



COMPARAÇÃO ENTRE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR MEDIDAS POR ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS NO ESTADO DE SERGIPE COM VALORES ESTIMADOS A PARTIR DE IMAGENS DE SATÉLITE

José Claudeni O. Lima, jcolima@yahoo.com¹

Flávio S. C. Bispo, flavio.santiago.bispo@hotmail.com¹

Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com²

¹Universidade Federal de Sergipe, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,

²Universidade Federal de Sergipe, Departamento de Engenharia Mecânica.

Resumo: Este artigo tem como objetivo avaliar a integridade dos dados de radiação solar coletados por estações meteorológicas automatizadas (EMA) instaladas no estado de Sergipe e pertencentes ao Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, comparando-se tais dados com valores estimados a partir de imagens de satélite, disponibilizados pelo National Renewable Energy Laboratory-NREL.

A partir de observações feitas pelos gráficos gerados e por análise de indicadores estatísticos ($rMBE$ e $rRMSE$) calculados, concluiu-se que as duas bases de dados são similares, tomando como referência as mesmas localidades e o mesmo intervalo de datas.

Palavras-chave: energia solar, irradiância global horizontal, estações meteorológicas automatizadas, imagens por satélites

1. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com o meio ambiente devido as constantes alterações de condições climáticas e pela persistência de algumas nações em adotarem matérias-primas de origem fósseis para geração de energia tem mobilizado a comunidade de pesquisa a propor novas abordagens e tecnologias alternativas que visem atender a demanda da sociedade por energia com menor impacto possível à natureza.

No contexto das tecnologias alternativas de energia ou, segundo a ANEEL (2008), “outras fontes” abrangem a energia eólica, solar, das marés, geotérmica, biomassa, entre outros. Em comum, elas permitem não só a diversificação, mas, também, a “limpeza” da matriz energética local ao reduzir a dependência dos combustíveis fósseis, tais como carvão e petróleo, responsável pela emissão de grande parte dos gases que provocam o efeito estufa (ANEEL, 2008).

A energia solar, em específico, é limpa e utiliza uma fonte inesgotável de matéria-prima, o Sol. Assim, o levantamento e planejamento do recurso solar em determinada localidade é de alto valor estratégico para fornecedores de energia e investidores. De acordo com Sengupta et al (2015), a variabilidade do recurso solar é a maior incerteza na previsão de performance e viabilidade financeira de um projeto de planta solar. Dados de irradiância confiáveis e avaliações apropriadas reduzem o risco na escolha do local de instalação, na previsão de geração anual e na definição de estratégias de operação do empreendimento.

Logo, a obtenção de dados confiáveis de irradiação global se torna imprescindível para estimar e viabilizar sistemas de energia solar sejam eles: sistemas fotovoltaicos, coletores e concentradores solares tanto para uso doméstico quanto industrial. Neste sentido, o presente trabalho propõe comparações entre valores de irradiação global horizontal obtidos por Estações Meteorológicas Automáticas (EMA) e disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com os dados obtidos por satélites pelo NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) e disponibilizados no banco de dados NSRDB (*National Solar Radiation Database*) para as cidades sergipanas de Aracaju, Brejo Grande, Carira, Itabaianinha e Poço Verde com a finalidade de estabelecer relações estatísticas confiáveis e avaliar as bases em estudo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Irradiância Global Horizontal

A radiação total que incide sobre uma superfície inclinada, inclui as duas componentes, direta e difusa, mais uma parcela devida à radiação refletida na superfície e nos elementos do entorno, que é função do albedo do local (Trajano, 2010).

Informações mensais e anuais, confiáveis e precisas, sobre os diferentes componentes de radiação solar, são necessários para projetos de sistemas de energia solar concentrada (CSP- Concentrated Solar Power), que estão primeiramente interessados na irradiação normal indireta (DNI - Direct Normal Irradiance), e coletores planos

(fotovoltaicos ou térmicos) que requerem boas previsões de irradiância global horizontal (GHI - Global Horizontal Irradiance). (Polo, 2015).

Estas informações podem ser obtidas a partir de diferentes fontes de dados, tais como medições em solo por piranômetros ou células de referência ou derivada de dados de satélite (Espinar, 2009).

Muitos trabalhos na literatura (Pereira et al, 1996; Pereira et al., 2006; Marciotto, Oliveira e Escobedo, 2008; Trajano, 2010; Boyo e Adeyemi, 2011) têm se preocupado em investigar a qualidade e a credibilidade de dados hospedados em bases e compará-los com valores medidos por sensores.

Em (Pereira et al., 1996) estimativas de satélite são comparadas com dados terrestres de 22 estações para calcular médias mensais de média radiação solar incidente diária sobre o Brasil. Marciotto, Oliveira e Escobedo (2008) realizaram uma comparação entre medidas de insolação obtidas na plataforma micrometeorológica do IAG (PM-IAG) e as estimativas de satélite com a finalidade de validar medidas isoladas da PM-IAG para região metropolitana de São Paulo. Trajano (2010) utilizou dados solarimétricos inéditos resultantes do projeto SWERA (*Solar and Wind Energy Resource Assessment*) para estudo do potencial de desempenho energético de Sistema Fotovoltaico Concentrado (SFVC) no Brasil.

O “Atlas Brasileiro de Energia Solar” (Pereira et al., 2006) utiliza valores de irradiação obtidos com o modelo BRASIL-SR, os quais são validados por meio de comparação com valores medidos em superfície em estações distribuídas pelo território brasileiro. Boyo e Adeyemi (2011) realizaram uma comparação dos dados de radiação solar medidos através do satélite da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) com os medidos em terra por Piranômetro obtidos pela Agência Meteorológica Nigéria Oshodi.

Assim, segundo Liu (2015), as informações de sensoriamento remoto, via satélite, fornecem dados de observação com alta frequência temporal e alta resolução espacial. Podem ser usados para complementar as áreas com poucos dados de medições em campo disponíveis. Geralmente, os dados coletados na superfície não coincidem bem com os dados via satélite, pois os primeiros são pontuais, enquanto os segundos, são valores médios de uma área ocupada por um *pixel* que varia de acordo com a resolução espacial. Apesar dos dados via satélite apresentarem menor acurácia, fornecem melhor estimativa em áreas maiores, com mais eficiência e menor custo.

2.2 Índices estatísticos

De acordo com Sengupta (2015), embora não exista um método padronizado para verificação da precisão de modelos baseado em dados de satélites meteorológicos, os autores da área, na sua maioria, utilizam os seguintes indicativos estatísticos: erro médio relativo (rMBE – *relative Mean Bias Error*) e a raiz quadrada do erro quadrático médio relativo (rRMSE - *relative Root Mean Square Deviation*).

Apesar do objetivo deste trabalho não ser a validação de qualquer modelo, foram utilizados os dois indicativos, apresentados acima, para se comparar os valores de GHI (*Global Horizontal Irradiance*) obtidos pela estação meteorológica do INMET com os obtidos no banco de dados do NREL. Seguem as equações para o cálculo do rMBE e do rRMSE:

$$rMBE(\%) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{A_i - C_i}{A_i} \right| \quad 1)$$

$$rRMSE(\%) = \frac{100 \cdot n}{\sum_{i=1}^n A_i} \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - C_i)^2} \quad 2)$$

onde A_i representa os valores medidos, C_i representa os valores estimados e n é a quantidade de amostras.

Valores positivos para rMBE indicam que os valores medidos estão superestimados, enquanto que valores negativos indicam valores medidos subestimados. Quanto menor o valor absoluto de rMBE, melhor será a correlação das duas bases de dados. Este indicativo fornece informações sobre o desempenho de longo prazo. Já o rRMSE fornece informações sobre o desempenho de curto prazo e ajuda a conhecer como está o espalhamento ou ajustamento entre os dados das duas bases. O rRMSE sempre apresentara valores positivos e, baixos valores são desejados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Esta seção aborda os procedimentos metodológicos para realização da tarefa proposta. Assim, como supracitado, a tarefa consiste em comparar e avaliar o uso de base de dados de irradiação solar global (H) obtidos por meio do INMET com os obtidos pelo satélite NSRDB, bem como validar o uso dessas em sistemas de energia solar.

A metodologia segue em obter os dados de irradiação solar global das duas bases de dados para as cidades sergipanas de Aracaju, Brejo Grande, Itabaianinha, Carira e Poço Verde, conforme ilustra a Fig. (1), e compará-las por meio de



gráficos e indicadores estatísticos. Essas cidades foram selecionadas devido à possuírem estações meteorológicas locais. Em adição, os dados são referentes ao mês de dezembro de 2015, isto porque, a base fornecida pelo NSRDB disponibiliza informações do ano de 2015, o mais recente, enquanto a base do INMET divulga um histórico com apenas 365 dias contado da corrente data de pesquisa.

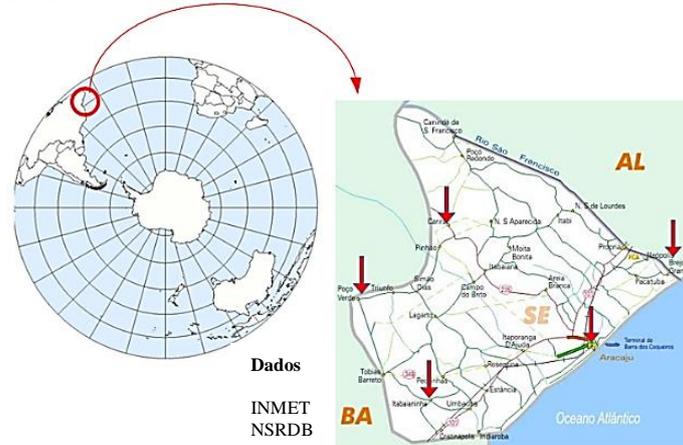


Figura 1 -Localização espacial de cidades analisadas.

Como os sensores são susceptíveis a erros, algumas informações de radiação podem não estar presentes no banco. Neste caso, é indicado que a base do INMET passe por um pré-tratamento que corresponde em: (i) estimar dados faltantes por meio da técnica de ajuste de curva para polinômio cúbico e (ii) ajustar o fuso horário para a localidade, a qual conta com atraso de 3 h com relação ao GMT.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados nesta seção são gerados através do *software* MatLab, os quais correspondem, (i) a análise e comparação entre as duas bases para as cinco localidades, e (ii) a análise específica entre os dados das cidades de Brejo Grande (região Norte do Estado) e Itabaianinha (região Sul do Estado).

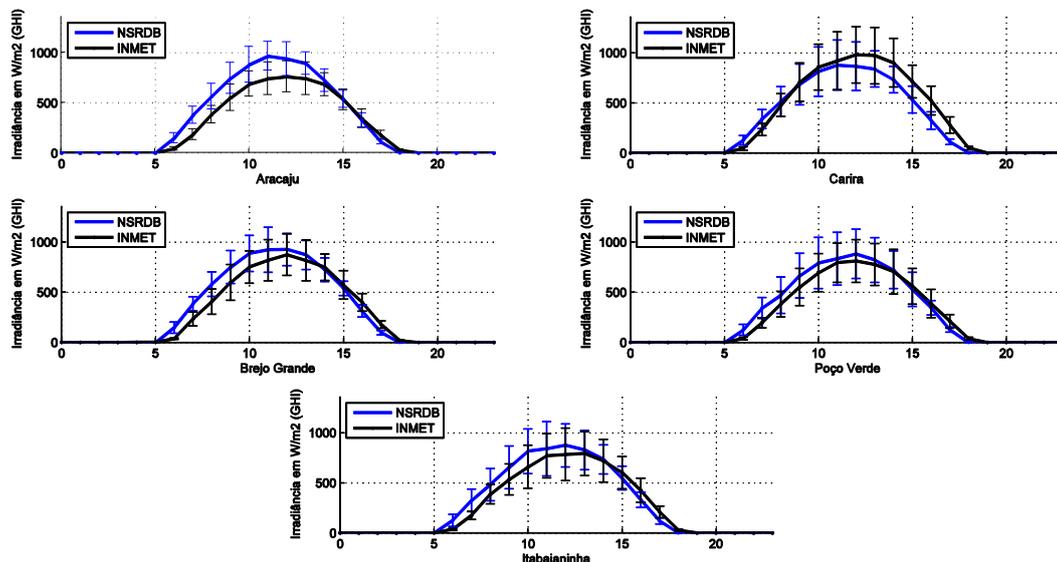


Figura 2 – Médias e desvios padrões horários do mês de dezembro para as cinco localidades pesquisadas.

A Fig. (2) mostra cinco gráficos relativos aos perfis médios mensais, bem como os desvios padrões para as cidades observadas. Os dados em linha azul no gráfico representam as estimativas do satélite e os dados em linha preta representam os valores obtidos pelos sensores nas bases automáticas. Logo, percebe-se que, embora se trate do mesmo período de tempo (1 de dezembro de 2015 à 31 de dezembro de 2015), os valores médios do INMET com relação aos do satélite NSRDB são, no geral, mais sensíveis as variações de radiação solar (preciso), embora apresentem maiores dispersões.

Ainda, observa-se que os dados horários do satélite estão, em geral, mais elevados que os do INMET (exceção a cidade de Carira). Isso é devido a consistência dos valores do satélite que são gerados por modelos matemáticos robustos e representam uma área maior de detecção, 4 km^2 .

De forma específica, os gráficos de Itabaianinha e Brejo Grande apresentam semelhanças durante a evolução horária média para ambas as bases. Assim, as Figuras a seguir apresentam valores instantâneos diários para o último trimestre dessas duas localidades com a finalidade de se observar o comportamento da irradiação solar.

A Fig.(3) mostra a comparação dos valores horários de GHI da base de dados, INMET contra os dados disponibilizados pelo NREL, considerando-se os meses de outubro à dezembro de 2015, para a localidade de Brejo Grande. Verifica-se que ao longo desse período os dados do satélite são mais consistente e não sofrem variações abruptas, já os dados do INMET são mais instáveis e propensos a falhas. Instabilidade essa observada no sexagésimo dia de observação do último trimestre no gráfico do INMET. No entanto, para o mesmo ponto de observação, os dados do satélite não registram essa variação, o que pode ser um possível indício de falha de equipamento local.

Na Fig.(4), mostra-se a mesma comparação, considerando-se os meses de outubro à dezembro de 2015, para a cidade de Itabaianinha. Mais uma vez, verifica-se grande consistência da base do NREL de modo a preencher e corrigir a grande variação encontradas na estação local.

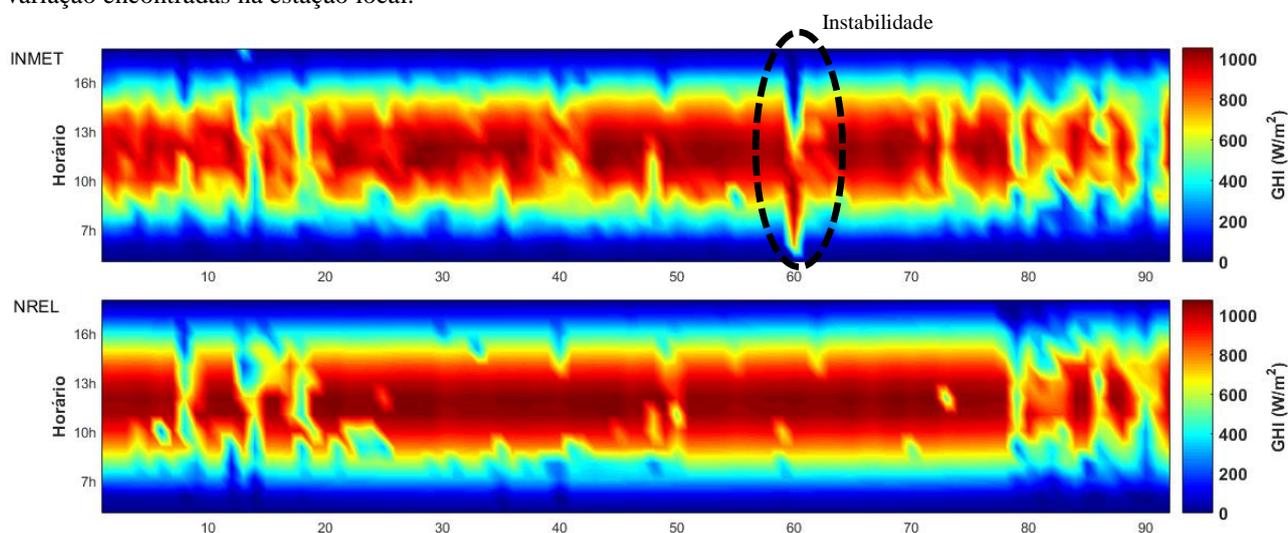


Figura 3 - GHI horário (INMET x NREL), Brejo Grande, outubro à dezembro de 2015.

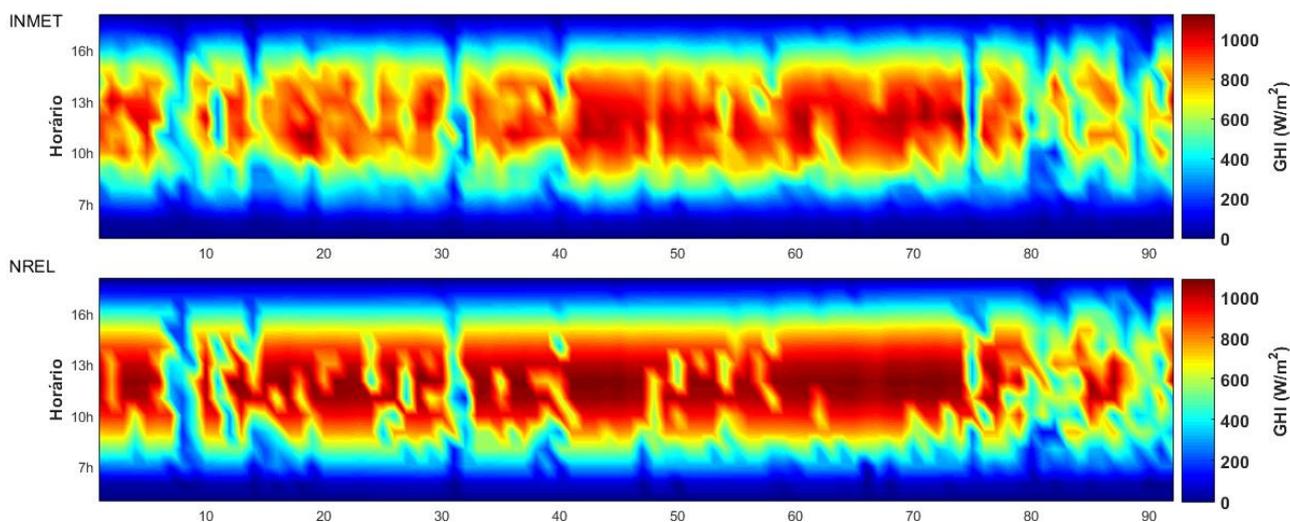


Figura 4-- GHI horário (INMET x NREL), Itabaianinha, outubro à dezembro de 2015.

Na Fig.(5), os gráficos para as duas cidades supracitadas mostram a comparação entre valores médios diários e máximos (de pico) diários das duas bases de dados (INMET e NREL). Considerando os meses de outubro à dezembro de 2015, para as localidades de Brejo Grande e Itabaianinha se observa a precisão dos dados da estação automática local com

relação ao satélite através dos dados de média, bem como suas variações, principalmente na comparação do DHI máximo diário da cidade de Itabaianinha.

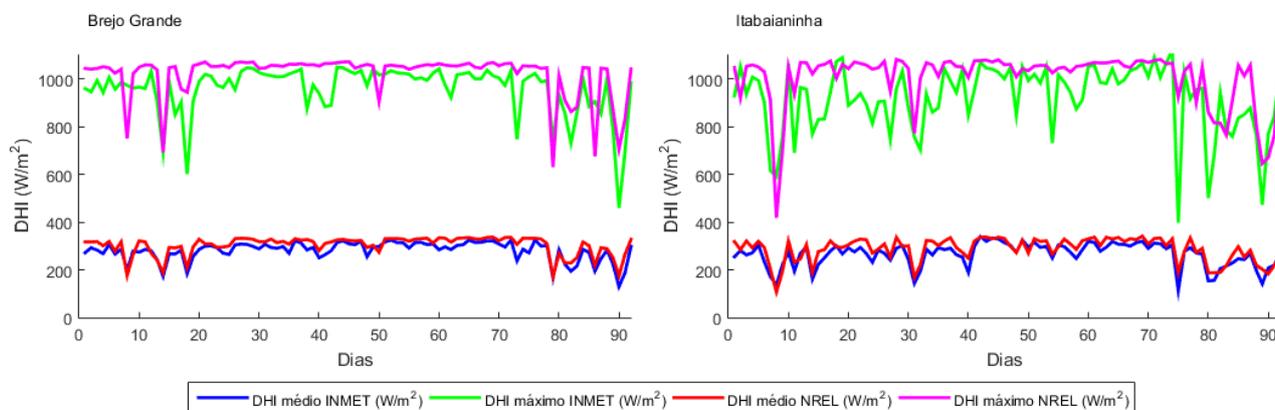


Figura 5 - GHI médio e máximo diário (INMET x NREL), Brejo Grande, outubro a dezembro de 2015.

Utilizando-se das equações Eq.(1) e Eq.(2), foram calculados os indicativos estatísticos na comparação de valores médios diários de GHI da base de dados INMET contra os dados disponibilizados pelo NREL, considerando-se os meses de outubro à dezembro de 2015, para as localidades de Brejo Grande e Itabaianinha. Os valores esperados para estimativas de GHI para o Brasil são obtidos conforme SENGUPTA (2015), assim como os valores obtidos de rMBE e rRMSE, estão indicados na Tabela 1.

Tabela 1 – rMBE e rRMSE – GHI médio diário - (INMET x NREL), Brejo Grande, OUT/15 a DEZ/15

Indicativo	Valor esperado	Brejo Grande			Itabaianinha		
		OUT15	NOV15	DEZ15	OUT15	NOV15	DEZ15
rMBE	Menor que 7%	8,91%	7,74%	11,43%	13,56%	8,54%	11,37%
rRMSE	Menor que 13%	9,80%	8,70%	12,32%	14,66%	9,60%	11,48%

Verificou-se que os valores de rMBE encontrados são todos positivos e estão acima do valor esperado, indicando que a média dos valores de INMET são ligeiramente maiores que a média dos valores do NREL, indicando um possível erro sistemático. Já os valores de rRMSE estão todos abaixo do esperado, excetuando-se o mês de outubro em Itabaianinha.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho comparou bases de dados provenientes do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) com os da *National Solar Radiation Data Base*, bem como estimou dados faltantes da base nacional para poder recompor a base do INMET. Logo, conclui-se que os dados da base nacional são dados brutos, uma vez que são encontrados na grandeza kJ/m^2 e atrasados 3 h com relação ao fuso do local. Além disso, há a possibilidade de ocorrência de erros dinâmicos que provoca, em muitos casos, a supressão de informação no banco de dados, bem como demais defeitos que o sensor pode estar sujeito.

Já a base composta pelo satélite geoestacionário da NSRDB são dados refinados frutificados de modelos matemáticos robustos que possibilitam a estimação de dados de irradiância do local a uma resolução de $4 km^2$. Observa-se, contudo, que a base local é mais sensível a sinais de radiação em uma área pontual, quando comparado com satélites.

Além disso, os métodos de estimação de dados faltantes para a base do INMET é fator determinante na análise final dos dados. Um método linear pode ser um forte produtor de erros em situações nas quais o dia tenha sido de céu nublado ou parcialmente nublado.

Entretanto, os gráficos e indicadores estatísticos mostram-se similares, mostrando uma certa correlação entre as duas bases de dados.

Como trabalhos futuros, deseja-se comparar dados de outras localidades e utilizar mais variáveis como a radiação direta normal e umidade relativa do ar, bem como utilizar informações provenientes de outros satélites como o do projeto SWERA.



6. REFERÊNCIAS

- ANEEL - Agência Nacional De Energia Elétrica, 2008, “Atlas da energia elétrica do Brasil”, 3.^a Edição, ANEEL, Brasília, Brazil, 236p.
- Boyo, A.O. and Adeyemi K.A., 2011, “Analysis of Solar Radiation Data from Satellite and Nigeria Meteorological Station”. International Journal of Renewable Energy Research, IJREER. Vol. 1, No. 4, pp. 314-322.
- Duffie, J.A and Beckman, W. A., 2013, “Solar Engineering of Thermal Processes”. 4th. edition. Wiley.
- Espinar, B. et al., 2009, “Analysis of different comparison parameters applied to solar radiation data from satellite and German radiometric stations”. Solar Energy. Vol. 83, [s.i.]. pp. 118–125.
- INMET- Instituto Nacional de Meteorologia, 2011, “Rede de Estações Meteorológicas Automáticas do INMET”, NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET, http://www.inmet.gov.br/portal/css/content/topo_iframe/pdf/Nota_Tecnica-Rede_estacoes_INMET.pdf
- Liu, W. T. H., 2015, “Aplicações de sensoriamento remoto”, Ed. Oficina de Textos, São Paulo, Brasil, 908p.
- Marciotto, E.R.; Oliveira, A.P. and Escobedo, J. F., 2008, “Comparação entre a Radiação Solar Medida na Superfície e Estimada por Satélite na Região Metropolitana de São Paulo”. II Congresso Brasileiro de Energia Solar e III Conferência Regional Latino-Americana da ISES - Florianópolis.
- NREL - National Renewable Energy Laboratory, http://redc.nrel.gov/solar/glossary/gloss_d.html.
- Pereira, E. B. et al., 1996, “Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of meteosat satellite data”. Solar Energy, Vol. 57, No. 2, p.125-132.
- Pereira, E. B. et al., 2006, “Atlas Brasileiro de Energia Solar (Brazilian Atlas of Solar Energy)”: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, São José dos Campos, Brasil.
- Polo, J. et al., 2015, “Preliminary survey on site-adaptation techniques for satellite-derived and reanalysis solar radiation datasets”, Solar Energy, Vol. 132, [s.i.], pp. 25-37.
- Sengupta, M. et al., 2015, “Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications - Technical Report NREL/TP-5D00-63112”, National Renewable Energy Laboratory, Golden-CO, USA.
- Trajano, S. V., 2010, “Potencial De Geração De Energia Elétrica Com Sistemas Fotovoltaicos Com Concentrador No Brasil”. Tese de Doutorado, UFSC.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

COMPARISON BETWEEN SOLAR RADIATION DATA MEASURED BY AUTOMATIC METEOROLOGICAL WEATHER-STATIONS IN THE STATE OF SERGIPE WITH ESTIMATED VALUES FROM SATELLITE IMAGES

José Claudeni O. Lima, jcolima@yahoo.com¹

Flávio S. C. Bispo, flavio.santiago.bispo@hotmail.com¹

Douglas Bressan Riffel, dbr.ufs@gmail.com²

¹ Federal University of Sergipe, Graduate Program in Electrical Engineering,

² Federal University of Sergipe, Department of Mechanical Engineering.

Abstract: This article aims to evaluate the integrity of the solar radiation data collected by automated meteorological stations (EMA) installed in the State of Sergipe and belonging to the National Institute of Meteorology - INMET, comparing these data with estimated values from satellite images, provided by National Renewable Energy Laboratory-NREL. From observations made by graphs and analysis of calculated statistical indicatives (*rMBE* and *rRMSE*), it was concluded that two databases are similar, taking as reference the same locations and the same date range.

Keywords: Solar energy, global horizontal irradiance, automated meteorological weather-station, satellite images