

ANÁLISE PRELIMINAR DA DISTRIBUIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL HORIZONTAL NA CIDADE DE PORTO ALEGRE - RS

Luciano da Silva Ennes - ennesluciano@gmail.com

Rafael Haag - rafael-haag@uergs.edu.br

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

Jorge Ricardo Ducati - jorge.ducati@ufrgs.br

Adriana Coromoto Becerra-Rondón - abecerraronдон@gmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Resumo. A energia solar apresenta um rápido e sustentável crescimento no Brasil ao longo dos últimos anos. A queda nos custos dos sistemas solares, regulamentação e os incentivos governamentais vem colaborando para o aumento de todos os tipos de aplicações de energia solar, sejam eles para geração de energia, iluminação, aquecimento e demais aproveitamentos. Observa-se do mesmo modo um aumento da demanda por dados mais detalhados e qualificados a respeito do comportamento da radiação solar na superfície terrestre com o intuito de aperfeiçoar o desempenho de projetos que utilizam essa energia como sua fonte principal. Apenas informações sobre os valores médios anuais ou mensais da energia solar disponível na superfície são insuficientes para a modelagem correta de sistemas de grande porte ou que utilizam armazenamento de energia. Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento da distribuição da radiação solar global diária horizontal na cidade de Porto Alegre, Rio Grande do Sul (Latitude -30,05 e Longitude -51,16), por meio de dados coletados entre 2001 e 2014 pela Estação Meteorológica Automática (EMA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir dos dados de radiação solar global horizontal tratados, qualificados e analisados, foram obtidas informações sobre a distribuição de frequência diária, mensal, sazonal e anual da radiação global diária horizontal. O valor médio anual acumulado para a radiação solar global horizontal diária foi de 1533 kWh/m² com desvio padrão de 65,26 kWh/m² e coeficiente de variação igual a 4,25%. As médias mensais integradas a partir dos valores diários apresentam valores máximos em janeiro (6,23 kWh/m²) e mínimo em junho (2,16 kWh/m²).

Palavras-chave: Radiação solar, Dados solarimétricos, Métodos estatísticos.

1 INTRODUÇÃO

A energia solar é uma das fontes de energia que irá assumir um papel de destaque na matriz energética global nas próximas décadas. O fato de ser uma energia limpa, renovável e abundante contribui fortemente para investimentos em todos os tipos de aproveitamentos da radiação solar, postulando como forte candidata para substituir as fontes de energia fósseis, que além de não serem renováveis, contribuem para degradação do meio ambiente de diversas formas.

De acordo com o Banco de Informações de Geração, ANEEL (2021), o Brasil possui 678 mil sistemas solares fotovoltaicos conectados à rede e quase 850 mil unidades consumidoras que recebem créditos pelo sistema de compensação de energia elétrica a partir de fontes de energia solar. No mês de outubro de 2021, cerca de 1,6% da oferta de energia elétrica no Brasil foi gerada por sistemas de energia solar fotovoltaica. Atualmente há cerca de 34,3 GW de potência total já outorgados para sistemas centralizados e que devem entrar em operação nos próximos anos e que irão necessitar de informações precisas a respeito do comportamento da radiação solar nas regiões onde serão instaladas.

Neste trabalho iremos analisar o comportamento da distribuição de frequência diária, mensal, sazonal e anual da radiação global diária horizontal na cidade de Porto Alegre.

2 ÁREA, DADOS E MÉTODOS

2.1 Local de análise

A cidade de Porto Alegre (Latitude -30,05 e Longitude -51,16), capital do estado do Rio Grande do Sul (Fig. 1), apresenta clima Temperado do tipo Subtropical, classificado como Mesotérmico Úmido (classificação de Köppen). Possui estações definidas, invernos moderadamente frios com ocorrência de geadas (com raros episódios de neve) e verões quentes com máximas diárias acima de 35°C. A pluviosidade é bem distribuída ao longo do ano, com precipitação média anual entre 1200 e 1300 mm. Os únicos meses relativamente secos são abril e maio, enquanto os meses mais chuvosos são agosto e setembro. São aproximadamente 100 dias de chuva por ano. Em relação às massas de ar que atuam no Rio Grande do Sul, a massa de ar Tropical Atlântica, de característica quente e úmida acarreta chuvas

principalmente no verão, quando possui mais força, além de bastante calor. A massa de ar Tropical Continental, que aumenta as temperaturas, tem característica seca. A massa de ar Polar Atlântica, que se forma no oceano e é, portanto, úmida, atinge com força o estado durante o inverno, o inverno é inclusive, a época com maiores índices pluviométricos registrados. Por fim, a massa de ar Polar Continental, se forma no interior do continente americano e é, portanto, seca e fria, propiciando condições ideais para a formação das intensas geadas que cobrem os campos gaúchos durante o inverno.



Figura 1 - Mapa com a localização da cidade de Porto Alegre (ponto amarelo), capital do estado do Rio Grande do Sul (região clara).

A variação da quantidade de horas de Sol (fotoperíodo) ao longo do ano está correlacionada à geometria do sistema Sol-Terra, e é proporcional à latitude e desempenha um papel importante na disponibilidade e distribuição da radiação solar na superfície terrestre. Porto Alegre está situada numa latitude mediana entre os limites para o estado do Rio Grande do Sul (aproximadamente entre -27° e -33°) e possui uma amplitude de variação do fotoperíodo ligeiramente inferior a 4 horas ao longo do ano. No inverno os dias se reduzem a valores próximos de 10 horas de duração, porém no verão a quantidade de horas de Sol atinge 14 horas. A Fig. 2 apresenta a curva anual para o fotoperíodo na Linha do Equador (Latitude = 0°), Porto Alegre (curva tracejada azul = 30°) e para as latitudes limites no estado do Rio Grande do Sul (27° e 33°).

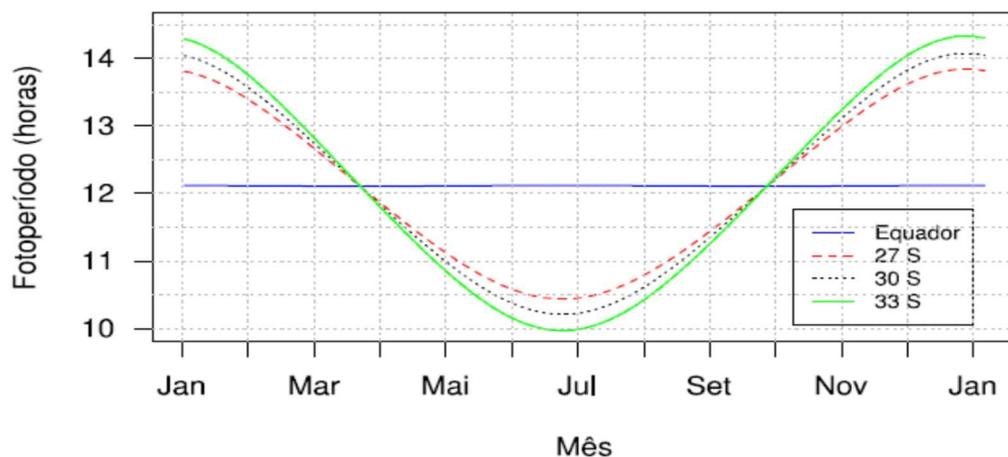


Figura 2 - Variação das horas de Sol ao longo ano (fotoperíodo) para a Linha do Equador (Latitude = 0°) e Latitudes 27, 30 e 33 Sul.

2.2 Dados

Os dados sobre irradiação solar em superfície empregados neste trabalho foram disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e são oriundos da Estação Meteorológica Automática (EMA) na cidade de Porto Alegre. Além desta estação, o INMET dispõe de outras 41 estações no estado do Rio Grande do Sul. A distribuição espacial destas estações automáticas é definida de modo que, preferencialmente, não haja um distanciamento superior a 100 km entre cada estação.

Uma estação meteorológica automática coleta, de minuto em minuto, informações sobre uma grande quantidade de variáveis meteorológicas como temperatura, umidade, pressão atmosférica, velocidade e direção de vento, precipitação, radiação solar, entre outras.

A Fig. 3 apresenta a EMA instalada na cidade de Porto Alegre (Latitude: -30.053536 e Longitude: -51.174766) em conjunto com outros sensores meteorológicos.

A cada hora, os dados das EMA são integralizados e disponibilizados para serem transmitidos, e posteriormente, são validados por um controle de qualidade e armazenados em um banco de dados.



Figura 3 - Estação meteorológica automática do INMET em Porto Alegre.

Após esse processo os dados coletados são disponibilizados através de meios eletrônicos podendo ser utilizados para a elaboração de previsão do tempo local ou para diversas aplicações de pesquisa (INMET, 2011). As estações de medição oficiais obedecem normas da Organização Meteorológica Mundial e devem ser instaladas em áreas livres de obstruções naturais ou prediais e seguras da interferência humana ou animal.

As EMAs realizam apenas medidas da componente global horizontal da radiação solar. Os dados de radiação solar obtidos pelas estações automáticas são oriundos de piranômetros da marca Eppley, model PSP (“*Precision Spectral Pyranometer*”). Os piranômetros são instalados em suportes metálicos com os medidores de precipitação (pluviômetro) a aproximadamente 1,5 m do solo. Este piranômetro utiliza sensor termoeletrônico composto por uma termopilha multi-junção pintada de preto que apresenta uma resposta espectral bastante ampla. O sensor é coberto por duas cúpulas de vidro, ambas do tipo Schott WG295. As incertezas nas medições realizadas pelo piranômetro Eppley PSP em medições de longa base temporal são da ordem de 5% (MYERS, 2013).

2.3 Metodologia

Para elaboração deste trabalho, foi empregada a metodologia similar descrita por Haag *et al.*, (2018). Os conjuntos de dados de irradiação solar global horizontal, na unidade de kJ/m², disponibilizados pelo INMET contam com históricos de medições que, em alguns municípios no Rio Grande do Sul, ultrapassam 20 anos, como ocorre para a estação de Porto Alegre. Neste trabalho utilizamos os dados tratados e qualificados para o período entre 2001 e 2014.

Na construção de padrões temporais para variáveis climatológicas como a radiação solar, quanto maior o histórico de medição, mais eficaz o resultado final, devido à sazonalidade de seu comportamento. Assim, o período compreendido entre os anos 2001 e 2014 pode ser considerado satisfatório para uma análise preliminar da variabilidade da radiação solar. Os dados para o período posterior a 2014 estão em fase de análise e irão compor um trabalho futuro com base de dados ampliada.

Após a etapa de seleção inicial, os dados foram analisados em relação a sua consistência física, a partir de modelos de estimativa para a radiação solar global horizontal. Os seguintes valores de consistência física, descritos pelas Eq. (1) e Eq. (2), foram aplicados para a irradiação solar global horizontal integrada na base horária:

$$G \leq G_0 \quad (1)$$

onde G_0 representa a irradiação extraterrestre e G a irradiação global horizontal medida na superfície.

Para identificar valores anômalos entre as sequências de intervalos horários medidos, aplicou-se a metodologia descrita por Journée e Bertrand (2011) aos pares consecutivos dos valores observados nas horas (i) e ($i-1$) é dada pela Eq. (2):

$$\left\langle \frac{G_i}{G_0} - \frac{G_{(i-1)}}{G_0} \right\rangle \leq 0,75 \quad (2)$$

Realizada a verificação inicial, os dados passaram por uma etapa de tratamento para o preenchimento de eventuais dados faltantes (“*gap filler*”) nas planilhas disponibilizadas pelo INMET, isto é, aqueles decorrentes por falhas operacionais do piranômetro ou da estação ao longo de todas as séries temporais. Foi adotada a metodologia descrita por Hoyer-Klick *et al.* (2009). Falhas de dados com períodos inferiores a três horas consecutivas foram interpoladas com os valores medidos consecutivos mais próximos. As interpolações levaram em consideração somente os dados originais e considerados válidos das planilhas, isso é, falhas maiores que uma hora não são consideradas no cálculo dos valores já interpolados. Falhas maiores que três horas e menores que quatro dias foram preenchidos por meio da média dos valores horários mais próximos (até 96 horas distantes) para horários idênticos. Caso os dados mais próximos também conterem falhas, foi empregada a mesma metodologia para dados faltantes por mais de 4 dias que foram preenchidos com a média dos valores para a mesma hora, dia e mês do ano anterior e posterior. No caso da falha se localizar no primeiro ou último ano de medição, foi empregado apenas o valor do ano anterior ou seguinte disponível. Os dados da estação analisada mostraram taxa de consistência superior a 97% (Haag *et al.*, 2018).

Os dados qualificados e tratados foram agrupados em arquivos de base horária, diária, mensal e anual no formato .CSV (Valores Separados por Vírgula) e analisados por “*scripts*” desenvolvidos pelos autores no programa computacional R (R Development Core Team, 2009).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, são mostrados e discutidos os resultados para as séries temporais, distribuições e outros parâmetros estatísticos.

3.1 Séries temporais

A Fig. 4 mostra a série temporal para os valores da radiação solar global horizontal diária no período de 01/01/2001 e 31/12/2013 entre as 9h00 e 21h00 UTC (tempo universal coordenado). Na Fig 5. estão representados os valores diários da radiação solar no topo da atmosfera integrados ao longo de um dia (H_0), e os valores máximos (G_{max}), médios (G_{med}), e mínimos (G_{min}), para a radiação solar horizontal diária no período 2001–2014.

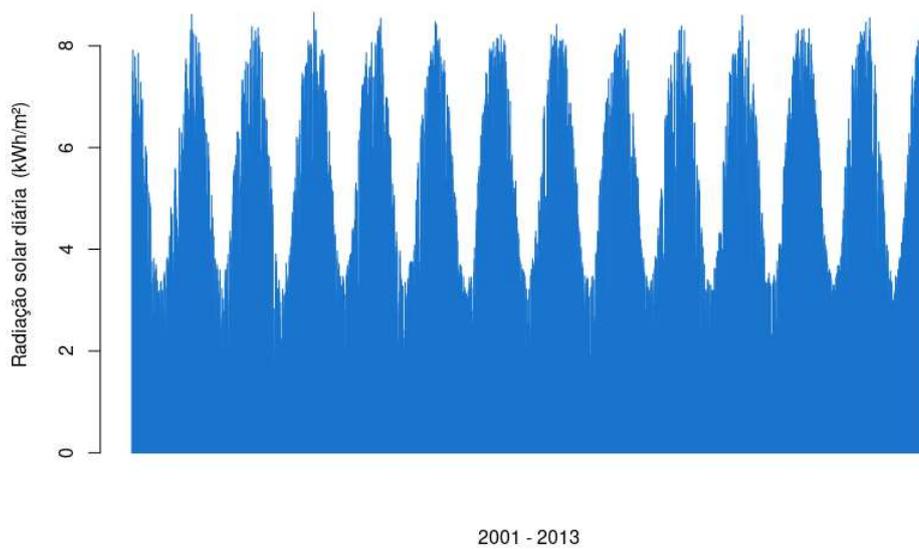


Figura 4 - Série temporal da radiação solar global horizontal diária entre 09 h e 21 h UTC na cidade de Porto Alegre entre 2001 e 2013.

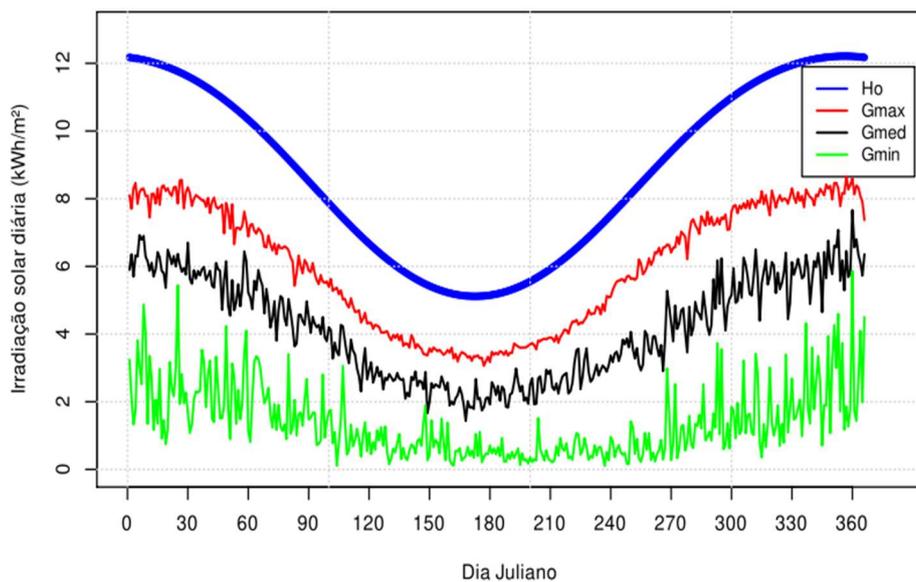


Figura 5 - Valores diários para a radiação solar no topo da atmosfera (H_0), e os valores máximos (G_{max}), médios (G_{med}), e mínimos (G_{min}), para a radiação solar global horizontal durante o período analisado.

3.2 Radiação anual total

Os dados diários totais da radiação solar foram integrados na base anual entre 2001 e 2013. Observa-se uma fraca oscilação entre os valores anuais totais, com um desvio padrão (σ) de 65,26 kWh/m²-ano e coeficiente de variação (CV) de 4,25% para o período. Apenas os dados para os anos de 2002 e 2012 mostram variação superior a 1σ . A Fig. 6 mostra o comportamento da radiação solar anual total para os anos analisados e a Tab. 1 apresenta os valores para o período de análise.

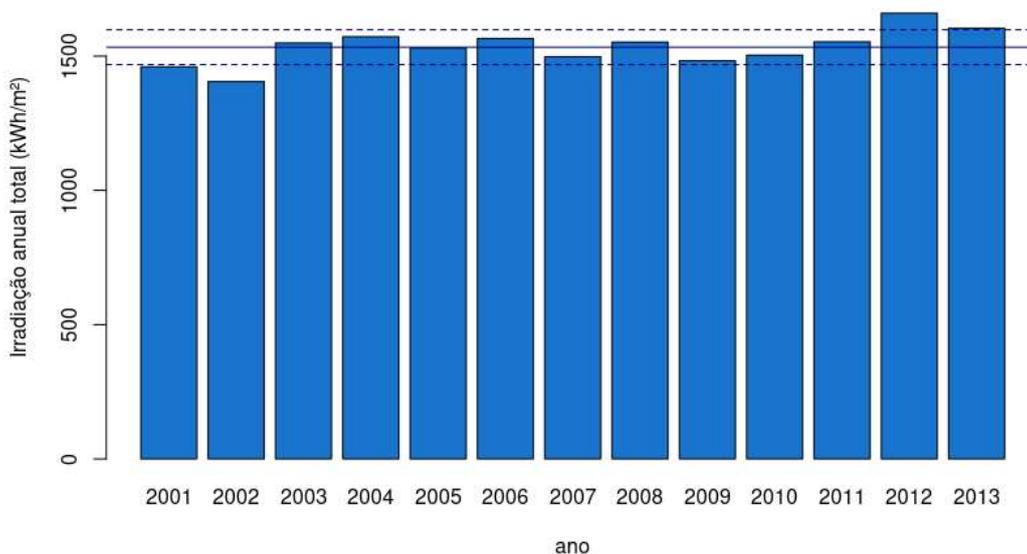


Figura 6 – Irradiação anual total na cidade de Porto Alegre entre 2001 e 2013. A linha sólida mostra o valor médio (1533 kWh/m²·ano) para o período analisado e as linhas tracejadas inferior e superior à linha média representam o valor de 1σ .

Tabela 1 – Valores da irradiação anual total para os anos de 2001 – 2013. Valor médio = 1533 kWh/m²·ano, $\sigma = 65,26$ e coeficiente de variação = 4,25%.

ano	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Irradiação anual total (kWh/m ² ·ano)	1456	1405	1549	1572	1530	1565	1497	1552	1482	1503	1553	1659	1604

3.3 Distribuição de frequência

A Fig. 7 mostra a distribuição de frequência sazonal da irradiação solar horizontal durante o período analisado. Conforme já apresentado por Pereira *et al.* (2017) e Haag *et al.* (2018), o estado do Rio Grande do Sul possui uma grande variabilidade das médias sazonais dos totais diários de irradiação solar global horizontal (valores médios entre 3 kWh/m² no inverno e 6,1 kWh/m² no verão). Esta variação ocorre principalmente pelo contraste mais acentuado entre as estações do ano em latitudes maiores, isso provoca maior amplitude diária nas horas de sol e variação do ângulo de elevação solar.

Na Fig. 8 temos a distribuição de frequência e a função de probabilidade acumulada para cada mês do ano durante o período analisado. A Tab. 2 apresenta de maneira resumida os principais indicadores estatísticos para os valores mensais da radiação solar global horizontal em Porto Alegre.

Tabela 2 – Indicadores estatísticos para a radiação global horizontal em Porto Alegre.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Anual
Média (kWh/m ²)	6,23	5,63	4,77	3,64	2,60	2,16	2,37	2,94	3,76	4,79	5,71	6,14	4,25
Desvio Padrão	1,80	1,76	1,57	1,43	1,05	1,00	1,16	1,45	1,95	2,07	2,08	1,94	2,19
Máximo (kWh/m ²)	8,69	8,22	7,27	6,10	4,27	3,59	3,90	5,56	6,88	7,83	8,33	8,78	8,78
Mínimo (kWh/m ²)	0,81	0,92	0,85	0,11	0,16	0,12	0,13	0,11	0,17	0,57	0,37	0,71	0,11
Quantidade Dias	434	395	434	390	403	390	403	403	390	403	390	403	4838

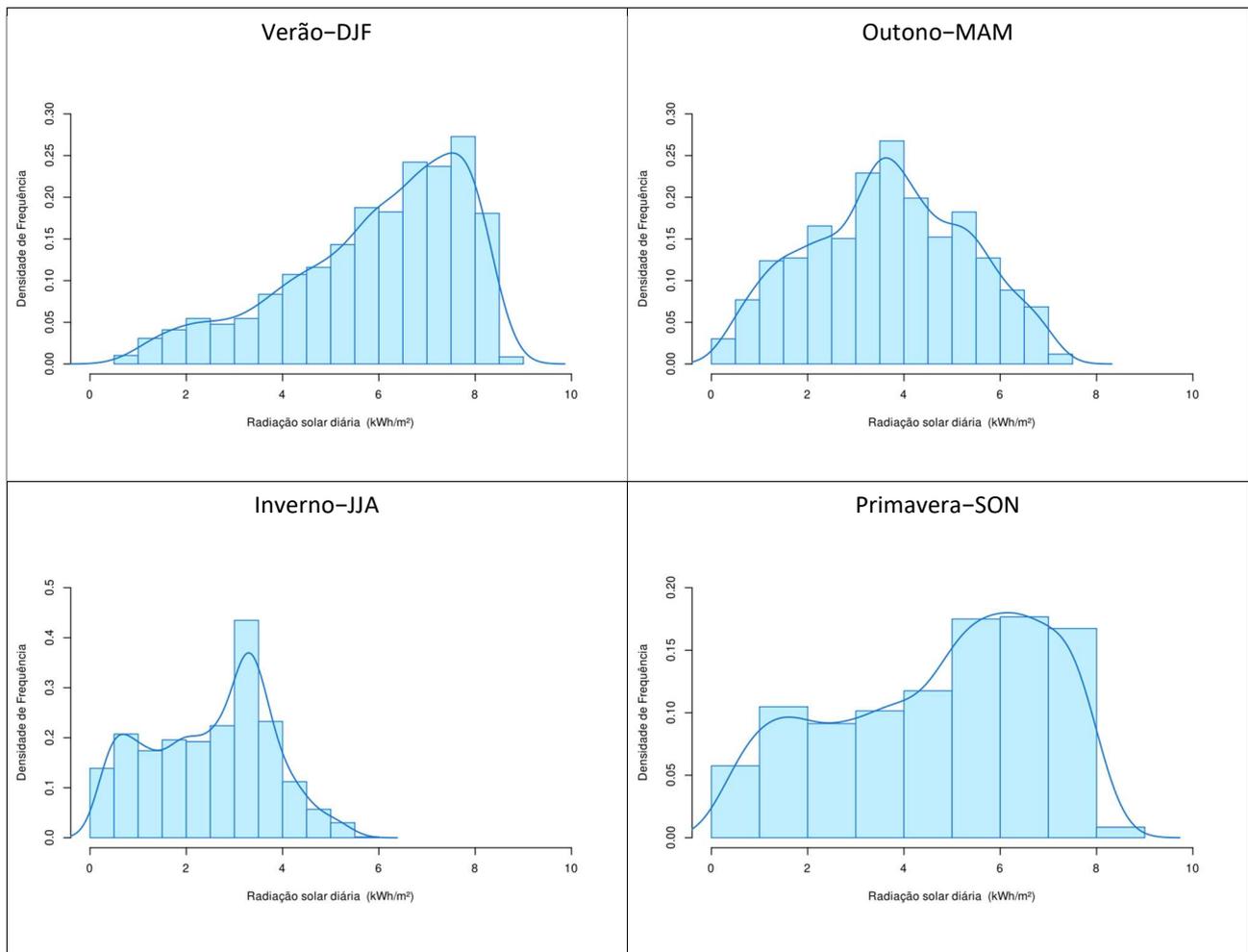


Figura 7 – Distribuição da densidade de frequência para os valores da irradiância solar global horizontal no Verão, Outono, Inverno e Primavera em Porto Alegre. A linha sólida representa a melhor função contínua que se adapta aos valores apresentados nos intervalos de frequência.

Na Fig. 9 apresenta-se os diagramas de caixa (“*boxplot*”) com os valores médios mensais e anual e suas respectivas variabilidades. Os valores contidos dentro das caixas representam 50% do total dos dados para cada mês. As hastes verticais superior e inferior indicam as parcelas dos 25% dos dados com maior e menor valor respectivamente (Percentis P_{75} e P_{25}). O ponto dentro de cada caixa revela o valor médio do conjunto de dados mensais ou anual, enquanto a linha que divide a caixa representa a mediana (Percentil P_{50}). As hastes inferiores e superiores se estendem, respectivamente, do quartil inferior até o menor valor não inferior a $Q1 - 1.5 \cdot (Q3 - Q1)$ e do quartil superior até o maior valor não superior a $Q3 + 1.5 \cdot (Q3 - Q1)$. Dados superiores ou inferiores aos intervalos das hastes verticais são caracterizados como “*outliers*” e são vistos como pontos externos diagramas de caixa.

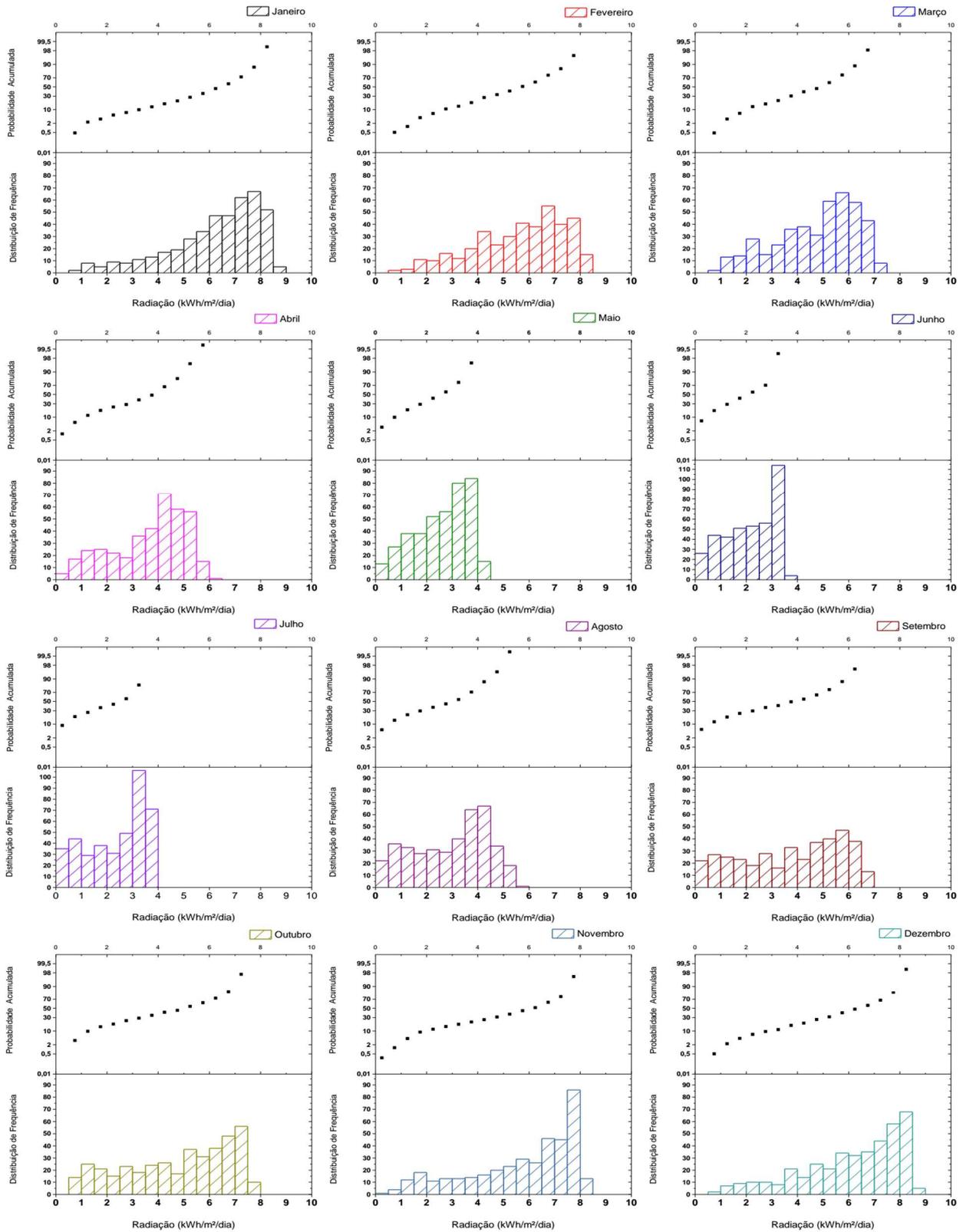


Figura 8 – Distribuição de frequência e função de probabilidade acumulada para os valores mensais da irradiância solar global horizontal em Porto Alegre.

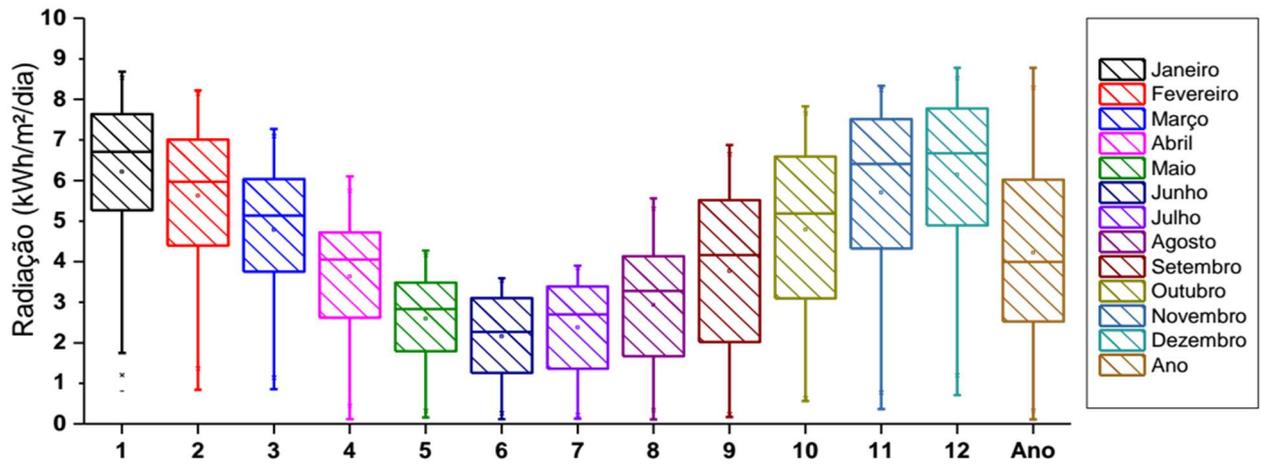


Figura 9 – Variabilidade das médias mensais dos totais diários da radiação solar global horizontal ao longo do período analisado na cidade de Porto Alegre.

O comportamento da distribuição de frequência e gráfico de caixa das médias anuais a partir dos totais diários de irradiação solar global horizontal é mostrado na Fig. 10 acompanhado dos valores numéricos que formam o gráfico de caixa. Os valores da mediana e média são relativamente próximos (3,98 e 4,198 kWh/m², respectivamente).

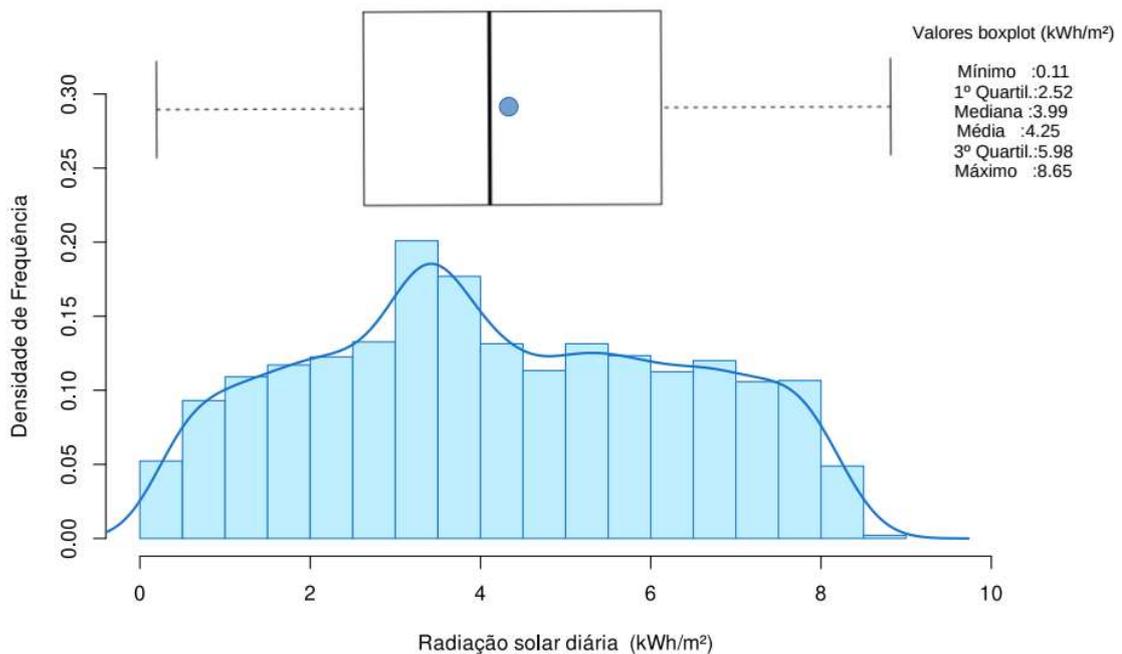


Figura 10 - Distribuição da frequência e gráfico de caixa das médias anuais a partir dos totais diários de irradiação solar global horizontal em Porto Alegre.

4 CONCLUSÕES

Apresentamos as distribuições e principais métricas estatísticas para a radiação global horizontal na cidade de Porto Alegre para o período 2001–2014. Os resultados mostram uma variabilidade mensal em função ocasionada pela geometria do sistema Sol-Terra e fatores climáticos incidentes na área analisada. Foi verificado similaridade nos valores da média e mediana (4,25 e 3,99 kWh/m²-dia, respectivamente) para a radiação solar global horizontal anual e para as distribuições discretas mensais. Os valores para a radiação solar global horizontal integrados no período anual entre os anos 2001 e 2013 mostram um valor médio de 1533 kWh/m²-ano com $\sigma = 65,26$ e coeficiente de variação igual a 4,25%. Em trabalhos futuros a base temporal dos dados será ampliada e outros indicadores estatísticas serão adicionadas.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de mestrado e a UERGS (Universidade Estadual do Rio Grande do Sul), que pelo programa inicie-UERGS concedeu bolsa de iniciação científica para a realização deste trabalho. Também agradecemos ao INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) pela disponibilidade dos dados empregados neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G., 2017. Atlas brasileiro de energia solar. 2.ed. São José dos Campos: INPE. 80p. Disponível em: <http://doi.org/10.34024/978851700089>.
- HAAG, R., SOARES, R. S., TOMASZEWSKI, G. A., BRAZIL, C., GASPARIN, F. P., DA SILVA, A. B., 2018. Atlas Solar do Rio Grande do Sul. Porto Alegre: UERGS. ISBN 978-85-60231-42-3. Disponível em: <http://atlassolarrs.com>.
- INMET. 2011. NOTA TÉCNICA No. 001/2011/SEGER/LAIME/CSC/INMET. Brasília: INMET.
- ANEEL. 2021. Banco de Informações de Geração. BIG - Banco de Informações de Geração. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>.
- MYERS, D. R., 2013. SOLAR RADIATION: Practical Modeling for Renewable Energy Applications. New York: CRC Press. 199 p.
- JOURNÉE M, BERTRAND C., 2011. Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network. Solar Energy. 85:72-86.
- HOYER-KLICK, C; DUMORTIER, D; TSVETKOV, A; POLO, J; J. L. TORRES, C. KURZ, AND P. INEICHEN., 2009. 'MESOR Existing Ground Data Sets', D 1.1.2.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM., (2009). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>.

PRELIMINARY ANALYSIS OF THE DISTRIBUTION OF GLOBAL HORIZONTAL SOLAR RADIATION IN THE CITY OF PORTO ALEGRE - RS

Abstract. *Solar energy has shown rapid and sustainable growth in Brazil over the last few years. The drop in costs of solar systems, regulation and government incentives has contributed to the increase of all types of solar energy applications, whether for energy, lighting, heating and other uses. In the same way, there is an increase in the demand for more detailed and qualified data regarding the behavior of solar radiation on the Earth's surface to improve the performance of projects that use this energy as their main source. Only information about the average annual or monthly values of solar energy available on the surface is insufficient for the correct modeling of large-scale systems or systems that use energy storage. This work aims to analyze the behavior of the distribution of horizontal daily global solar radiation in the city of Porto Alegre, Rio Grande do Sul (Latitude -30.05 and Longitude -51.16), through data collected between 2001 and 2014 by the automatic weather station (EMA) of the National Institute of Meteorology (INMET). From the treated, qualified, and analyzed horizontal global solar radiation data, information was obtained on the daily, monthly, seasonal and annual frequency distribution of the horizontal daily global radiation. The annual average value for the daily horizontal global solar radiation was 1533 kWh/m² with a standard deviation of 65.26 kWh/m² and a coefficient of variation equal to 4.25%. The monthly averages integrated from the daily values show maximum values in January (6.23 kWh/m²) and minimum values in June (2.16 kWh/m²).*

Keywords: *Solar radiation, Solarimetric data, Statistical methods.*