

# ESTUDO COMPARATIVO DAS BASES DE DADOS DE IRRADIÂNCIA SOLAR NA SUPERFÍCIE PARA O TERRITÓRIO NACIONAL

Bruno Eduardo B.R. Torres<sup>1</sup>, Fernando R. Martins<sup>1,2</sup>, Francisco José L. de Lima<sup>1,2</sup>,  
Rodrigo S. Costa<sup>2</sup>, André R. Gonçalves<sup>2</sup>, Enio B. Pereira<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Lab. de Modelagem Aplicada aos Recursos Renováveis. Dep. de Ciências do Mar, Universidade Federal de São Paulo, campus Baixada Santista. Rua Dr. Carvalho de Mendonça, 144. Santos/SP, 11070-100. [brunoetorres97@gmail.com](mailto:brunoetorres97@gmail.com).

<sup>2</sup> Lab. de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia, [Centro de Ciência do Sistema Terrestre, Instituto Nacional de Pesquisas Especiais. Av dos Astronautas, 1758. São José dos Campos/SP., 12270-010](http://www.cicm.inpe.br)

## RESUMO

O Brasil, por ser um país localizado na região intertropical, possui grande disponibilidade de energia solar durante todo ano. A disponibilidade de dados sobre o recurso solar na superfície e as incertezas associadas são fatores essenciais para incentivar novos investimentos em sistemas de geração de energia solar. Dessa forma, o presente estudo, buscou identificar pontos fortes e fracos nas diversas bases de dados disponíveis para o território brasileiro. O estudo compara valores de irradiância Global, Direta e Difusa em Brasília (DF), Petrolina (BA) e São Martinho da Serra (RS) fornecidas em 3 bases de dados solares distintas. Aplicou-se metodologias estatísticas consolidadas na literatura para avaliar a confiabilidade das bases de dados comparando-as com dados observados em estações automáticas da rede SONDA. Os resultados mostraram diferenças significativas entre as bases de dados de irradiância nos locais de estudo.

**Palavras-chave** — Irradiância solar na superfície, Base de dados, Energia solar, Sensoriamento remoto.

## ABSTRACT

Brazil has great solar potential throughout the year due to its location in the intertropical region. The assessment of solar energy resource on the surface and the associated uncertainties are essential factors to boost new investments in solar power systems. Thus, the present study aimed at identifying strengths and weaknesses in the several databases available for the Brazil. The study compared the solar irradiance values – Global, Beam and Diffuse – provided by 3 solar databases for the location of 3 SONDA measurement sites: Brasília (DF), Petrolina (BA) and São Martinho da Serra (RS). Several statistical indexes were calculated based on the scientific literature to evaluate and compare the reliability of the databases. The results showed significant differences between solar irradiance data available in each database and the field observations in all 3 locations.

**Key words** — Solar irradiance, database, Remote sensing, Solar energy.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se por possuir uma matriz energética bastante renovável. A geração de eletricidade sustenta-se principalmente nas fontes hidráulicas. Esta, por sua vez, mesmo sendo considerada renovável e limpa, baseia-se em grandes empreendimentos, os quais implicam em inúmeros problemas socioambientais. A energia nuclear, devido aos riscos associados a utilização e ao descarte de detritos radioativos, não se mostra como uma alternativa. A queima de combustíveis fósseis atende a uma grande parte do setor de transporte e responde a 40% da energia usada no setor agropecuário o que contribui para o aumento da emissão de gases do efeito estufa [1]. Analisando as fontes renováveis, observamos que nos últimos anos houve um grande investimento na energia eólica como resultado das políticas governamentais como o PROINFA, implementada em 2002. Porém, apesar do grande potencial eólico no Brasil, verificou-se que grande parte do território nacional, não apresenta um regime de vento adequado para a geração de eletricidade [2]. Em contrapartida, o Brasil, por ser um país localizado na sua maior parte na região intertropical, possui grande potencial solar durante todo ano [3]. A irradiação solar diária no país varia entre 1500 kWh/m<sup>2</sup>/ano até aproximadamente 2200 kWh/m<sup>2</sup>/ano [4]. A utilização da energia solar pode trazer benefícios em longo prazo para o país, viabilizando o desenvolvimento de regiões remotas onde o custo da eletrificação pela rede convencional é demasiadamente alto com relação ao retorno financeiro do investimento. Além da importância no planejamento energético atual, a irradiação solar desempenha papel importante em diversas áreas da atividade humana. Dessa forma, o desenvolvimento de um estudo comparativo de bases de dados de irradiância solar na superfície do território brasileiro apresenta notória importância no desenvolvimento de atividades econômicas em diversos setores como agropecuária, construção civil e industrial [3], além das áreas de meteorologia e climatologia. Outro aspecto importante relativo ao avanço em estudos de bases de dados de energia solar está diretamente ligada a segurança energética nacional. Com o intuito de estabelecer medidas efetivas para afastar da sociedade o risco da falta de energia ou para diminuir a instabilidade da falta de acesso às fontes

energéticas, se faz necessário a identificação e aplicação de ações baseadas no levantamento de dados, de modo a permitir que o Estado possua condições de propor um planejamento estratégico frente a variabilidade ligada ao clima e ao ambiente. Além do custo da energia solar, a disponibilidade de informações sobre o recurso solar no território brasileiro sempre foi apontada como uma das barreiras para o crescimento da participação desse recurso na matriz energética [5]. Atualmente, diversas bases de informações de satélite estão disponíveis. Dentre as bases de dados disponíveis para o desenvolvimento de projetos de aproveitamento do recurso de energia solar, podemos citar: Atlas Brasileiro de Energia Solar [6], SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment) / NREL (National Renewable Energy Laboratory) [7], Meteosat [8] e SOLAR GIS [9]. Cada uma das bases de dados possui características distintas relacionadas à metodologia adotada para a modelagem numérica e o satélite geoestacionário utilizado. Com exceção da base de dados disponibilizada no Atlas Brasileiro de Energia Solar [5], não há informações cientificamente embasadas sobre incertezas das demais bases de dados para o território brasileiro. Com a publicação da 2a. edição do Atlas Brasileiro de Energia Solar, torna-se importante estabelecer e disseminar informações sobre as incertezas, vantagens e desvantagens para cada uma das bases de dados disponíveis de modo a facilitar o uso pelos *stakeholders* e tomadores de decisão do setor energético brasileiro. O conhecimento da distribuição espacial do recurso solar em grandes extensões territoriais deve ser alcançado com o uso de modelos de transferência radiativa validados com dados observacionais [5]. Desse modo, torna-se válido o estudo comparativo de localidades distantes ao longo do território nacional. A comparação de bases de dados de radiação solar que este trabalho abordou, visa otimizar e disponibilizar ao público, informações confiáveis sobre recursos solares. Dessa maneira, além de auxiliar no planejamento do setor energético nacional, atrairá investimentos na área de energias renováveis.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia de comparação dos dados de irradiação solar global, direta e difusa empregada no trabalho, foi baseada nos levantamentos de dados solares de três bases para três localidades selecionadas com base em disponibilidade de observações de campo que atendam padrões internacionais de qualidade. Para o estudo utilizou-se as estações da rede SONDA operando em Brasília/DF, Petrolina/PE e São Martinho da Serra/RS. A Figura 1 mostra a localização das estações no território brasileiro sobre o mapa de irradiação solar global no território brasileiro. A base de dados observados em superfície foi assumida como referência para o estudo comparativo e está identificada como (BDS) nas equações (1, 2, 3 e 4). As demais bases de dados : Atlas Brasileiro de Energia Sola, SWERA/NREL, Meteonorm e SOLARGIS receberam a denominação (BDX) nas mesmas

expressões matemáticas. Os valores de irradiação solar fornecidos pelas 3 bases de dados são extraídos para a posição geográfica (lat/lon) mais próxima da estação de superfície. Os seguintes índices estatísticos foram utilizados no estudo comparativo. O índice de Concordância, descrito na expressão (1) apresenta valores entre “0” e “1” sendo que os valores próximos a unidade são registrados se há desvios pequenos entre as bases BDS e BDX. O Desvio Médio Absoluto (DMA), descrito na equação (2), representa a variabilidade do conjunto de dados, é a média das diferenças dos valores comparados. O valor da Raiz do Desvio Quadrático Médio (RMSE) calculado com uso da equação (3) permite identificar a magnitude média dos desvios estimados, é sempre positiva e quanto mais próxima de 0, maior é a qualidade dos dados analisados. A equação (4) é utilizada para o cálculo do índice de Confiança que toma como base o coeficiente de correlação de Pearson (5) entre os valores das bases de dados em comparação (BDS e BDX) multiplicada pelo índice de Concordância.

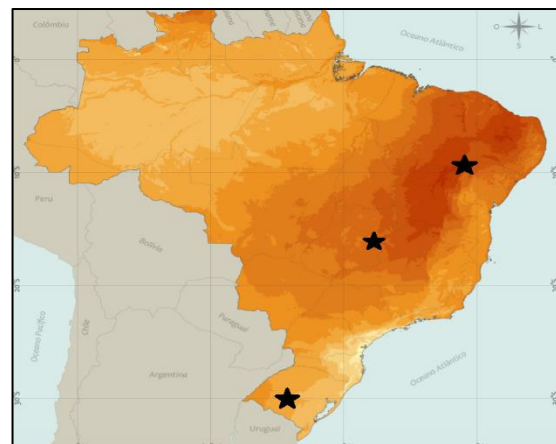
$$d=1-\left(\frac{\sum_{i=1}^n (BDX_i - BDS_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|BDX_i - \overline{BDX}| + |BDS_i - \overline{BDS}|)^2}\right) \quad (1)$$

$$DMA = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (|BDX_i - BDS_i|) \right] \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (BDX_i - BDS_i)^2 \right]} \quad (3)$$

$$c = R \times d \quad (4)$$

$$R = \frac{\left[ \sum_{i=1}^n (BDX - \overline{BDX})(BDS - \overline{BDS}) \right]}{\left( \left[ \sum_{i=1}^n (BDX - \overline{BDX})^2 \right] \left[ \sum_{i=1}^n (BDS - \overline{BDS})^2 \right] \right)^{1/2}} \quad (5)$$



**Figura 1. Localização das estações da rede SONDA utilizadas na avaliação dos desvios apresentados entre as diferentes bases de dados. Fonte: Adaptado de Atlas Brasileiro de Energia Solar[5].**

## 3. RESULTADOS

Os valores obtidos para cada um dos índices estatísticos estão apresentados nas Tabelas 1 a 3 para cada uma das localidades. Vale ressaltar que irradiação solar fornecida pelas bases de dados não representam a grandeza num ponto

geográfico específico como ocorre com a irradiação observada nas estações da rede SONDA. Cada base de dados fornece valores representativos de uma área associada com a resolução espacial horizontal característica da base de dados. Assim, o estudo compara valores médios espaciais com valores observados pontualmente.

Tabela 1. Índices estatísticos obtidos na comparação entre as diversas bases de dados e os valores observados na estação SONDA localizada em Brasília.

BRASÍLIA (SONDA X ATLAS)						
	GLOBAL		DIRETA		DIFUSA	
	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2
DMA	-5.16	-285.96	-5.16	-266.27	4.38	88
RMSE	7.80	432.17	20.71	1069.12	17.94	358.71
d	0.729768		0.835582		0.991836	
R	0.673056		0.722891		0.947691	
c	0.491175		0.604035		0.939954	

BRASÍLIA (SONDA X METEONORM)						
	GLOBAL		DIRETA		DIFUSA	
	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2
DMA	-2.08	-115.29	17.63	909.82	-43.05	-861
RMSE	3.76	208.38	29.49	1521.78	48.62	972.42
d	0.944125		0.603901		0.634648	
R	0.927737		0.53486		0.913123	
c	0.8759		0.323002		0.579512	

Tabela 2. Índices estatísticos obtidos na comparação entre as diversas bases de dados e os valores observados na estação SONDA localizada em Petrolina.

PETROLINA (SONDA X ATLAS)						
	GLOBAL		DIRETA		DIFUSA	
	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2
DMA	6.44	345.12	19.85	905.17	-75.05	-266
RMSE	8.99	437.51	24.47	1115.74	105	374.95
d	0.902206		0.568218		0.989877	
R	0.925244		0.60977		0.812262	
c	0.834761		0.346482		0.80404	

PETROLINA (SONDA X METEONORM)						
	GLOBAL		DIRETA		DIFUSA	
	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2
DMA	-9.83	-526.47	9.47	431.92	-43.29	-1.007
RMSE	11.49	615.17	20.43	931.73	45.93	-0.43
d	0.84175		0.712628749		0.438253	
R	0.91705		0.672898108		0.524303	
c	0.771926		0.479526537		0.229777	

Tabela 3. Índices estatísticos obtidos na comparação entre as diversas bases de dados e os valores observados na estação SONDA localizada em São Martinho da Serra.

SÃO MARTINHO DA SERRA (SONDA X ATLAS)						
	GLOBAL		DIRETA		DIFUSA	
	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2
DMA	-3.41	-161.42	-4.50	-210.99	10.88	176
RMSE	6.27	287.04	14.30	670.14	13.59	219.92
d	0.990965		0.909808		0.943338	
R	0.988466		0.855282		0.958701	
c	0.979535		0.778143		0.90438	

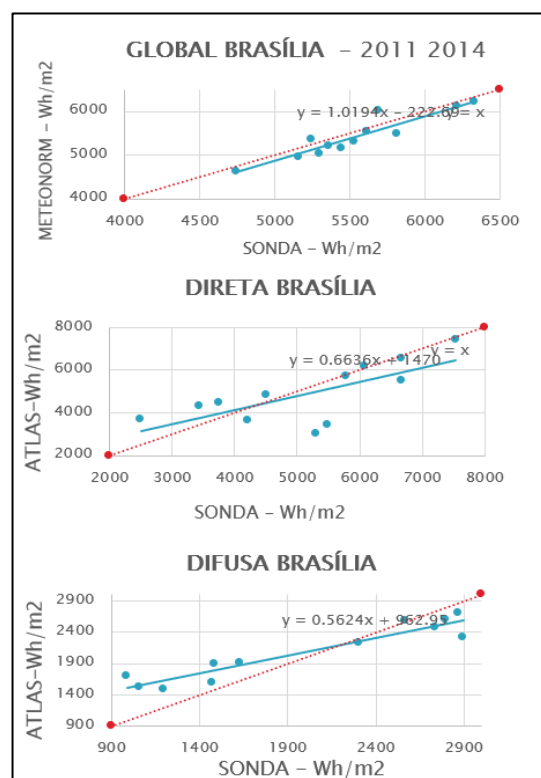
  

SÃO MARTINHO DA SERRA (SONDA X METEONORM)						
	GLOBAL		DIRETA		DIFUSA	
	%	kWh/m2	%	kWh/m2	%	kWh/m2
DMA	-9.10	-431.09	2.34	109.84	-25.98	-420
RMSE	11.43	541.53	16.66	780.70	31.87	515.77
d	0.965279		0.903009		0.766882	
R	0.983875		0.875496		0.807624	
c	0.949713		0.790581		0.619352	

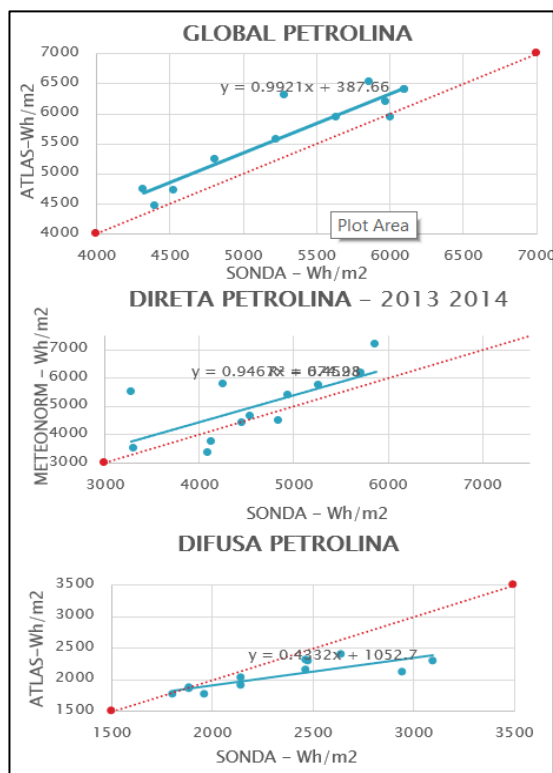
### 4. DISCUSSÃO

Observando os resultados estatísticos encontrados através da comparação das bases, vemos que para a cidade de Brasília a irradiação global apresentou um melhor desempenho com os dados Meteoronorm, já para as irradiações diretas e difusa, observamos um melhor aproveitamento dos dados referentes ao Atlas. Para as cidades de Petrolina e São Martinho da Serra, os dados do Atlas apresentaram melhor performance nas irradiações globais e difusas. Por sua vez, a irradiação direta foi melhor representada pela base Meteoronorm.

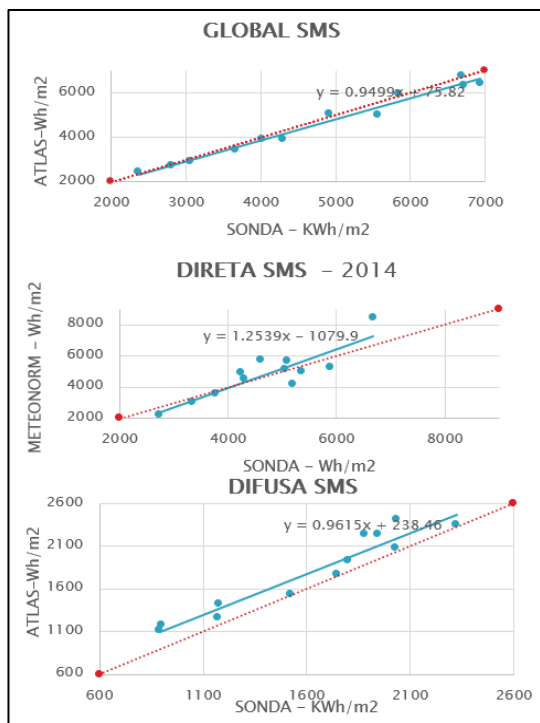
Os gráficos de dispersão linear a seguir ilustram os melhores desempenhos dos confrontos de dados, referentes a cada base, discutidos acima.



Gáfico 1. Melhores desempenhos Brasília (DF).



Gáfico 2. Melhores desempenhos Petrolina( PE).



Gáfico 3. Melhores desempenhos São Martinho da Serra (RS).

### 5. CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados preliminares encontrados até agora, pode-se concluir que das bases sustentadas por dados de satélite, o Atlas Brasileiro de Energia Solar retratou uma melhor solução para estimativas da disponibilidade de energéticas nas três localidades.

### 6. REFERÊNCIAS

[1] (Atlas,2017).: Pereira, E.B.,Martins, F.R., Abreus, S.L., Rüther, R.:Atlas Brasileiro de Energia Solar v.2 p. 9-11, 2017  
 [2] (Castro,2008 ).: Castro, M.G.R.; *Energias Renováveis e Produção Descentralizada* (UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO) <http://energia.ist.utl.pt/ruicastro> p. 6-10, 2008  
 [3] (Martins at al, 2004) .: Martins, F.R.,Pereira, E.B., Echer, M.P.S; *Solar energy resources assesment using geostationary satellites in brazil – Swera Project*, 2004  
 [4] (Martins at al, 2004) .: Martins, F.R.,Pereira, E.B., Echer, M.P.S; *Solar energy resources assesment using geostationary satellites in brazil – Swera Project*, 2004