

AVALIAÇÃO DOS VALORES DE RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL OBTIDOS POR MEIO DA GERAÇÃO SINTÉTICA

Ana Lourdes Burgos Cavalcante Maciel – analourdesburgos@hotmail.com

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

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

Resumo. *Devido ao elevado custo dos equipamentos de medição de radiação solar global, utiliza-se como alternativa a geração de dados sintéticos, para avaliação da qualidade destes dados, faz-se necessário a realização de comparações entre os valores produzidos e medidos. Apresenta-se uma avaliação de um dos modos de geração de dados de radiação solar, que utiliza o método da cadeia de Markov. As séries de dados horários e diários foram geradas pelo programa Eletrificação Rural, posteriormente foram comparadas com dados medidos, utilizando-se a média, o desvio padrão e a distribuição de frequência dos erros. Verificou-se que os dados sintéticos diários obtiveram os melhores indicadores. Os dados sintéticos com 15 anos e modo de geração paralelo são os que melhor representam os dados medidos. Quando se compara o erro médio em função do valor da radiação, observou-se que o erro médio varia inversamente com o valor da radiação.*

Palavras-chave: radiação solar; geração sintética de dados; cadeia de Markov.

1. INTRODUÇÃO

A população mundial, em especial os estudiosos, sempre foi interessada nos níveis de radiação solar em diferentes locais da Terra, desde as menores áreas até a superfície global. Isso se deve ao fato de que, desde a concepção da vida, ou seja, do surgimento das células mais primitivas, foi a radiação uma das principais causadoras da mutação genética inicial; portanto, ela está diretamente relacionada à existência da vida e ao conforto humano; como defende Pereira (2014): “não é preciso esforço para reconhecer a importância da radiação solar no dia-a-dia. Graças a esta, e ao complexo e delicado equilíbrio energético da atmosfera, são mantidas as condições para a manutenção de nosso clima, tão diferente dos existentes em planetas vizinhos e estéreis, como Vênus e Marte”.

Assim, como na criação da vida na Terra, o Sol emite diariamente energia para o espaço, espalhada em várias faixas de onda distribuídas pelo espectro eletromagnético, tornando assim a radiação solar uma importante fonte de energia para a Terra e as demais formas de energia (química, mecânica, hidráulica, eólica e outras), derivadas direta ou indiretamente da energia solar.

Para Vilela (2010) “o estudo da radiação solar que chega à superfície da terra é de fundamental importância dentro do contexto das mudanças climáticas globais e suas aplicações vão desde a compreensão do clima do planeta até a otimização de sistemas de energia”, portanto o estudo da intensidade desta radiação em certo local e em determinado tempo tem grande importância tanto para a captação de energia solar, para conversão em energia elétrica e/ou térmica; como para outras áreas, como a agricultura e a meteorologia. O desenvolvimento dos dados estatísticos iniciais era modesto, mas, numa fase mais madura da meteorologia, ocorreu um estudo mais detalhado deles. Devido a esses estudos, foi possível relacionar a radiação solar a uma das principais alavancas do sistema climático, bem como ao estudo dela a fim de satisfazer interesses nas áreas da engenharia para o desenvolvimento dos sistemas solares fotovoltaicos e térmicos.

Em relação aos dados solarimétricos, o método utilizado para análise era muito complexo, pois requeria um estudo maior do funcionamento desse sistema e só poderia ser aplicado a um pequeno número de situações meteorológicas. Segundo Siqueira (2008, apud Tiba et al., 2001), o principal motivo da carência dessas informações é a ampla extensão territorial do país e o alto custo dos equipamentos utilizados para essa medição, que chegam a custar R\$ 80.000,00.

Para contornar esse problema, foram desenvolvidas várias alternativas, como:

- estimar a radiação por correlação com outros parâmetros, destacando-se, entre esses parâmetros, a nebulosidade, a temperatura e a insolação, que é o número de horas de sol entre o nascer e o pôr do sol; porém Aguiar defende que “ainda não se conseguiu demonstrar a generalidade da aplicação de qualquer das metodologias/correlações propostas para os vários locais/climas particulares estudados”.

- estimar a radiação por detecção remota, que se baseia na observação por satélites dos valores de radiação refletidos pelas áreas de interesse. Onde o valor da radiação extraterrestre que é de $I_{sc} = 1366,1 \text{ Wm}^{-2}$ (ASTM, 2006); podemos obter o valor da radiação da superfície pela subtração do valor da radiação extraterrestre e o valor da radiação refletida captada pelos satélites. Segundo Aguiar (1996), esta é a única forma de obtenção em grandes zonas da Ásia, África, América do Sul e Oceania;

- estimar, a partir dos modelos climáticos estatísticos, nesta alternativa, existe duas possibilidades de obtenção dos dados: pelo modelo termo-hidrodinâmico e de balanço do sistema climático, que desenvolve modelos (equações) dos

dados históricos de cada localidade, prevendo o futuro que segundo Aguiar (1996) “ dos que existem seria em principio obter séries dos parâmetros desejados recuperando campos meteorológicos arquivados, ou então, seria possível utilizar modelos para algumas décadas, a partir de uma situação inicial com condições de fronteira (sazonais) plausíveis”; e pelos modelos estocásticos que descrevem parâmetros e sequências de eventos no tempo em que voltam a ocorrer em determinado tempo.

Dos métodos citados de obtenção desses dados de radiação solar global, destaca-se neste trabalho o método de geração sintética de dados, utilizando-se a cadeia de Markov, um modelo estocástico, que foi inicialmente desenvolvido para aplicação de geração de séries sintéticas aplicadas à energia solar, por Aguiar et al. (1988).

Portanto, o objetivo desse trabalho é analisar a eficácia do sistema de geração sintética por meio da cadeia de Markov, em comparação com os dados reais de medição. Para isto, foram simulados os dados de radiação solar diária e horária produzidos por este método, avaliando-se e comparando-se estes a partir de suas médias com os valores obtidos por um piranômetro no período de um ano.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para entendermos como funciona este método de obtenção de dados, com auxílio da bibliografia, destacamos algumas definições.

Segundo Aguiar (1996, p. 7), “a necessidade de modelar séries climatológicas sintéticas só existe uma vez que se demonstre a inexistência de dados observados apropriados”. Mas os sistemas sintéticos de geração de dados dependem dos dados disponíveis, já que necessitam de dados de entrada. A obtenção dos dados de irradiação solar é um processo complexo. Os sistemas de medição da irradiação solar possuem duas grandes limitações no Brasil: uma é o pequeno número de aparelhos implantados para medição que se deve à grande extensão territorial; e a outra é o elevado preço dos equipamentos aliado às dificuldades da manutenção adequada.

A publicação regular de dados mensais pelos Serviços Meteorológicos Nacionais como exemplo o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e o Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPTEC) é uma prática padrão, nomeadamente para a temperatura, a precipitação, a umidade e o vento; inclusive para a insolação também existe alguma abundância de dados. No caso da irradiação solar, a situação não é tão simples, mas ainda assim a disponibilidade de dados mensais é bem melhor que no caso dos valores diários e horários.

Mesmo assim, é muito difícil a aquisição de dados em um período de 20 anos (aproximadamente o tempo de vida útil de um sistema solar fotovoltaico ou solar térmico). Isso também se deve ao fato de a prática regular da medição da radiação solar ser recente. Esse período, contudo, é importante porque é a partir dessa quantidade de dados que podemos analisar o ruído climático interanual.

Portanto, as principais fontes desses dados são as instituições que estudam energia solar, como a UFPE e os Anuários Climatológicos e Boletins dos Serviços Meteorológicos Nacionais. Algumas informações também são encontradas nas revistas especializadas e nos congressos que envolvem o tema energia solar, diferentemente de outras localidades mundiais, que possuem Atlas Solarimétricos com maior número de dados.

As disponibilidades dos dados de radiação possuem grandes deficiências, principalmente quando se trata dos dados de radiações horárias e diárias. Contudo, com base nas informações climatológicas, podemos ter os valores médios da radiação mensal. Para então, suprir esses défices dos valores observados, recorreremos às séries sintéticas. Segundo Aguiar (1996, p. 14), “as séries sintéticas devem ser estatisticamente indistinguíveis das séries que potencialmente se podem observar na natureza”.

Das diversas abordagens da modelação do clima, destacamos em especial o modelo Markoviano, que modela as séries pelo processo da “cadeia de Markov”, em que os dados variam em um instante t de acordo com os valores de K dos instantes anteriores de uma contribuição aleatória, independentemente do histórico de dados. Esse modelo, que se baseia em um grande banco de dados de um período, cria um sistema climático o qual possui um padrão para os ciclos climatológicos, considerando que o estado climático de certa data não se repete em um período com total exatidão. Apesar de esses sistemas solicitarem investimentos modestos, tanto humanos quanto tecnológicos, as séries sintéticas são obtidas com baixo custo.

O programa “eletrificação rural” utiliza esse método da cadeia de Markov para gerar os dados sintéticos, foi desenvolvido pelo grupo de pesquisa em fontes alternativas de energia-FAE-UFPE, com a finalidade de servir como uma ferramenta de projetos e geração de sistemas fotovoltaicos autônomos (eletrificação rural e outros).

3. METODOLOGIA

Os dados utilizados, medidos por meio de um piranômetro tipo termopilha, foram adquiridos por Leal (2011) durante o desenvolvimento de sua tese de doutorado no GFAE-UFPE (Grupo de Fontes Alternativas de Energia). Os valores da radiação solar foram registrados a cada minuto. Para que seja possível a análise dos dados simulados, são necessárias duas etapas: a de formatação dos dados, momento em se calcula os valores das médias horárias, as quais serão utilizadas para obter as médias mensais durante um ano; e a etapa de tratamento dos horários, necessária para obter os intervalos de radiação válidos, ou seja, do nascer e do pôr do sol.

Etapa de tratamento dos horários:

1. Cálculo da declinação do Sol (δ): de acordo com Fraidenraich e Lyra (1995), é o ângulo de inclinação do eixo de rotação da Terra em relação ao plano que contém a trajetória terrestre. Posteriormente foi calculada a hora angular solar (w_s), considerando-se que, durante as 24 horas do dia, como o deslocamento angular do Sol é de 360° , pode-se aplicar a seguinte relação Eq. (1):

$$\frac{t_s}{24} = \frac{w_s}{360} \quad (1)$$

Onde, t_s é a duração entre o amanhecer e o meio dia solar, que é igual à duração do meio dia solar ao pôr do sol.

2. 1. Cálculo da hora solar do amanhecer do sol (HAS) Eq. (2):

$$HAS = 12 - t_s \quad (2)$$

2. 2. Cálculo da hora solar do pôr do sol (HPS) Eq. (3):

$$HPS = 12 + t_s \quad (3)$$

3. Para finalizar essa etapa, o cálculo da conversão das horas de HAS (hora solar do amanhecer do sol) e HPS (hora solar do pôr do sol) para hora oficial, torna-se a hora do amanhecer local (HAL) e a hora do pôr do sol local (HPL), a longitude padrão oficial, para as cidades dentro do horário de Brasília, que é de $L_S = +45^\circ$; e a longitude local em decimal, a qual, para o nosso caso de Recife, será de $L_L = +34,955225^\circ$.

Etapa de formatação dos dados:

A formatação dos dados, começamos a selecionar apenas os válidos, ou seja, os que estão no intervalo entre o nascer e o pôr do sol de cada dia, de forma que fosse permitido o cálculo da energia horária, diária e mensal.

1. Calculando a energia horária E_h , que é a integral da potência pelo tempo, temos a seguinte Eq. (4):

$$E_h = \int_{t_2}^{t_1} P dt \quad \therefore \quad E_h = \sum_{t_1}^{t_2} P \Delta t \quad (4)$$

2. Como estamos calculando a energia de cada hora, o valor de Δt será de $1/60$; assim podemos escrever a Eq. (5):

$$E_h = \frac{\sum P}{60} \quad (5)$$

Por existirem 60 valores da potência (radiação), verificamos que a Eq. (4) torna-se a Eq. (6):

$$E_h = \frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_{60})}{60} \quad (6)$$

3. Como para cada horário, há uma média da radiação, denominada de média horária, a soma dessas médias, obtém-se a energia diária horária, E_D , ou seja, a energia de cada dia Eq. (7):

$$E_d = \sum E_h \quad (7)$$

Feito isso para os trezentos e sessenta e cinco dias do ano, agrupando posteriormente esses valores de energia diário-horários em cada mês e calculando, então, a média de cada mês, obtivemos a energia mensal-diária.

Com as doze médias da energia mensal-diária obtidos dessas formatações e cálculos, inserimo-los no programa “Eletrificação Rural” que obtém sinteticamente, valores simulados dos dados diários e horários. Foram geradas, assim, seis tipos de grupo de dados sintéticos, discriminadas em duas categorias: paralelo, que obtém os dados de cada ano separadamente, e em série que leva em consideração os dados dos anos anteriores e em três períodos de 5, 10 e 15 anos.

A partir desses seis grupos de dados simulados planejados passamos aos cálculos dos erros, que encontramos pela Eq. (8):

$$E(\%) = \frac{(E_m - E_s)}{E_m} \times 100\% \quad (8)$$

Onde, E é o erro; E_m é a energia medida (diária ou horária) pelo piranômetro e E_s é a energia simulada dos seis grupos de dados gerados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como resultado da metodologia descrita, foram comparados os dados de radiação diária e horária, sintéticas e medidas, de acordo com os três tipos de períodos. Foram utilizados como parâmetros de análise a média, a distribuição de frequência e o desvio padrão dos períodos. Destes dados horários dos três períodos foram selecionados os dados entre o intervalo de oito à dezesseis horas.

A Fig. 1 mostra os valores da média dos erros dos tipos de geração, paralelo e série, dos períodos simulados (5, 10 e 15 anos) para os intervalos diários e horários.

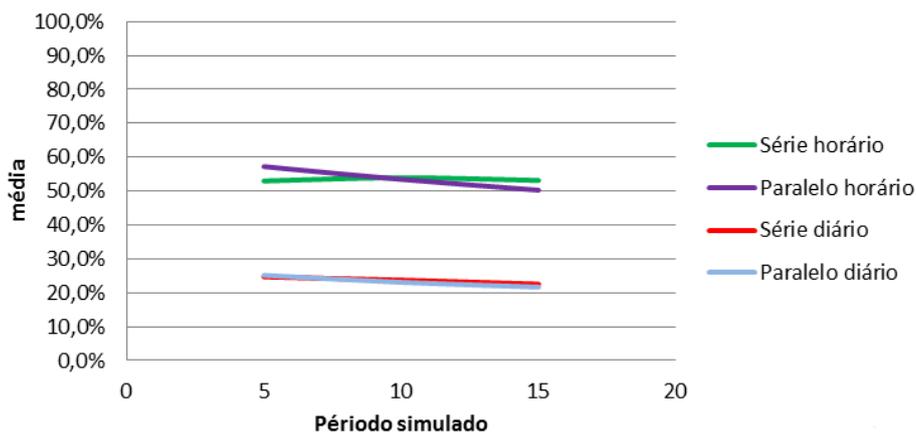


Figura 1 – Erro médio das categorias geradas.

Na Fig. 1, destaca-se que, ao longo dos períodos analisados os valores das médias dos erros diminuem, porém notamos que esses valores decaem lentamente ao decorrer desses períodos onde consideramos para este trabalho constante essa redução; também analisamos que para os erros das categorias horárias o erro dobra em comparação com os erros das categorias diárias, isso ocorre devido ao grande número de dados simulados onde ao calcular os erros os mesmos aumentam.

Esse resultado já foi defendido por Aguiar (1996). Segundo este autor, ao aumentar o período simulado, os parâmetros de análise do erro diminuem, porém ele não revela o quanto diminui. Para o caso específico apresentado neste trabalho, diminui pouco, por isso podemos considerar como constante.

A Fig. 2 retrata os valores de distribuição de frequências, considerando os dados de porcentagem que possuem erro igual ou menor que trinta por cento, para os dados dos erros de radiação das seis categorias geradas.

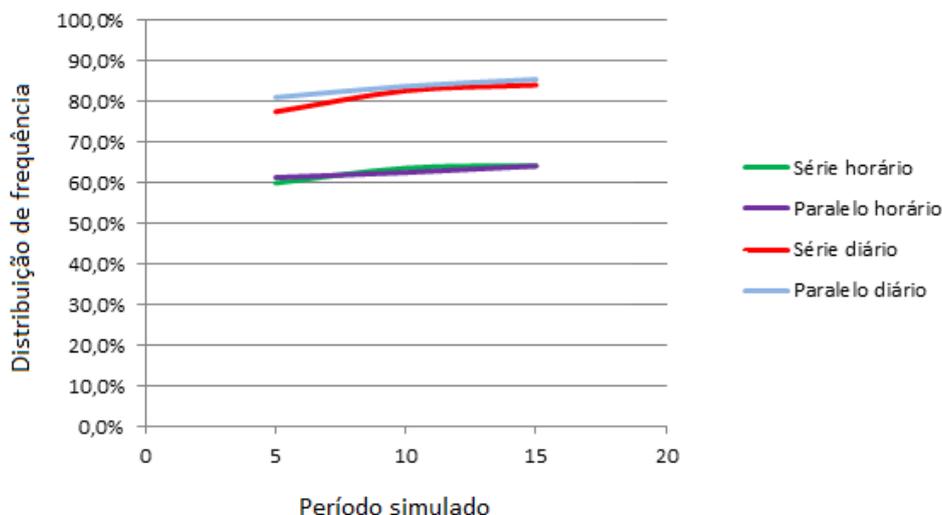


Figura 2 – Percentual de erros menores que 30% para categorias geradas.

Na Fig. 2, observa-se que, com o aumento do período simulado, ocorre uma elevação da quantidade de dados com erro menor que 30%. Também nota-se que existe um maior número de dados com erros menores que 30% nas categorias diárias em comparação com as categorias horárias.

Na Fig. 3 encontramos os valores do parâmetro desvio padrão para as seis categorias de dados gerados.

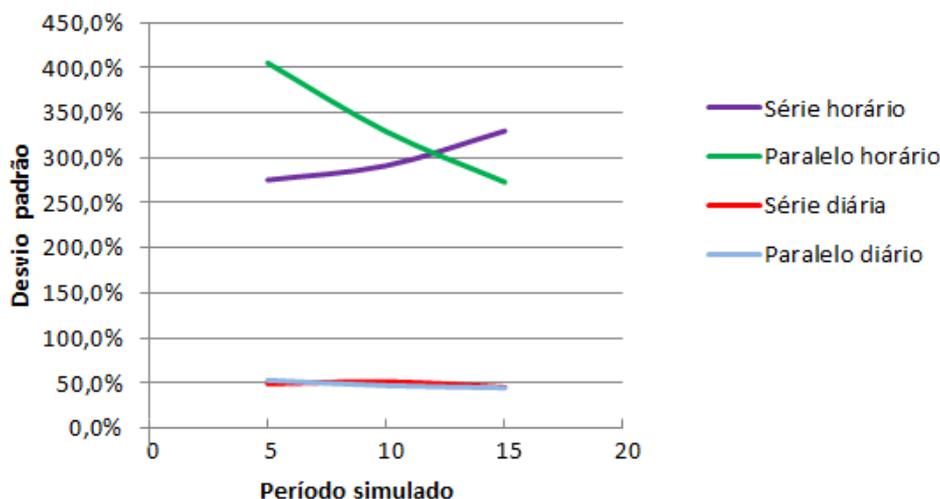


Figura 3 – Desvio padrão das categorias geradas

Na Fig. 3, descreve-se o comportamento do valor dos desvios padrão para as categorias diárias e horárias, observa-se que o desvio padrão dos erros diários permanece aproximadamente constante quando aumentamos o período simulado. Para a categoria, paralelo horário, nota-se uma diminuição significativa ao longo dos períodos simulados. Para a geração, paralelo horária de cinco anos, os valores encontram-se mais dispersos do que para geração, paralelo horária de quinze anos estando, portanto, mais próximos da média; e para categoria série horário temos um aumento ao longo do período simulado o que não era esperado, já que o autor Aguiar (1996) defende que ao aumentarmos o período simulado haveria um menor espalhamento dos dados.

Outro resultado foi obtido quando comparado qual dos seis possibilidades de geração utilizadas, possui a menor taxa de erro, apresentadas nas Tab. 1 e Tab. 2. Assim, para os três parâmetros do erro, encontramos:

- Para geração sintética dos dados horários;

Tabela 1 - Máximos e mínimos dos parâmetros para dados horários.

	Máximo	Mínimo
Média	57,2%	50,3%
Distribuição de frequência	64,2%	60,0%
Desvio Padrão	405,3%	273,1%

	Máximo	Mínimo
Média	5 anos paralelo	15 anos paralelo
Distribuição de frequência	15 anos paralelo	5 anos série
Desvio Padrão	5 anos paralelo	15 anos paralelo

Na Tab. 1, identificamos que ao exibir os menores valores dentre as seis categorias horárias geradas para a média e o desvio padrão, e o maior valor da distribuição de frequência, ou seja, uma quantidade maior de valores com erro menor que trinta por cento, a melhor categoria de geração sintética de dados horários é a dos quinze anos paralelo.

Os maiores valores para a média e desvio padrão foram verificados na categoria de geração cinco anos paralelo. A geração tipo cinco anos série apresentou a menor quantidade de dados como erros menores que trinta por cento, portanto as duas categorias citadas apresentaram menor desempenho nesse teste.

- Para geração sintética dos dados diários

Tabela 2 - Máximos e mínimos dos parâmetros para dados diários.

	Máximo	Mínimo
Média	25,1%	21,7%
Distribuição de frequência	85,5%	77,5%
Desvio Padrão	53,1%	44,6%

	Máximo	Mínimo
Média	5 anos paralelo	15 anos paralelo
Distribuição de frequência	15 anos paralelo	5 anos série
Desvio Padrão	5 anos paralelo	15 anos paralelo

Na Tab. 2, analisamos que os parâmetros (média, distribuição de frequência e desvio padrão) exibiram comportamento idêntico ao dos dados horários, chegando às mesmas conclusões apresentadas sobre a geração sintética dos dados horários.

Observamos que, o tipo de geração de dados que apresenta os melhores resultados, ou seja, a categoria com maior quantidade de valores mínimos, obtidos para os parâmetros, média e desvio padrão, e a que possui o valor máximo para

o parâmetro distribuição de frequência, a geração tipo paralelo com período de quinze anos, tanto para valores de radiação horária quanto diária.

Outra análise efetuada foi a variação do erro médio dos dados diários em função do valor da radiação como observado na Fig. 4, foram escolhidas as categorias com melhor e pior desempenho em relação à média.

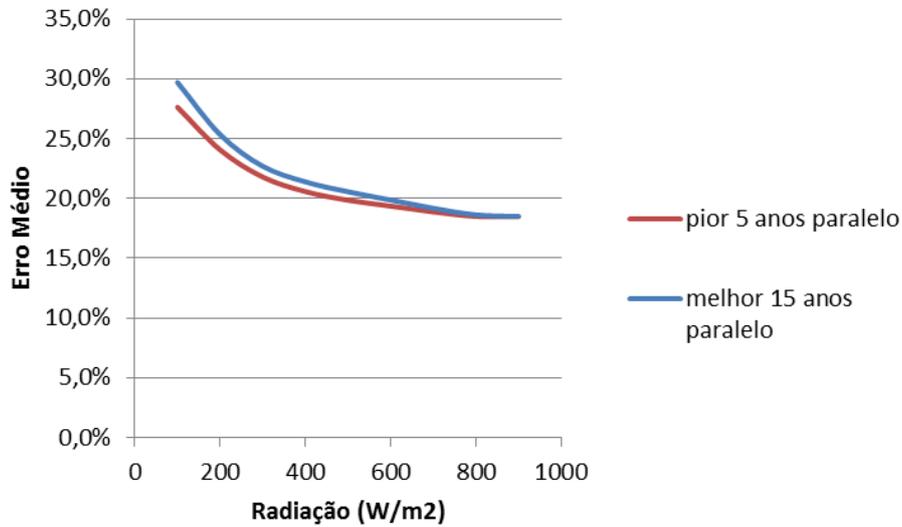


Figura 4 – Variação do erro médio em função da radiação.

Observamos que ao aumentar a radiação o erro médio diminui, portanto para radiações que geram maiores quantidades de energia, o programa simula dados com menos erros, ou seja, mais precisos, mais próximos do medido. Isso demonstra que mesmo na pior categoria de geração ao considerar os valores de radiação o erro é igual ao da melhor categoria de geração.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou uma análise sobre a qualidade dos valores de radiação obtidos por meio da geração sintética da cadeia de Markov. Verificou-se neste trabalho que, as séries diárias de radiação, com sequência de 15 anos, são as que apresentaram melhores índices nos indicadores propostos, média, desvio padrão e distribuição de frequência, portanto, representando de modo mais realístico os dados reais.

As séries horárias se apresentam com erros médios e desvios padrão maiores, devido à grande falta de correlação entre os eventos climáticos locais no horizonte de uma hora e os valores de kt gerados pelo modelo de Markov.

Verificou-se que, em relação à intensidade da radiação diária, o valor médio dos erros tem comportamento inverso, ou seja, para valores de radiação diária altos, os erros são menores e vice-versa, o que permite concluir que para os valores mais significativos de radiação, aqueles que permitem obter maior quantidade de energia, a simulação reproduz melhor os mesmos, o que possibilita a avaliação de sistemas de geração de energia solar, utilizando valores de radiação sintéticos, com menores desvios em relação à realidade.

Agradecimentos

Agradece-se ao GFAE-UFPE (Grupo de Fontes Alternativas de Energia da Universidade Federal de Pernambuco) pela disponibilização dos valores de radiação global utilizados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aguiar, Ricardo. **Estatística da radiação solar**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1996.
- Aguiar, R. J.; Collares-Pereira, M. e Conde, J. P. Simple Procedure For Generating Sequences of Daily Radiation Values using a Library of Markov Transition Matrices. **Solar Energy**. Vol. 40, No. 3. pp. 269-279. 1988.
- ASTM, American Society for Testing and Material. Solar Constant and Zero Air Mass Solar Spectral Irradiance Tables, **E490-00a**, 2006.
- Fraidenraich, Naum; Lyra, Francisco. **Energia solar: fundamentos e tecnologia de conversão heliotermoeletrica e fotovoltaica**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 1995.

Leal, Sergio da Silva. **Medição, análise e mapeamento da radiação solar UV no Estado de Pernambuco**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2011.

NASA, Disponível em: <http://www.nasa.gov/centers/goddard/news/topstory/2008/solar_variability.html> Acessado em 26 de junho de 2013, às 22h48min.

Perreira, Enio Bueno; Colle, Sérgio. Disponível em: <http://www.fisica.uems.br/arquivos/fismeioamb/energia_solar.doc> Acessado em 03 de fevereiro de 2014, às 12h44min.

Siqueira, Adalberto Nunes de. **Geração sintética da irradiação solar no Brasil para aplicações energéticas**. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2007.

Tiba, C.; Fraidenraich, N.; Grossi, H.; Lyra, F. **Atlas solarimétrico para localidades brasileiras**. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2001.

Vilela, Waldeir Amaral. **Estudo, desenvolvimento e caracterização de radiômetros para medidas da radiação solar**. Tese (doutorado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. Curso de Pós-graduação em engenharia e tecnologia espacial/ciência e tecnologia materiais e sensores, 2010.

EVALUATION OF GLOBAL SOLAR RADIATION VALUES OBTAINED THROUGH SYNTHETIC GENERATION

Abstract. *Due to the elevated prices of the equipment for global solar radiation measurement, it has been used, alternatively, the generation of artificial solar data. It has been necessary to make comparisons between artificial data and measured values. It's presented an analysis of a solar radiation data generation mode which uses the method of Markov chains. Hour and dairy data were produces by the software "Eletrificação Rural", after that they were compared to the measured values, it was used the mean, standard deviation and the frequency distribution of the errors. The diary artificial data achieve best indicator. Artificial data produced with 15 years in parallel represent more accurately the measured data. It's has seen that the mean error depends inversely on the solar radiation value when the mean error is compared as a function of the radiation value.*

Key words: solar radiation; data artificial generation; Markov chain.