa da irradiação solar

A definição do modelo de estimativa da irradiação solar utilizou dados diários da insolação e irradiação medidos no período de janeiro de 2012 a maio de 2017, totalizando 1974 dias. Inicialmente, foram aplicados filtros de qualidade de dados segundo Tang et al. (2010) Eq. (1), com a finalidade de excluir valores de irradiação considerados inconsistentes do conjunto total do período de 2012 à 2017.

$$0,03.H_0 \leq H \leq H_0 \quad (1)$$

Foi desenvolvido e empregado um filtro baseado na Eq. (2), apresentada por Sahin e Sen (2008), que calcula o fator R_e , definido pelos autores como uma relação de redução da taxa extraterrestre (S_0/H_0). Este filtro visa verificar a relação entre a insolação e a irradiação, pois, dentro do conjunto de dados, também podem ser encontradas inconsistências nas medidas destas duas grandezas.

$$R_e = 1 - \frac{S/H}{S_0/H_0} \quad (2)$$

Observando-se a Eq. (2), verifica-se que, a relação de redução (R_e) deve ser um valor entre -1 e +1, resultando assim em uma condição de qualidade que relaciona simultaneamente a insolação com a irradiação solar. Valores menores que -1 indicam que a quantidade de irradiação medida está aquém do correspondente de insolação e vice-versa.

Nas Eq. (1) e Eq. (2), H é a irradiação solar diária em Wh/m^2 obtida do INMET. S é a insolação diária em horas. H_0 é a irradiação solar diária extraterrestre em Wh/m^2 . E S_0 é o número máximo de horas de brilho de Sol ou a duração do dia em horas, estas duas últimas grandezas podem ser calculadas com as equações apresentadas por Rabl (1985).

A partir da aplicação simultânea dos filtros de qualidade indicados, foram excluídos da análise 234 dias, o que corresponde a 11,8% do total de dias do período 2012 a 2017.

O primeiro modelo desenvolvido sobre o tema que é considerado como referência, utilizado para a estimativa da irradiação solar a partir de valores da insolação é o modelo de Angström-Prezcott (Angström, 1924; Prezcott, 1940) ((Eq. (5)), em que o coeficiente (a) representa a fração da radiação solar extraterrestre que atinge o solo em dias completamente nublados e (b) o coeficiente angular da reta de regressão (Belúcio et al., 2014).

A partir deste modelo, foram empregados modelos que utilizam expressões alternativas: quadrático (Akinoglu e Ecevit, 1990) ((Eq. (4)), exponencial, expressão adaptada de Almorox e Hontoria (2004) ((Eq. (5)). E a aplicação do

modelo Angström-Prescott para cada mês, denominado Angström-Prescott mensal (Soler, 1990) ((Eq. (3)). Para determinação dos coeficientes foi utilizado um programa de planilha eletrônica.

$$\frac{H}{H_0} = a + b \cdot \frac{S}{S_0} \quad (3)$$

$$\frac{H}{H_0} = a + b \left(\frac{S}{S_0} \right) + c \left(\frac{S}{S_0} \right)^2 \quad (4)$$

$$\frac{H}{H_0} = a + e^{b \cdot \frac{S}{S_0}} \quad (5)$$

O modelo linear mensal utiliza a mesma equação de Angström-Prescott ((Eq. (3)), porém os seus coeficientes são obtidos para cada mês do ano.

Os gráficos da Fig. 1 apresentam as correções obtidas para cada modelo testado.

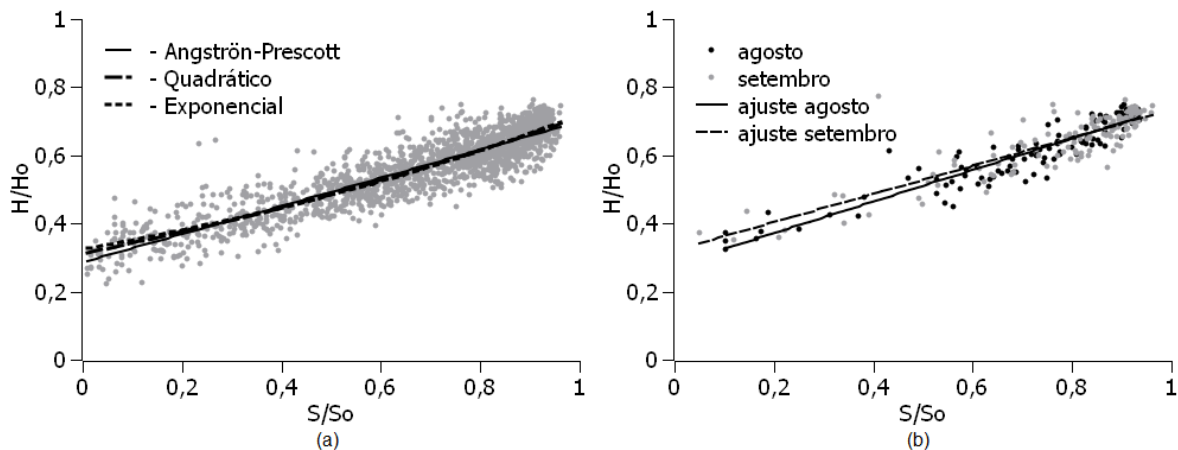


Figura 1 - (a) Ajustes dos modelos Angström-Prescott, quadrático e exponencial para o conjunto de dados filtrados. (b) Ajuste do modelo Angström-Prescott mensal para os meses de agosto e setembro do período 2012 a 2017.

Conforme pode-se verificar no gráfico da Fig. 1a, foi possível realizar o ajuste para os modelos Angström-Prescott, quadrático e exponencial. Os pontos em cinza representam os valores medidos/calculados das relações H/H_0 e S/S_0 (valores medidos de H e S , e calculados de H_0 e S_0). Observa-se que existe uma maior concentração de pontos para valores de S/S_0 maiores que 0,6 e para valores de H/H_0 entre 0,5 e 0,8, indicando uma predominância de dias de céu claro e parcialmente claro. As curvas ajustadas praticamente se sobrepõem para valores de S/S_0 maiores que 0,3; mostrando que os valores do coeficiente de determinação (R^2) estão próximos.

O gráfico da Fig. 1b apresenta o ajuste do modelo Angström-Prescott mensal para dois meses críticos: agosto que obteve o maior e setembro que apresentou o menor valor do coeficiente de determinação. Da mesma forma que na Fig. 1a, observa-se uma maior concentração de pontos para valores de S/S_0 acima de 0,5. As curvas se sobrepõem para valores acima de S/S_0 acima de 0,7.

A Tab. 1 apresenta, como forma de resumo, os valores dos coeficientes obtidos.

Tabela 1 - Coeficientes obtidos dos modelos Angström-Prescott, Quadrático e Exponencial.

Modelo	Coeficientes		
	a	b	c
Angström-Prescot	0,4126	0,2861	-
Quadrático	0,1024	0,2975	0,3114
Exponencial	0,3243	0,7969	-

Para o modelo Angström-Prescott mensal, foram obtidos os coeficientes indicados na Tab. 2.

Tabela 2 - Coeficientes mensais do modelo Angström-Prescott e seus correspondentes coeficientes de determinação (R^2).

Mês	Coeficientes		R^2
	a	b	
Janeiro	0,3773	0,3111	0,8113
Fevereiro	0,3841	0,311	0,7824
Março	0,4131	0,2855	0,7634
Abril	0,435	0,2516	0,8409
Mai	0,3867	0,2768	0,8537
Junho	0,391	0,2938	0,8015
Julho	0,4255	0,2965	0,8634
Agosto	0,4633	0,2788	0,8684
Setembro	0,4131	0,3211	0,7443
Outubro	0,4599	0,252	0,8076
Novembro	0,3916	0,2885	0,7729
Dezembro	0,3745	0,2928	0,8246

Foram utilizados quatro indicadores estatísticos com o objetivo de verificar o modelo que melhor representa a relação entre a insolação e a irradiação diárias para a localidade em estudo, os valores obtidos estão apresentados na Tab. 3.

Tabela 3 - Indicadores estatísticos dos modelos testados para o período desde 2012 até 2017.

Modelo	Indicadores estatísticos			
	R^2	RMSE	MBE	t
Angström-Prescot	0,8051	0,04666	0,0002674	0,238967
Quadrático	0,8082	0,04629	0,0003690	0,332415
Angström-Prescot mensal	0,8112	0,04250	-0,0000004	0,000402
Exponencial	0,8073	0,04639	0,0000725	0,065219

Foram utilizados como indicadores estatísticos: o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio quadrático (RMSE), o erro médio (MBE) e o teste estatístico t, conforme sugere Chelbi et al. (2015). Observa-se, a partir dos valores indicados na Tab. 3, que o modelo Angström-Prescott mensal apresentou os melhores indicadores, maior R^2 , menores RMSE, MBE e t, o que motivou a sua escolha para a determinação dos valores de irradiação solar dos anos, do banco de dados, que apenas apresentam valores de insolação.

2.2 Tratamento dos dados de irradiação e temperatura

Uma vez definido o modelo de Angström-Prescott mensal para a determinação dos valores diários de irradiação solar (Wh/m^2), o que permitiu a composição do banco de dados totalizando 12.880 dias, foram então empregados filtros de qualidade para eliminar ou corrigir do banco de dados, dias que apresentam valores de irradiação díspares da normalidade.

Neste sentido, observou-se que, do total de dias do banco, 84,7% são dias que não possuem valores de irradiação medidos, para estes, os valores de irradiação foram definidos utilizando o modelo de Angström-Prescott mensal. Dos dias restantes, 15,3% do total, que possuem valores de radiação medidos, foram identificados 166 dias (8,4% dos dias com irradiação) com valores nulos de irradiação. Para estes dias, os valores de irradiação foram trocados pelo calculados pelo modelo escolhido. Ainda dentro do conjunto de dias com valores de irradiação medidos, foram encontrados 4 dias (0,2% dos dias com irradiação) com valores do filtro Re fora da faixa -1 a +1. Para estes casos, os valores de irradiação também foram trocados pelos valores fornecidos pelo modelo Angström-Prescott mensal.

O último filtro que foi empregado foi o da relação $S/S_0 < 1$, neste foram excluídos do banco 3 dias. O filtro $H/H_0 < 1,1$ também foi utilizado, porém não houve ocorrências foram deste limite. Ao final, restaram 12877 dias de dados de irradiação solar para as análises.

Outros filtros foram utilizados para a elaboração das médias mensal e anual com os dados, estes serão comentados posteriormente.

Uma outra variável que foi utilizada nas análises foi a temperatura ambiente, neste caso, foram obtidos os valores de temperatura máxima e mínima diária. Partindo dos 12880 dias de dados disponibilizados pelo INMET, foram aplicados filtros de qualidade. Em um primeiro momento, foram identificados 15 dias (0,11% dos dados) que não possuem dados de temperatura máxima e nem mínima. Outro filtro utilizado é o que contempla os limites físicos da temperatura, Long e Shi (2006) indicam que a temperatura ambiente deve estar em uma faixa de valores entre 170K e

350K, que corresponde a $-103\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $77\text{ }^{\circ}\text{C}$, porém, os autores apontam que os limites de classificação de valores de temperatura podem ter valores mais próximos das condições locais, usando limites de uma análise climatológica. Para o caso deste trabalho, utilizou-se como valor mínimo e máximo, a mínima e a máxima temperatura observada nas medições dos 45 anos da localidade. Verificou-se que tais valores são $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para esta condição, foram observados 44 dias (0,34%) com valor nulo de temperatura mínima.

Ao final, a quantidade de dias com valores de temperatura máxima e mínima válidos utilizados nas análises foi de 12.843 dias (99,7% do total coletado).

2.3 Análise dos dados de temperatura

Com a aplicação dos filtros de qualidade, foram analisados os dados de temperatura máxima e mínima para a localidade em questão. Inicialmente, foi obtido o perfil das temperaturas máxima e mínima dos 12.843 dias válidos, estes perfis estão apresentados na Fig. 2.

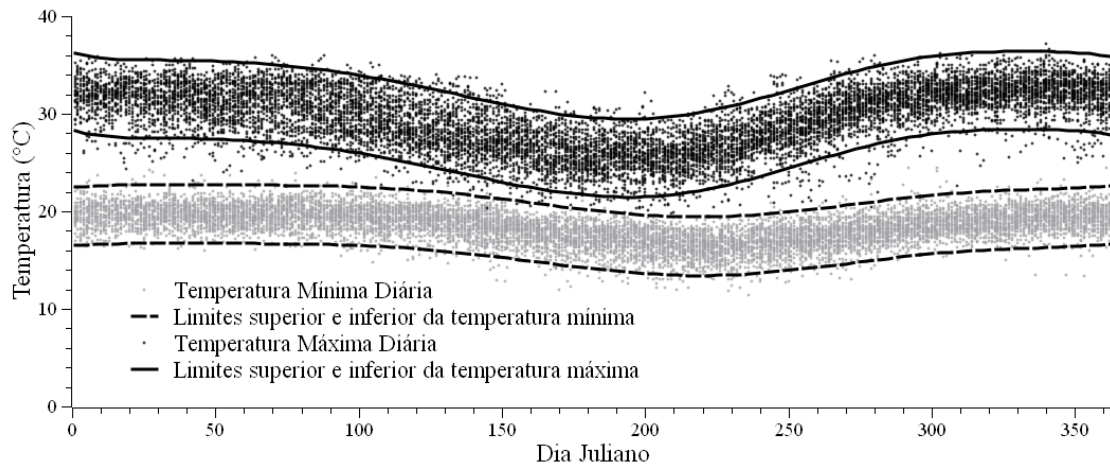


Figura 2 - Perfis de temperatura máxima e mínima.

No gráfico da Fig. 2, estão apresentados os comportamentos da temperatura máxima e mínima para o período analisado. Foram traçadas curvas envoltórias, obtidas por ajuste de expressões polinomiais de 9ª ordem (utilizando o programa de cálculos matemáticos: SciDAVis - *Scientific Data Analysis and Visualization*, disponível em <https://sourceforge.net/projects/scidavis/>), que delimitam os possíveis valores da temperatura máxima e mínima para a cidade de Arcoverde. Para a temperatura máxima, as curvas em linha cheia representam uma faixa de variação de $\pm 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ e para a temperatura mínima, as curvas tracejadas referem-se a uma variação de $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Observa-se que a temperatura máxima se apresenta fortemente dependente da época do ano, nos meses de inverno, verifica-se uma redução destes valores, apresentando um mínimo por volta do dia 190 (9 de julho), em comparação com os meses de novembro e dezembro, que apresenta um máximo próximo ao dia 335 (1 de dezembro). A temperatura máxima média para o período foi de $27,55\text{ }^{\circ}\text{C}$ com desvio padrão de $3,08\text{ }^{\circ}\text{C}$. A maior temperatura registrada foi de $37,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já a temperatura mínima apresenta-se com menor variabilidade ao longo do ano. Nota-se que esta apresenta valores que dependem pouco da época do ano. A temperatura mínima média observada foi de $18,45\text{ }^{\circ}\text{C}$, com desvio padrão de $1,67\text{ }^{\circ}\text{C}$, a menor temperatura registrada foi de $11,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Outra análise realizada, foi o comportamento das temperaturas máxima e mínima médias anuais e suas respectivas variações. Os gráficos da Fig. 3 apresentam os valores obtidos para o período em análise.

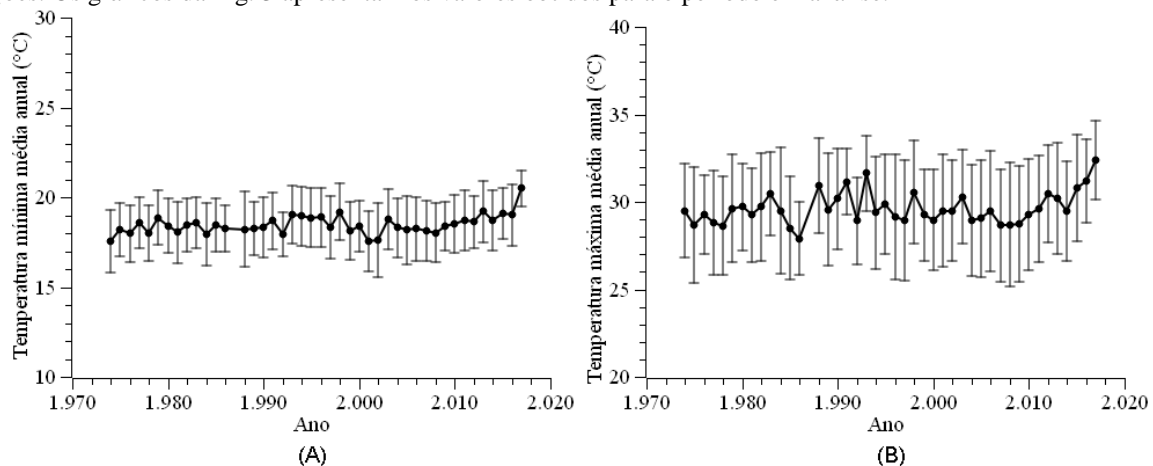


Figura 3 - Temperaturas médias anuais: (A) temperatura mínima e (B) temperatura máxima.

Para a construção dos gráficos da Fig. 3, foram calculadas as médias anuais diárias das temperaturas máxima e mínima, com seus respectivos desvios padrão, para o período analisado. Os gráficos foram construídos observando-se a mesma escala de temperaturas para que se possam realizar comparações das duas variáveis nas mesmas condições. Também foram construídas barras de desvio padrão para cada valor anual.

Observando-se o gráfico da Fig. 3A (temperatura mínima) e o gráfico da Fig. 3B (temperatura máxima), verifica-se que, as variações da temperatura mínima são menores do que as variações da temperatura máxima, para o período analisado, o que indica que a temperatura mínima apresenta pouca variação de valores em relação à temperatura máxima, o que foi também observado na Fig. 2.

Analisando-se de forma visual os gráficos da Fig. 3, pode-se notar que o período entre 2004 e 2017 apresenta uma tendência de elevação da média de ambas as temperaturas. Utilizou-se um teste não paramétrico de tendência desenvolvido por Mann (1945) e Kendall (1975), denominado Teste Mann-Kendall, para verificar estatisticamente a existência da tendência observada nos gráficos. O teste foi empregado em dois conjuntos de dados: no total dos dados (1974 a 2017) e no período em que se observa a tendência (2004 a 2017). Os resultados estão apresentados na Tab. 4 nesta, Z é a estatística do teste Mann-Kendall, calculada com as equações apresentadas por Silva et al. (2010), o valor p é o valor de referência para decisão de aceitação ou rejeição da hipótese nula, calculado com nível de significância de 5%.

Tabela 4 - Resultado do teste Mann-Kendall.

Grandeza	Período do teste	Z	Valor p	Resultado do teste
Temperatura máxima	1974 - 2017	0,1627	0,11640	pequena tendência de aumento
	2004 - 2017	0,6923	0,00122	grande tendência de aumento
Temperatura mínima	1974 - 2017	0,2646	0,01270	pequena tendência de aumento
	2004 - 2017	0,7179	0,00079	grande tendência de aumento

Constata-se, a partir dos resultados apresentados na Tab. 4 que, para o período total (1974-2017) e para o período destacado (2004 – 2017), existe uma tendência de aumento de ambas as grandezas. Porém, o teste confirmou que existe uma grande tendência de elevação da média de ambas as temperaturas a partir do ano 2004 até o ano de 2017. A temperatura mínima, para o período citado, apresenta uma tendência de aumento com maior intensidade do que a temperatura máxima. Resultado semelhante foi observado por Ferreira e Alves (2015). Para efeito comparativo, a diferença entre a temperatura mínima média entre o ano de 2004 e 2017 foi de aproximadamente 2,2 °C (aumento de 0,16 °C por ano). Já para a temperatura máxima, para o mesmo período, o aumento foi de 3,4 °C (incremento de 0,26 °C por ano).

2.4 Análise dos dados de irradiação global

Seguindo-se o mesmo procedimento para os dados de irradiação solar, após a aplicação dos filtros de qualidade de dados, foi obtido o perfil da irradiação solar para a localidade em estudo, o gráfico da Fig. 4. Também foi plotado o valor da irradiação solar extraterrestre, calculado com as equações indicadas por Rabl (1985).

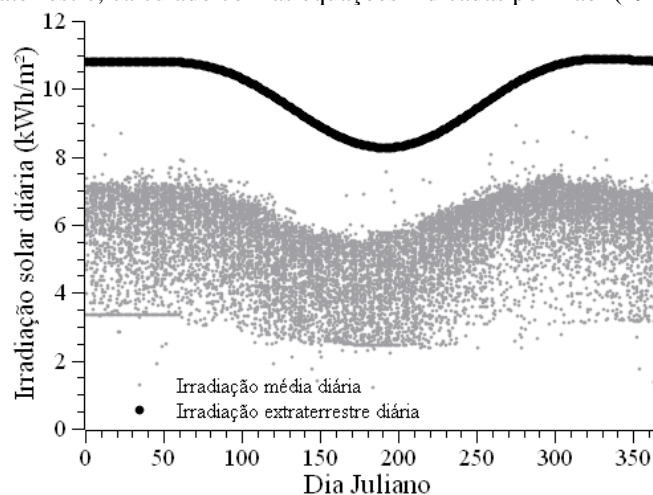


Figura 4 - Perfil da irradiação solar global.

Observando-se o gráfico da Fig. 4, verifica-se que o perfil dos valores da irradiação solar global segue o comportamento da irradiação extraterrestre com uma baixa situada no inverno. Os valores máximos observados no perfil estão em torno de 7,5 kWh/m² no verão e 6 kWh/m² no inverno. Os menores valores no verão estão em torno de 3,4 kWh/m² e 2,5 kWh/m² no inverno. A média geral da irradiação solar observada foi de 5,5 kWh/m² com desvio padrão de 1,22 kWh/m² (22,1% da média).

Foi analisada também a distribuição de frequência da transmissividade atmosférica diária, também conhecida como índice de claridade (Kt), calculado como a relação entre a irradiação solar horizontal medida na localidade em estudo e a irradiação solar diária extraterrestre. O gráfico da Fig. 5 apresenta o comportamento dos valores de Kt para o período analisado.

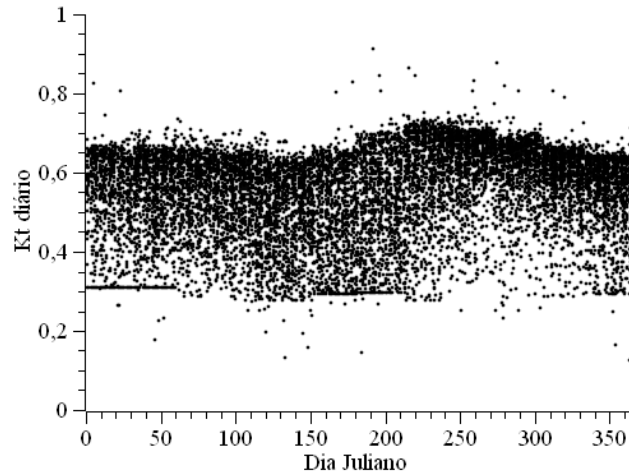


Figura 5 - Perfil dos valores de Kt diário.

Observa-se, pelo gráfico da Fig. 5 que, os valores de Kt situam-se entre 0,75 e 0,31. Os valores mínimos, aparentemente, não dependem da época do ano, porém nota-se que entre os meses de agosto e dezembro (faixa de dias julianos entre 220 e 340), valores baixos de Kt, que indicam dias de céu nublado, são mais escassos, sendo uma predominância de dias de céu parcialmente claros a claros. Os valores maiores de Kt que representam dias de céu claro, têm uma dependência com a época do ano, os meses entre agosto e outubro são os que se apresentam com os maiores valores de Kt, indicando que a atmosfera se apresenta, neste período, mais limpa do que nas outras épocas do ano. O valor médio de Kt para o período avaliado é de 0,555 com desvio padrão de 0,107.

Foi elaborada a distribuição de frequência dos valores de Kt para todo o período analisado, o gráfico da Fig. 6 apresenta os resultados obtidos.

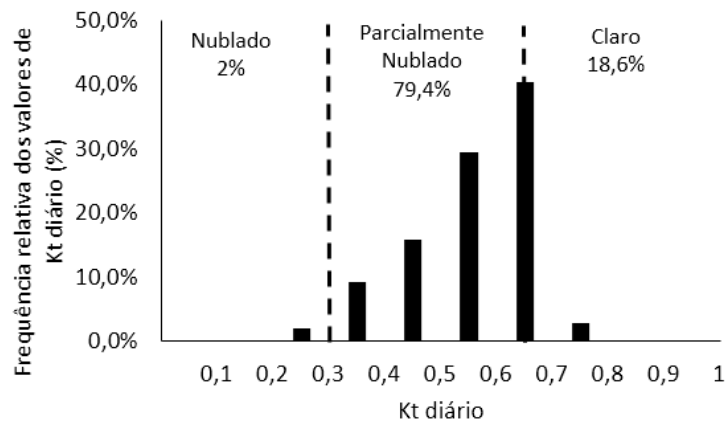


Figura 6 - Distribuição de frequência de Kt e o frequência de dias de céu claro, nublado e parcialmente claro.

Verificando-se o gráfico da Fig. 6, observa-se que valores de Kt entre 0,6 e 0,7 ocorrem com uma frequência de aprox. 40%, valores acima de 0,7 e abaixo de 0,3 não são muito frequentes, sua ocorrência verificada foi de 2,5% e 2% respectivamente. Outra informação que pode ser verificada é que, segundo a classificação das condições do céu baseado no valor do Kt, descrita por Liu e Jordan (1960), que considera que o céu é parcialmente nublado para valores de Kt entre 0,3 e 0,65; valores acima de 0,65 são classificados como céu claro e abaixo de 0,3 como nublado; foi observado que em 79,4% dos dias, o céu apresentou-se na condição de parcialmente nublado, 18,6% foram dias de céu claro e apenas 2% de céu nublado.

O gráfico da Fig. 7 apresenta as médias diárias mensais do Kt e seus respectivos desvios padrão.

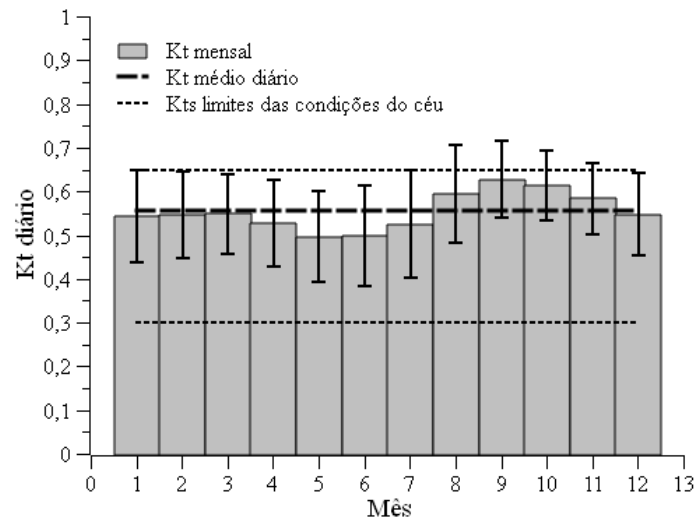


Figura 7 - Kt diário médio mensal.

No gráfico da Fig. 7, a linha tracejada mais grossa representa a média diária geral dos valores de Kt (0,555), as duas linhas tracejadas mais finas representam os dois limites dos critérios de classificação das condições do céu, baseado em Liu e Jordan (1960). Observa-se no gráfico que as médias dos meses de agosto a novembro apresentam-se com valores acima da média geral, suas barras de desvio ultrapassam o limite do céu parcialmente nublado. Os meses de maio e junho são os que possuem as menores médias de Kt. Janeiro, fevereiro e março são meses que possuem Kts próximos da média geral. Em relação à variabilidade dos valores de Kt, novembro é o mês com menor variabilidade e julho possui uma maior variação da transmitância atmosférica.

Para a análise das médias diárias anuais de Kt, observou-se inicialmente, o que recomenda Gallegos e Coquet (2013) sobre a falta de dados dos conjuntos dos anos, neste caso, foram desconsiderados aqueles anos que possuem mais que 10% de dias sem valores de radiação, ou seja, só estão apresentados, no gráfico da Fig. 8, anos com quantidade de dias com valores de radiação maiores que 330, com isto, apenas 23 dos 43 anos, ou seja 53% é que foram utilizados.

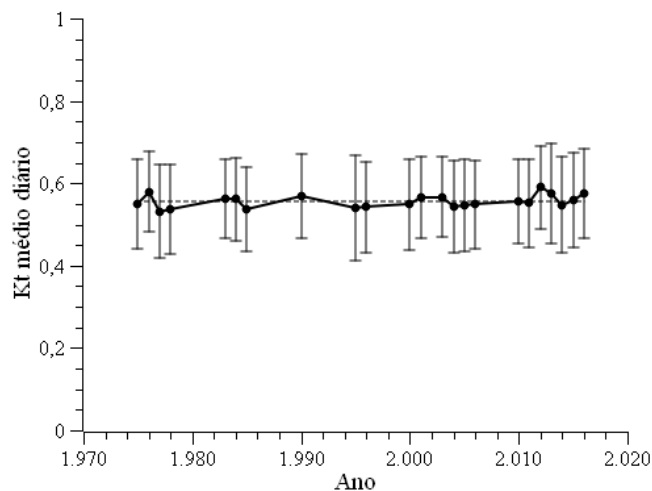


Figura 8 - Kt diário médio anual.

A partir do gráfico da Fig. 8, observa-se que a variabilidade dos Kts diários está em torno de 0,1. O ano com maior variabilidade foi 1995 e o com menor foi 1983. A linha tracejada do gráfico representa a média diária total (0,555), verifica-se que os anos de 2012, 2013, 2015 e 2016 ultrapassaram a média total. O teste de tendência de Mann-Kendall apresentou como estatística do teste (Z) 0,264 e o valor p foi de 0,081, o que indica que existe uma tendência de aumento da média de Kt diária. Para verificar como esta tendência de aumento está distribuída ao longo dos meses do ano, foi realizado o teste de Mann-Kendall para cada conjunto de dados diários médios mensal de Kt. A Tab. 5 apresenta os valores obtidos da estatística do teste (Z) e o valor P para cada mês.

Verifica-se a partir dos valores apresentados na Tab. 5 que apenas os meses de março, julho e setembro apresentam-se com tendência de aumento dos valores de Kt, destaca-se o mês de março com maior diferença entre |Z| e o valor P, o que indica uma maior tendência de aumento da média de Kt diário. Para os outros meses, julho e setembro, a diferença é menor, indicando uma fraca tendência. Para os meses em que a estatística |Z| é menor que o valor P, não há evidência de tendência de aumento ou redução de Kt.

Tabela 5 - Resultado do teste de Mann-Kendall para as médias diárias mensais.

Mês	Estatística (Z)	P-Valor
janeiro	0,01333	0,94414
fevereiro	-0,01505	0,91877
março	0,27094	0,04089
abril	0,12941	0,28045
maio	-0,03743	0,76686
junho	0,00215	1,00000
julho	0,19140	0,13474
agosto	-0,02419	0,85842
setembro	0,23492	0,04526
outubro	-0,07508	0,52161
novembro	0,15152	0,21304
dezembro	-0,07955	0,52525

3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados das análises do comportamento da temperatura e irradiação solar dos 43 anos, verifica-se que, o teste Mann-Kendall indicou a existência de uma tendência de aumento tanto das temperaturas máximas e mínimas quanto do Kt diário médio, o que consequentemente provoca um aumento da intensidade da irradiação solar que chega ao solo na localidade em estudo.

Há de se destacar que, durante a análise dos dados, na fase de qualificação, foi empregado um filtro novo que permite relacionar a insolação e a irradiação, o que possibilitou a identificação de alguns dias do banco de dados em que estas duas grandezas não se correspondiam. Este auxiliou na melhoria da qualidade dos dados empregados no estudo dos modelos.

Destaca-se que, embora diversos estudos apontem que a temperatura e a irradiação solar são fortemente correlacionadas, a tendência de aumento das temperaturas máximas e mínimas pode não estar apenas sendo causada pela elevação dos valores da irradiação solar. Estudos mais abrangentes precisam ser desenvolvidos para verificar as causas do aumento das temperaturas verificado nos últimos 13 anos. A isto, some-se a incerteza presente nos valores da irradiação solar que está embutida ao se considerar a utilização do modelo de Angström-Preseott mensal e a incerteza presente também na medição da insolação solar.

Considera-se por fim que, embora este estudo tenha apenas utilizado duas grandezas para avaliação de tendência, o fato constatado do incremento das temperaturas máximas e mínimas chama a atenção sobre as condições das simulações de longo prazo que são realizadas de plantas fotovoltaicas pois, a temperatura ambiente é um fator que influencia negativamente no desempenho da planta quando sua variação e tendência é no sentido do aumento de seu valor máximo, como observado neste trabalho. Por outro lado, a tendência de aumento da irradiância provoca um aumento da energia gerada.

A estes dois fatos conclui-se, utilizando-se o modelo desenvolvido por Ross (1980) para o cálculo da temperatura de operação de uma célula em um módulo fotovoltaico, que existe uma tendência de redução do desempenho do módulo ao longo do tempo causado pelo efeito combinado do aumento da temperatura ambiente e da irradiância.

Agradecimentos

O autor agradece ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) por fornecer os dados utilizados neste trabalho e ao IFPE Campus Pesqueira, pelos recursos de informática e espaço, disponibilizados para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Akinoglu, B. G. e Ecevit, A., 1990. Construction of a quadratic model using modified Angström coefficients to estimate global solar radiation. *Solar energy*, vol. 45, n. pp. 85-92.
- Almorox, J. e Hontoria, C., 2004. Global solar radiation estimation using sunshine duration in Spain. *Energy Conversion and Management*, vol. 45, n. 9-10, pp. 1529-1535.
- Angström, A. K., 1924. Solar and atmospheric radiation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 20, n. 121-126, pp.
- Belúcio, L. P., Silva, A. P. N., Souza, L. R. e Moura, G. B. d. A., 2014. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá (AP). *Revista Brasileira de Meteorologia*, vol. 29, n. 4, pp. 494-504.
- Chelbi, M., Gagnon, Y. e Waewsak, J., 2015. Solar radiation mapping using sunshine duration-based models and interpolation techniques: Application to Tunisia. *Energy Conversion and Management*, vol. 101, n. pp. 203-215.

- Ferreira, F. F. e Alves, J. M. B., 2015. Avaliação das mudanças climáticas no semi-árido do nordeste do Brasil. Engenharia Ambiental, vol. 12, n. 1, pp. 53-72.
- Gallegos, H. G. e Coquet, E., 2013. Acerca de la longitud de las series temporales de irradiación solar global con vistas a su aprovechamiento energético. XXXVI Reunión de trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio ambiente, Argentina.
- Kendall, M. G., 1975. Rank Correlation Measures., Charles Griffin.
- Liu, B. Y. H. e Jordan, R. C., 1960. The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation. Solar Energy, vol. 4, n. 3, pp. 1-19.
- Long, C. N. e Shi, Y., 2006. The QCRad Value Added Product: Surface Radiation Measurement Quality Control Testing, Including Climatology Configurable Limits.
- Mann, H. B., 1945. Nonparametric tests against trend.
- Ohmura, A. e Lang, H., 1989. Secular variations of global radiation in Europe. Current problems in atmospheric radiation., Hampton, Deepak.
- Pereira, E. B., Martins, F. R., Abreu, S. L. e Rüther, R., 2006. Atlas Brasileiro de Energia Solar. São José dos Campos, INPE.
- Prescott, J. A., 1940. Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. Transactions of the Royal Society of South Australia, vol. 64, n. pp. 114-118.
- Rabl, A., 1985. Active Solar Collectors and Their Applications. New York, Oxford University Press.
- Ross, R. G., 1980. Flat-Plate Photovoltaic Array Design Optimization. 14th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego-CA.
- Sahin, A. D. e Sen, Z., 2008. Solar irradiation estimation methods from sunshine and cloud cover data. Modeling Solar Radiation at the Earth's Surface. V. Badescu, Springer.
- Silva, R. A., Santos, D. N., Silva, V. d. P. R. d. e Cavalcanti, E. P., 2008. Tendência da radiação solar no Nordeste do Brasil com base nos dados do NCEP/NCAR. XV Congresso Brasileiro de Meteorologia, São Paulo.
- Silva, R. A. e., Silva, V. d. P. R. d., Cavalcanti, E. P. e Santos, D. N. d., 2010. Estudo da variabilidade da radiação solar no Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, vol. 14, n. 5, pp. 501-509.
- Silva, V. d. P. R. d., Silva, R. A., Cavalcanti, E. P., Braga, C. C., Azevedo, P. V. d., Singh, V. P. e Pereira, E. R. R., 2010. Trends in solar radiation in NCEP/NCAR database and measurements in northeastern Brazil. Solar Energy, vol. 84, n. pp. 1852-1862.
- Soler, A., 1990. Monthly specified Rietveld's correlations. Solar & Wind Technology, vol. 7, n. 2/3, pp. 305-308.
- Stanhill, G. e Cohen, S., 2001. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences. Agricultural and Forest Meteorology, vol. 107, n. 4, pp. 255-278.
- Tang, W., Yang, K., He, J. e Qin, J., 2010. Quality control and estimation of global solar radiation in China. Solar energy, vol. 84, n. pp. 466-475.
- Tiba, C., Ed. 2000. Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres. Recife, Editora Universitária da UFPE.
- Tiba, C. e Fraidenraich, N., 2004. Analysis of monthly time series of solar radiation and sunshine hours in tropical climates. Renewable Energy, vol. 29, n. pp. 1147-1160.

SOLAR IRRADIATION AND ENVIRONMENTAL TEMPERATURE TREND ANALISYS IN SEMI-ARID NORTHEAST USING LONG-TERM MEASURED DATA

Abstract. *There are several projects for photovoltaic solar power plants implantation in Brazilian northeast. Long term simulations are used due mainly the photovoltaic modules lifespan. However, numerous studies drive that there is a trend of environmental and whether variables. This work presents the results of a long-term data analysis in Arcoverde city located in semi-arid region. It was experimented insolation models to compose a daily solar irradiation data base for the time were there is not disposable data. The model that have gotten better statistical indicators was the monthly Angström-Prescott. Quality filters were used to guarantee that any measurement problem does not affect the analysis. The Mann-Kendall trend test was used, the daily maximum and minimum temperature presented strong increase trend in last 13 years. Related to the solar irradiance, it was also verified a low intensity increase trend in daily Kt. A monthly daily mean along the years showed that march presents the highest increase trend Kt followed by July and September, the other months did not present an increase trend. Though the environment temperature and solar radiation are correlated, this work points to the necessity of large studies be done to identify the trends causes. It can be highlighted that, in compliance with the highest temperature and irradiance increase trend, the long-term simulations must consider this rising to their results be near of long-term reality, that can affect the project viability.*

Key words: *Solar Irradiance, Environmental temperature, Mann-Kendall trend analysis.*