

ANÁLISE DE SIMILARIDADE DE IRRADIAÇÃO NORMAL DIRETA DOS DADOS DE REANÁLISE DO ERA5 E DADOS MEDIDOS *IN SITU*

Renan de Souza Carvalho – renan2.carvalho@alumni.usp.br

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Maicon Danilo Bastos – maicon.bastos@alumni.usp.br

Universidade Virtual do Estado de São Paulo

Celso Eduardo Lins de Oliveira – celsooli@usp.br

Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Biossistemas

Resumo. *Com a preocupação cada vez maior com as mudanças climáticas, adjunta ao tema de transição energética, existe a crescente inserção de fontes renováveis nas matrizes mundiais. Contudo, determinadas fontes não são despacháveis sem sistemas de armazenamento, como o caso da energia solar fotovoltaica ou eólica. Nesse contexto, apresenta-se a energia solar concentrada como opção viável devido à possibilidade de armazenamento térmico. Todavia, as simulações de projetos desta tecnologia utilizam o chamado ano típico meteorológico, com um histórico de medições locais acima de um período mínimo de 10 anos, empecilho comum de localidades diversas. Nesse contexto, uma alternativa é a utilização de dados de satélite ou reanálise. Assim, o trabalho buscou analisar a similaridade entre os dados medidos localmente em uma estação solarimétrica no campus da Universidade de São Paulo na cidade de Pirassununga, com dados de reanálise do ERA5 para um ano-base. A análise foi feita através de indicadores de dispersão, indicadores de similaridade de distribuição e indicadores visuais. Os resultados apontaram diferenças entre os dados para todos os indicadores, com forte subestimação dos dados de reanálise para os meses de inverno do ano-base, o que resulta em grande divergência entre os dados simulados e reais.*

Palavras-chave: Ano Típico Meteorológico, Energia Solar Concentrada, ERA5

1. INTRODUÇÃO

2.1 Matriz elétrica nacional

É indiscutível a preocupação atual com as mudanças climáticas, assunto que caminha adjunto à transição energética. O Brasil possui posição de destaque nesse contexto, devido à forte presença de fontes renováveis na geração de energia, principalmente elétrica. Um bom exemplo deste fato foi a oferta interna de energia elétrica (OIEE), próxima a 88% em 2022 (EPE, 2023), na qual, devido ao bom período úmido entre 2022/2023, resultou em um grande despacho hidrelétrico, atingindo cerca de 62% da OIEE. Todavia, essa grande dependência hidrelétrica possui suas problemáticas, como pôde ser observado em 2020, quando uma sequência de períodos úmidos ruins culminou em níveis baixos de armazenamento nos reservatórios, com grande despacho de térmicas fora da ordem de mérito econômico, encarecendo os encargos pagos pelos consumidores. Outro ponto relevante trata da despachabilidade das tecnologias renováveis presentes atualmente no parque (e.g. eólica e solar fotovoltaica). Nessa ótica, a tecnologia solar térmica de alta temperatura, i.e. heliotérmica (“*Concentrated Solar Power*” – CSP ou “*Concentrated Solar Thermal*” - CST), se apresentam como possibilidade de flexibilização da matriz elétrica, muito devido à facilidade de implementação da tecnologia de armazenamento térmico, viabilizando despacho em momentos sem luz solar. A seguir são explicitadas as tecnologias.

2.2 Energia solar concentrada

As tecnologias heliotérmicas fazem uso de espelhos para concentrar a irradiação normal direta (“*Direct Normal Irradiation*” – DNI) em um receptor, o qual pode ser longitudinal (calhas parabólicas e linear Fresnel), ou pontual (discos parabólicos e torre central) (LOVEGROVE; STEIN, 2012), dentro do qual existe a passagem de um fluido de trabalho, o qual, após aquecido, pode ser direcionado para um bloco de potência (geração direta de eletricidade), para um sistema de armazenamento térmico e posteriores trocadores de calor (geração indireta de eletricidade) (MÜLLER; RAU; SCHRÜFFER, 2014), ou para geração de vapor para processos industriais, ou até mesmo na geração de combustíveis como hidrogênio (LOVEGROVE; STEIN, 2012), cotado como principal vetor na transição energética (CASTRO, 2023). Todavia, uma das principais vantagens das tecnologias heliotérmicas é o armazenamento térmico (*Thermal Energy Storage* – TES), justamente pela possibilidade de geração de eletricidade em momentos sem sol, garantindo assim segurança operacional e despachabilidade (SORIA; SCHAEFFER; SZKLO, 2014).

O Brasil, país continental, possui grande disponibilidade de recurso solar (i.e. > 2.000 kWh/m²/ano) (MAAG; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 2015), tornando-o apto a implementar a tecnologia CSP em processos agroindustriais. Diversos estudos envolvendo análises técnicas e econômicas já foram realizadas em âmbito nacional, porém, não existem projetos com atuação comercial atualmente. Outrossim, projetos piloto já se encontram em fase de pesquisa e desenvolvimento

(P&D), como o Projeto SMILE (“*Solar-hybrid microturbine systems for cogeneration in agro-industrial electricity and heat production*”), o qual visa a construção de duas usinas piloto utilizando a tecnologia de torre central para cogeração de eletricidade e calor, sendo uma localizada no *campus* da Universidade de São Paulo em Pirassununga/SP (USP/FZEA) (21°57’ S, 47°26’ L), e uma outra localizada em Caiçara do Rio do Vento/RN (05°42’ S, 36°04’ L) (GREEN, 2023). A Fig. 1 apresenta as duas configurações de campo solar utilizadas, bem como os receptores solares em detalhe.

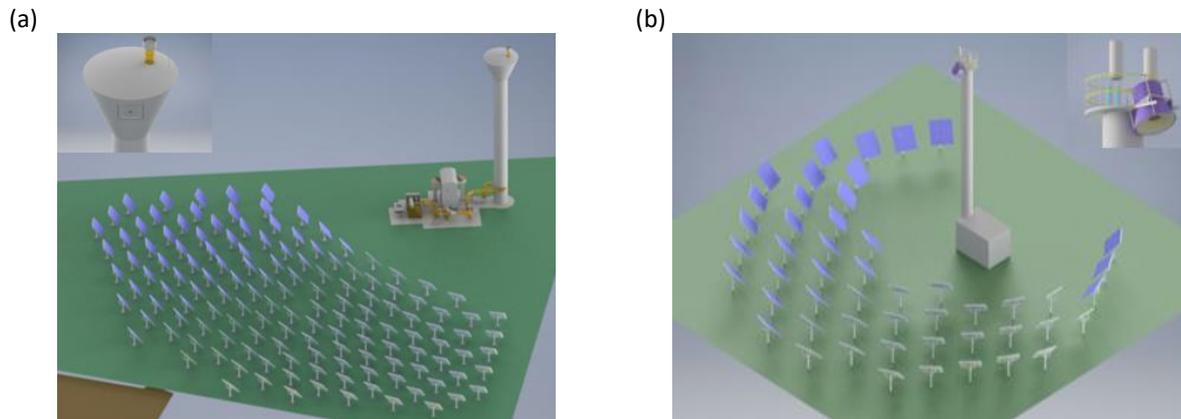


Figura 1 – Projetos piloto em (a) Pirassununga/SP, e (b) Caiçara do Rio do Vento/RN.

2.3 Ano típico meteorológico

O uso de simulações em projetos é salutar. Tradicionalmente, as mesmas, voltadas para tecnologias heliotérmicas, fazem uso do chamado ano típico meteorológico (“*Typical Meteorological Year*” - TMY), os quais são séries temporais horárias o sub-horárias, tipicamente representando ao menos 10 anos de dados históricos, agregados em um ano, visando reduzir o volume de dados e, conseqüentemente, a simulação (CEBECAUER; SURI, 2015). Todavia, tal redução tem como consequência perda de informação da série original. Assim, visando alcançar os objetivos específicos das simulações demandadas por projetos, alguns fatores devem ser levados em consideração, como os dados de entrada (origem, resolução, representatividade, acurácia) e a abordagem para produção do TMY (escolha do período, critérios de construção e avaliação estatística) (CEBECAUER; SURI, 2015).

Wilcox e Marion (2008) apresentam um manual para conjuntos de dados para a elaboração de um ano típico meteorológico, com as variáveis demandadas, unidades ou intervalos, resolução e descrição dos dados.

Como mencionado, os anos típicos meteorológicos são utilizados em projetos diversos, sendo uma importante entrada de dados de *softwares* de auxílio de expectativa de geração, fator de capacidade, dentre diversas características técnicas no desenvolvimento de projetos, como também análises financeiras e econômicas. Um exemplo de software amplamente utilizado no setor energético é o *System Advisor Model* (SAM), elaborado pelo *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) (NREL, 2023), o qual é capaz de modelar diversos sistemas energéticos como energia eólica, células a combustível, dentre diversas outras, como energia solar fotovoltaica ou CSP. O software possui anos típicos meteorológicos para diversas localidades dos Estados Unidos da América, em base horária, criados a partir da metodologia proposta por Wilcox e Marion (2008).

Um empecilho na construção do TMY é o próprio histórico de dados mensurados *in situ*, os quais amiúde não possuem um horizonte temporal de 10 anos. Outra questão é em relação às variáveis de medição, sendo a irradiação normal direta de maior importância, a qual usualmente não é usualmente medida em estações automáticas, dificultando ainda mais tal construção. Uma possibilidade de complementação em tais casos são dados de reanálise climática e dados de satélites.

2.4 ERA5

Reanálise climática combina observações passadas com modelos para gerar séries temporais consistentes de múltiplas variáveis climáticas. Dentre as principais reanálises utilizadas mundialmente, encontra-se o ERA5, produzido pelo Centro Europeu de Previsão Climática (ECMWF), fazendo parte do Serviço de Mudanças Climáticas Copernicus (C3S) (HERSBACH et al., 2020). ERA5 possui dados horários de diversas variáveis climáticas em uma grade de 31 km, dentre elas o fluxo médio de radiação direta de onda-curva na superfície, ou seja, a radiação direta média em um intervalo horário.

Muñoz-Sabater *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo de resultados obtidos dos dados de reanálise com dados observados *in situ*, bem como modelos globais e dados de satélites voltados para o ciclo hidrológico. Seus resultados apontaram para uma boa consistência dos dados do ERA5 no auxílio de estudos hidrológicos, como também para inicializar modelos climáticos e NWP (*Numerical Weather Predictions*), e auxiliar em aplicações diversas acerca do recurso hídrico, uso da terra e gerenciamento ambiental, sendo considerado o estado da arte para tais análises.

Urraca *et al.* (2018) estudaram o progresso realizado pelo ERA5, modelo global de reanálise do ECMWF, e do modelo de reanálise regional COSMO-REA6, do DWD for Europe. Dados de irradiação global horizontal diária foram

avaliados para 41 estações ao redor do globo, 294 estações na Europa e dois produtos derivados de satélites. Suas conclusões apontam que os modelos de reanálise reduzem a lacuna entre a reanálise e os dados de satélites, sendo necessárias melhorias para a predição de nuvens, sendo que o ERA5 permanece inadequado para locais com alta variabilidade de irradiação na superfície, como áreas costeiras e montanhas.

Jiang *et al.* (2020) analisaram observações *in situ* de radiação total, difusa e direta horária de 98 locais na China, comparando-os com os dados de reanálise do ERA5. Seus resultados apontam para uma boa correlação entre os dados observados pelas estações e os dados de reanálise, refletindo completamente as características regionais e variações diárias de locais individuais. Todavia, a precisão em áreas com clima chuvoso e nublado é baixa, indicando um desempenho insatisfatório na simulação das nuvens, em conformidade com o estudo anteriormente mencionado.

Salazar *et al.* (2020) comparou cinco anos de irradiação global horizontal (GHI) e irradiação global direta com *time steps* de 1 minuto observadas em uma estação em Petrolina, no nordeste brasileiro, agregadas em base horária, com estimativas de 11 bases de dados usualmente utilizadas em estudos de recurso solar tanto de satélites quanto reanálise, como o ERA5. Em relação ao DNI, um erro quadrático substancial foi encontrado para o ERA5, alcançando 63,4%.

3. OBJETIVO

O trabalho teve como principal objetivo analisar quantitativa e qualitativamente dados medidos localmente na estação solarimétrica localizada no “Laboratório de Eficiência Energética e Simulação de Processos” (LEESP), na Universidade de São Paulo para um ano-base específico, com dados de reanálise do ERA5, visando possível construção de um ano típico meteorológico para a supracitada localização baseando-se em um histórico alongado dos dados de reanálise.

4. METODOLOGIA

4.1 Recurso solar

O presente trabalho fez uso dos dados da estação solarimétrica localizada no “Laboratório de Eficiência Energética e Simulação de Processos” (LEESP), na Universidade de São Paulo (21°57' S, 47°26' L), tendo como ano-base escolhido o ano de 2016, comparando-os com os dados de reanálise de irradiação normal direta do ERA5, os quais podem ser encontrados diretamente nos *datasets* do Copernicus, em “*ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present*”, também para o ano de 2016.

A priori, os dados da estação foram trabalhados visando exclusão de valores intangíveis (e.g. DNI negativo), e posteriormente agrupados em base horária, similar ao *time step* utilizado na construção do TMY via metodologia proposta por Wilcox e Marion (2008). Ressalta-se que tais dados foram utilizados em outros trabalhos e.g. Carvalho *et al.* (2018). Salienta-se que a granularidade temporal em base horária se justifica também pela granularidade dos dados de reanálise, visando manter um base temporal similar.

De maneira similar, os dados de reanálise foram analisados buscando remoção de valores negativos, os quais não foram encontrados, ou valores superiores à constante solar, de 1.367 W/m² (KOPP; LEAN, 2011). Importante ressaltar que a irradiação varia de acordo com a localização terrestre e condições climáticas, e que em condições específicas pode chegar a atingir valores similares à constante solar. Todavia, considera-se valores próximos a 1.000 W/m² como valores razoáveis (LOVEGROVE; STEIN, 2012). Ressalta-se que não foram encontrados valores inverossímeis para máximos de DNI, sendo o máximo encontrado no referido ano 1.011 W/m². O processo de seleção do ponto de grade mais próximo dos dados de reanálise da estação solarimétrica foi calculado via distância Euclidiana.

4.2 Validação dos dados

A validação de séries temporais pode ser realizada através de diferentes métodos, sendo que a escolha do método depende das características específicas dos dados e do problema em questão. Existem diferentes abordagens, variando desde medidas de erro, a análises das distribuições de probabilidade, testes de significância, ou mesmo análises gráficas. Ademais, estatísticas de erro podem ser utilizadas para validação dos dados de reanálise. Nesse contexto, Gueymard (2014) apresenta uma ampla revisão acerca de metodologias de validação e estatísticas de performance para dados de radiação solar. O autor segmenta os indicadores estatísticos em quatro classes, sendo: indicadores de dispersão ou erro de pontos individuais (Classe A), indicadores de performance geral (Classe B), indicadores de semelhança de distribuição (Classe C) e indicadores visuais para análise qualitativa (Classe D).

O presente trabalho fez uso de indicadores das Classes A, C e D, sendo eles a raiz quadrada do erro médio (“*root mean squared error*” – RMSE) e erro médio absoluto (“*mean absolute error*” – MAE) presentes na Classe A, teste de Kolmogorov-Smirnov (*KS-test*) presente na Classe C, e boxplot e diagrama de dispersão presentes na Classe D. Ademais, é também calculada a função de distribuição acumulada de modo a complementar o *KS-test*. Todo o procedimento foi realizado em Python. A seguir são apresentados os equacionamentos relativos ao RMSE e MAE, onde y_i representa o valor observado, \hat{y}_i representa o valor previsto, e n representa o número de amostras:

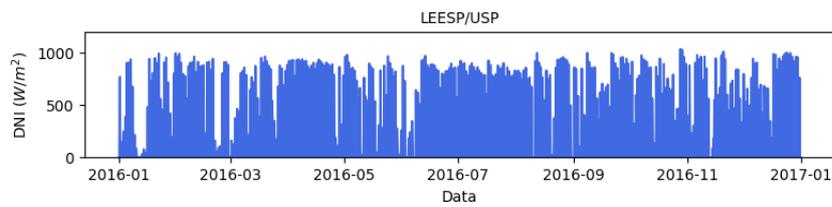
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (1)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum |\hat{y}_i - y_i| \quad (2)$$

5. RESULTADOS

A Fig. 2 (a), a seguir, apresenta o DNI obtido pela estação localizada no LEESP/USP em azul, bem como os dados de reanálise em vermelho, representada na Fig. 2 (b). Observam-se similaridades de vales, todavia, nota-se uma tendência de subestimação da irradiação normal direta durante o período de inverno. Tal fator é também observado através das estatísticas descritivas, apresentadas à frente, bem como nos gráficos mensais, apresentadas nos indicadores visuais.

(a)



(b)

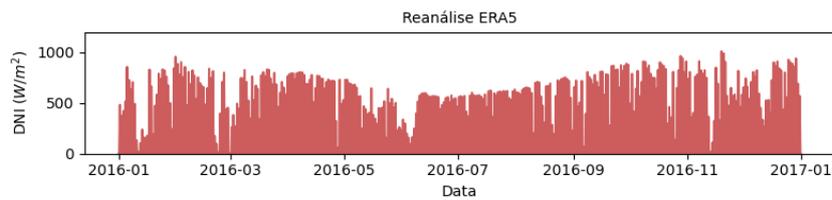


Figura 2 – (a) DNI obtido via medição in situ no LEESP/USP, e (b) reanálise do ERA5.

Após o processo de limpeza dos dados espúrios em ambas as bases, e agregação em escala horária para a os dados da estação, iniciou-se o processo de validação, conforme apresentado anteriormente.

5.1 Indicadores de dispersão

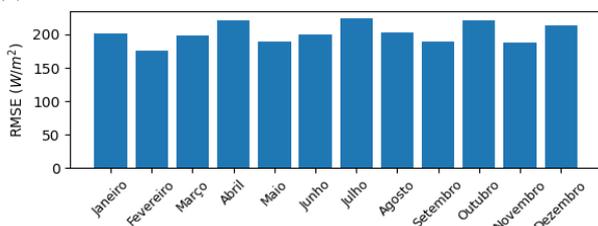
As estatísticas descritivas média amostral e desvio padrão amostral indicam diferenças entre as amostras agregadas para todo ano. Como resultado, obteve-se para os dados da estação $\bar{X}_{LEESP} = 206,5 \text{ W/m}^2$ e $\sigma_{LEESP} = 317,7 \text{ W/m}^2$, enquanto os dados de reanálise apresentaram $\bar{X}_{ERA5} = 154,8 \text{ W/m}^2$ e $\sigma_{ERA5} = 235,2 \text{ W/m}^2$. Na Tab. 1 são apresentados os indicadores de dispersão supracitados.

Tabela 1 – Indicadores de dispersão para 2016.

INDICADOR DE DISPERSÃO	VALOR
RMSE	202,8 W/m ²
MAE	111,6 W/m ²

Os resultados de RMSE e MAE são similares aos apresentados por Salazar et al. (2020) para o ERA5. Quando os resultados são analisados em base mensal, observam-se resultados similares aos indicadores acima, com RMSE em cerca de 200 W/m² e MAE em cerca de 100 W/m² na maioria dos meses. A Fig. 3 a seguir resume tais resultados.

(a)



(b)

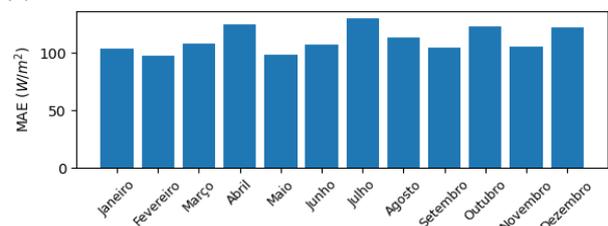


Figura 3 – Indicadores de dispersão (a) RMSE e (b) MAE em base mensal para 2016.

Ressalta-se que os indicadores de dispersão supracitados estão agregados em base mensal e, portanto, podem não refletir eventuais superestimativas que possam se encontrar ainda acima dos valores esboçados na Fig. 3, bem como subestimativas, quando observados os valores em granularidade temporal inferior. Tais situações são explicitadas a seguir, em Indicadores visuais.

5.2 Indicadores de semelhança de distribuição

O teste de Kolmogorov-Smirnov compara as distribuições acumuladas $F(x)$ e $G(x)$ de duas amostras independentes, onde a hipótese nula H_0 é de igualdade entre as distribuições acumuladas, i.e. $F(x) = G(x)$, e a hipótese alternativa H_a é de diferença entre as distribuições. Assumindo-se um nível de significância de 5% (probabilidade de erro tipo I), obtve-se, para os dados agregados anualmente, um p-valor de aproximadamente zero, sendo inferior ao limiar de 0,05, rejeitando-se, portanto, a hipótese nula em favor da hipótese alternativa de que as distribuições são diferentes. Ressalta-se nesse momento que o teste realizado é baseado nas distribuições acumuladas, e não nos dados em si. A Fig. 4 apresenta as funções de distribuição acumuladas empíricas (“*empirical cumulative distribution functions*” – ECDFs) para as medições *in situ*, em azul, e de reanálise, em vermelho.

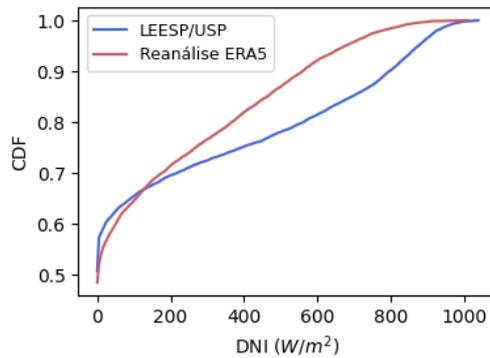


Figura 4 – ECDFs para os dados do LEESP/USP, em azul, e ERA5, em vermelho.

De maneira semelhante, ao aplicar o KS-test para cada mês, a um mesmo nível de significância, apenas o mês de março apresentou um p-valor de 0,52, acima de 0,05, o qual indica que não há evidências para rejeitar a hipótese de que ambas as distribuições acumuladas são iguais. A Fig. 5 apresenta as ECDFs mensais, bem como o p-valor do teste de hipóteses.

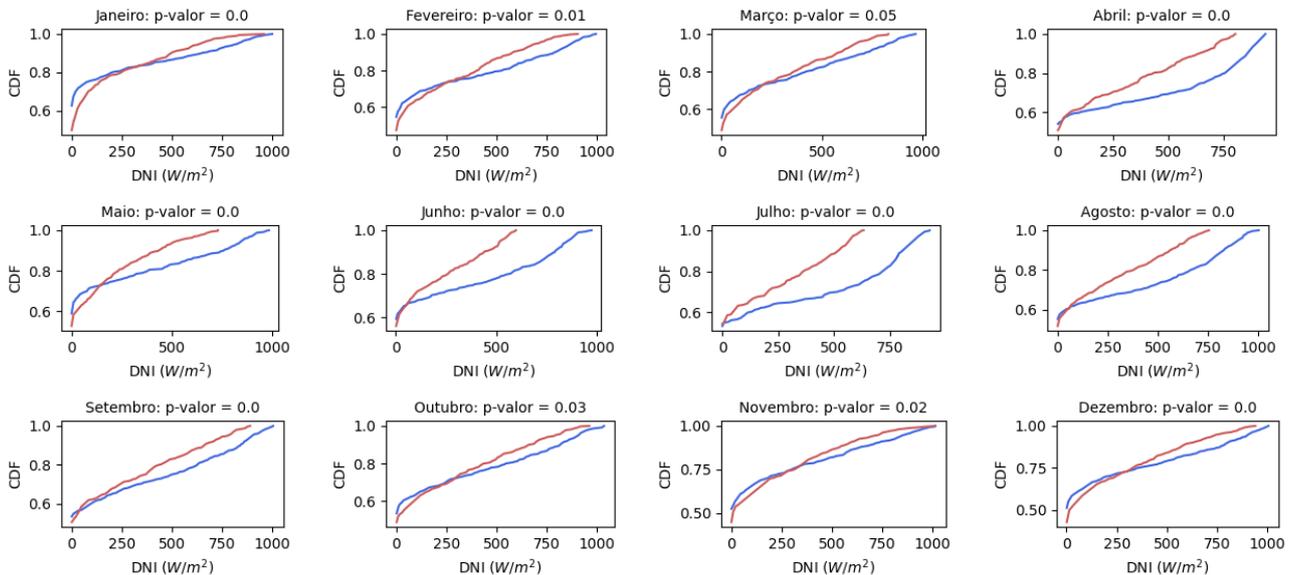


Figura 5 – ECDFs para cada mês de 2016, para os dados do LEESP/USP, em azul, e ERA5, em vermelho.

5.3 Indicadores visuais

A Fig. 6 a seguir apresenta o gráfico de dispersão entre os pontos de ambas as bases de dados. Observa-se uma grande nuvem de pontos próximos a zero, todavia acima da linha diagonal, a qual é um indício de superestimação de valores de DNI pelos dados de reanálise enquanto os valores medidos eram zero. Ademais, nota-se uma grande nuvem

de pontos abaixo da linha diagonal para valores de DNI *in situ* acima de 800 W/m^2 , o que indica subestimação dos dados de reanálise.

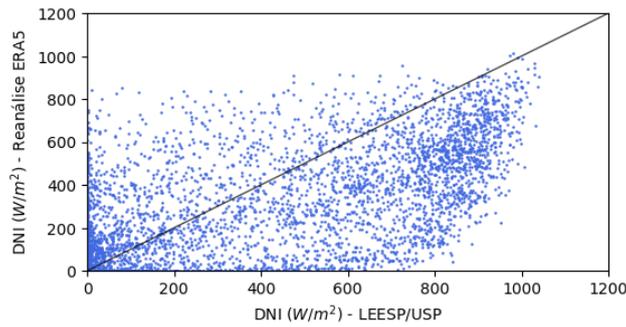
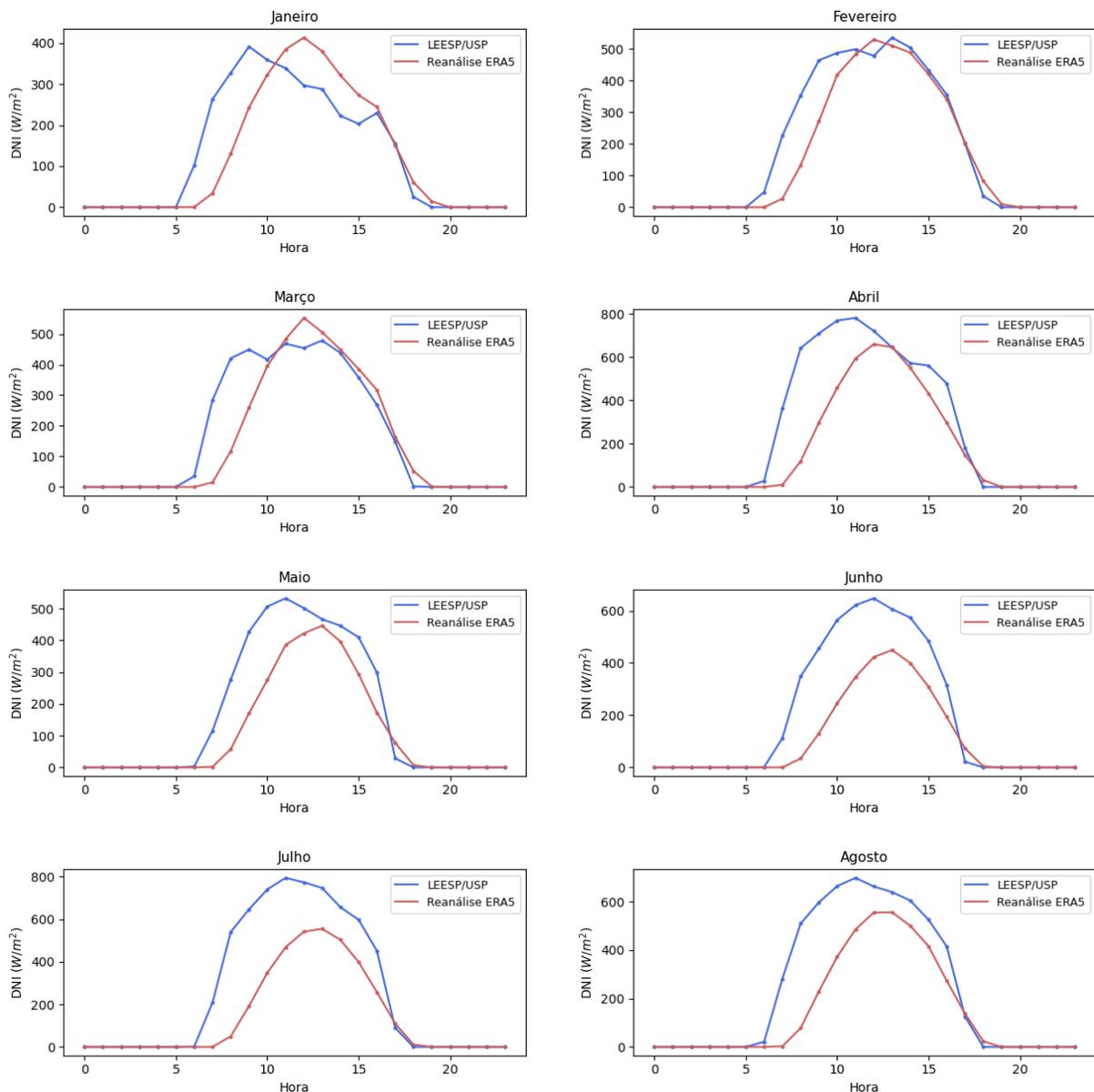


Figura 6 – Gráfico de dispersão para os pontos de ambas as bases de dados.

A seguir, na Fig. 7, são apresentadas as médias horárias para cada mês de 2016, na busca de analisar o comportamento das nuvens de pontos citadas acima. Observa-se uma superestimativa pontual principalmente para os meses de janeiro e novembro, meses com presença de chuvas, no meio do dia. Tal fator pode ser um indicativo de desempenho insatisfatório na simulação das nuvens durante a reanálise, conforme indicado por Jiang et al. (2020). Ademais, é notável a subestimação dos dados de reanálise durante os meses de inverno.



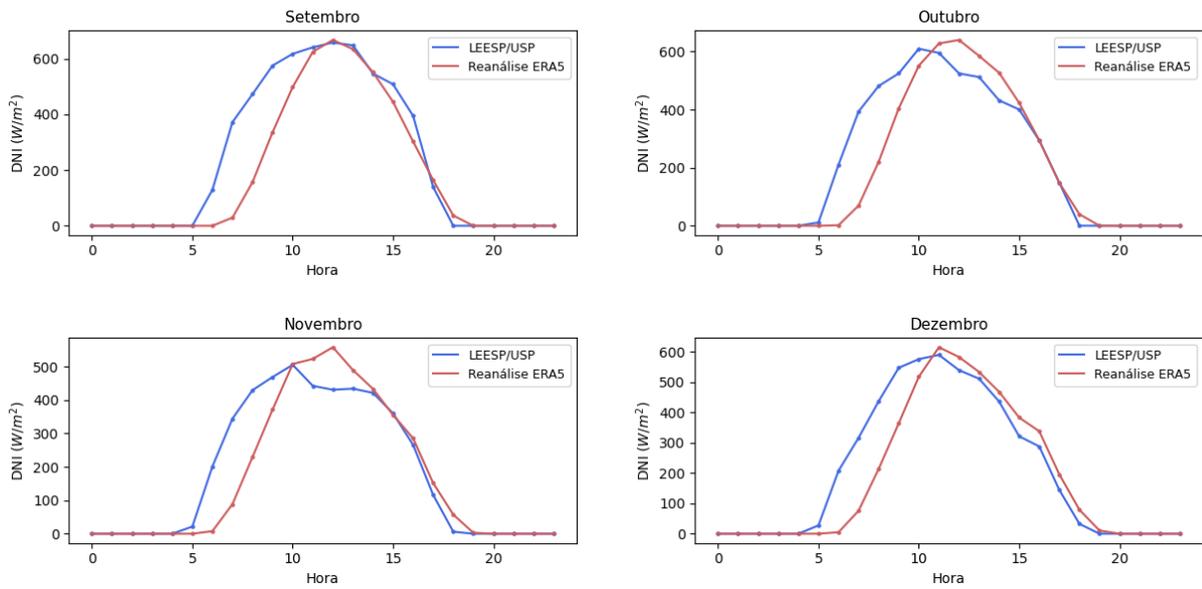
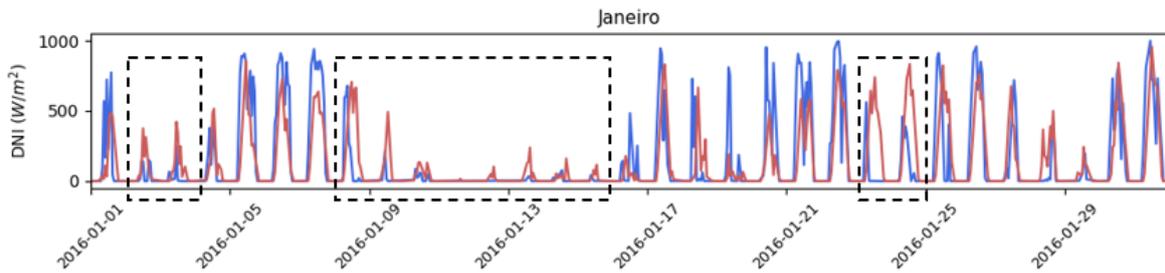


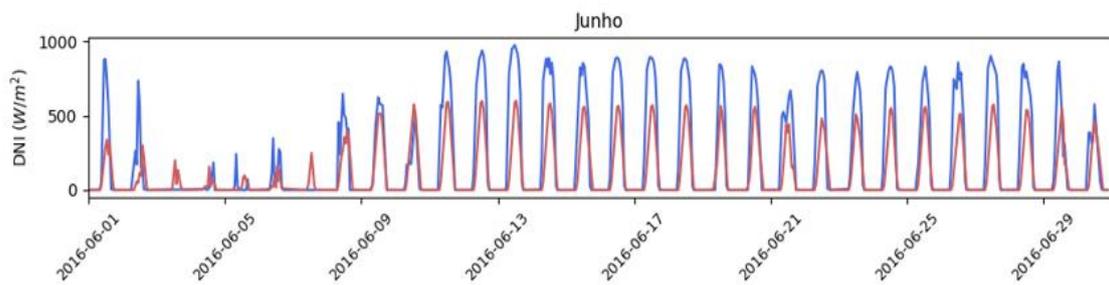
Figura 7 – Média horária para cada mês de 2016.

Em consonância com os comentários realizados anteriormente, a Fig. 8 apresenta o DNI para os meses de janeiro, junho e julho, para os dados da estação, em azul, e de reanálise, em vermelho. Para janeiro, observa-se uma superestimativa dos dados de reanálise para os dias 02, 03, 08, 09, 13, 14, 15, 23 e 24, em destaque nas caixas pontilhadas. Já para os meses de junho e julho, pode-se notar uma subestimativa em praticamente todos os dias dos meses.

(a)



(b)



(c)

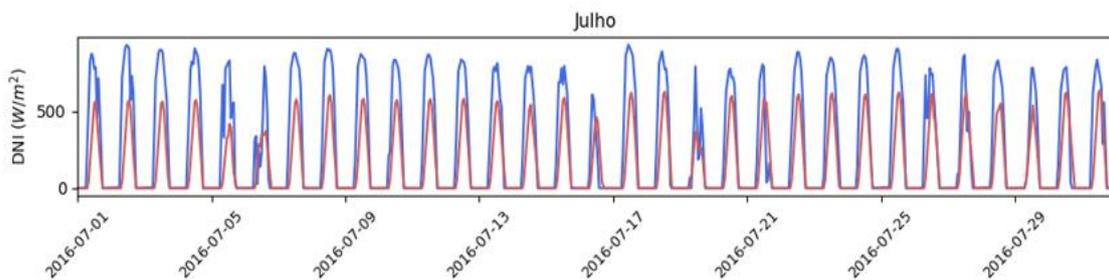


Figura 9 – DNI horário dos meses de (a) janeiro, (b) junho e (c) julho, para os dados da estação, em azul, e de reanálise, em vermelho.

6. DISCUSSÃO

Os indicadores de dispersão apresentaram resultados em consonância com o apresentado por Salazar et al. (2020), sendo o segundo modelo com maior desvio dentre os analisados pelo autor. Quando analisados os indicadores de semelhança de distribuição, quanto os indicadores visuais, é notável a diferença existente entre os dados mensurados pela estação presente no LEESP/USP, e os dados de reanálise, com fortes superestimativas em determinados meses, e substanciais subestimativas em outros meses, como apontado acima. Tais fatores são de grande relevância, uma vez que os anos típicos meteorológicos são fundamentais para uma modelagem do desempenho energético de determinado projeto em avaliação. Neste caso, considerando-se uma usina CSP, nos meses de superestimativa, entende-se que haveria a necessidade de utilização de alguma complementariedade, i.e. sistema de *backup*. Já no caso oposto, onde ocorre uma subestimativa, entende-se que a usina estaria conseguindo gerar a mais, tendo como consequência um aumento de seu fator de capacidade, onde tal energia poderia ser diretamente injetada na rede ou armazenada em um TES para despacho posterior. Entende-se, portanto, que o uso direto da base de dados, da maneira estudada no presente trabalho, pode divergir fortemente da realidade.

Todavia, ressalvas acerca da análise de similaridade devem ser levadas em conta, dentre elas, a utilização dos dados de reanálise sem remoção de viés estatístico, a qual pode influenciar significativamente eventos extremos, como os casos de subestimação ou superestimação. Ademais, pontos do processo também devem ser mencionados, como a utilização de apenas um ponto de grade na seleção do recurso solar dos dados de reanálise. Nesse quesito, demais abordagens de interpolação poderiam ser estudadas (e.g. “*inverse distance weighting*” – IDW). Por fim, um dos pontos mais importantes é a utilização de apenas um ano para a análise, justamente pela baixa representatividade estatística quando comparado a um histórico de ao menos 10 anos, como recomendado na construção de um TMY. A justificativa nesse caso se dá pela falta de dados compilados do histórico recente da estação.

7. CONCLUSÃO

O trabalho teve como objetivo analisar a similaridade dos dados medidos pela estação solarimétrica presente no LEESP/USP, na cidade de Pirassununga, para o ano-base de 2016, e compará-lo com os dados de reanálise do ERA5, produzidos pelo ECMWF, para o mesmo ano, visando a construção *a posteriori* de um ano típico meteorológico. Os resultados dos indicadores de dispersão ficaram em linha com os resultados apontados por Salazar et al. (2020), para o ERA5, com fortes desvios, como apontado pelo autor. As análises de similaridade de distribuição através do teste de Kolmogorov-Smirnov, bem como as análises qualitativas visuais demonstraram forte discrepância entre os dados para o referido ano, com substancial subestimação da irradiação normal direta em determinados meses do ano, no período de inverno. Apresentados tais resultados, entende-se que a utilização da base de dados de reanálise diretamente pode divergir da realidade apresentada em solo. Recomenda-se uma continuação dos estudos, aplicando técnicas de remoção de viés estatístico e demais métricas de interpolação de grade na busca de aproximação nos resultados, bem como a utilização, se possível, de um histórico maior de dados observados.

REFERÊNCIAS

- CARVALHO; R. S. *et al.* A INFLUÊNCIA DE POLÍTICAS PÚBLICAS EM MÉTRICAS ECONÔMICAS DE UM SISTEMA DE CALHAS PARABÓLICAS. Gramado: Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2018. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/489/489>. Acesso em: 17 out. 2023.
- CASTRO, N. *et al.* A Economia do Hidrogênio: transição, descarbonização e oportunidades para o Brasil. Rio de Janeiro: e-Papers, 2023. 336 p. ISBN 978-65-87065-57-1.
- CEBECAUER, T.; SURI, M. Typical Meteorological Year Data: SolarGIS approach. Energy Procedia, [S.L.], v. 69, p. 1958-1969, maio 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.195>.
- EPE. BEN 2023: relatório síntese. Relatório Síntese. 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 12 set. 2023.
- GREEN. Projeto Smile. Disponível em: http://www.fzea.usp.br/?page_id=4146. Acesso em: 19 out. 2023.
- GUEYMARD, C. A. A review of validation methodologies and statistical performance indicators for modeled solar radiation data: towards a better bankability of solar projects. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 39, p. 1024-1034, nov. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.117>.
- HERSBACH, H. *et al.* The ERA5 global reanalysis. Quarterly Journal Of The Royal Meteorological Society, [S.L.], v. 146, n. 730, p. 1999-2049, 15 jun. 2020. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/qj.3803>.
- JIANG, H. *et al.* Evaluation of the Total, Direct, and Diffuse Solar Radiations From the ERA5 Reanalysis Data in China. Ieee Geoscience And Remote Sensing Letters, [S.L.], v. 17, n. 1, p. 47-51, jan. 2020. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). <http://dx.doi.org/10.1109/lgrs.2019.2916410>.
- KOPP, G.; LEAN, J. L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance, Geophysical Research Letters. [S.L.], v. 38, 14 jan. 2011. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/2010gl045777>.

- LOVEGROVE, K.; STEIN, W. Concentrating solar power technology - Principles, developments, and applications. 1. ed. Oxford: Woodhead, 2012. v. 21
- MAAG, G.; OLIVEIRA, K. T. de; OLIVEIRA, C. E. L. de. Hybrid Solar Tower Pilot Plants for Co-Generation of Heat and Power for Brazilian Agro-Industry. In: Proceedings of the ISES Solar World Congress 2015, Daegu, South Korea. Anais... Daegu, South Korea: International Solar Energy Society, 2015. Disponível em: <<http://proceedings.ises.org/citation?doi=swc.2015.04.22>>.
- MÜLLER, C.; RAU, C.; SCHRÜFER, J. CSP in Non-Electrical Applications. Disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/system/files/papers/2014_muller_csp_in_non-electrical_application_1.pdf>. Acesso em: 13 jan. 2018.
- MUÑOZ-SABATER, J. *et al.* ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. Earth System Science Data, [S.L.], v. 13, n. 9, p. 4349-4383, 7 set. 2021. Copernicus GmbH. <http://dx.doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>.
- NREL – National Renewable Energy Laboratory. System Advisor Model (SAM). Disponível em: <https://sam.nrel.gov/>. Acesso em: 17 out. 2023.
- SALAZAR, G. *et al.* Solar irradiance time series derived from high-quality measurements, satellite-based models, and reanalyses at a near-equatorial site in Brazil. Renewable And Sustainable Energy Reviews, [S.L.], v. 117, p. 109478, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2019.109478>.
- SORIA, R.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. CONFIGURAÇÕES PARA OPERAÇÃO DE PLANTAS HELIOTÉRMICAS CSP COM ARMAZENAMENTO DE CALOR E HIBRIDIZAÇÃO NO BRASIL. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife. Anais... Recife: Plataforma Energia Heliotérmica, 2014. Disponível em: <http://energiaheliotermica.gov.br/pt-br/system/files/papers/2017_ramirez_road_map_for_creation_of_advanced_meteorological_data_sets.pdf>.
- URRACA, R. *et al.* Evaluation of global horizontal irradiance estimates from ERA5 and COSMO-REA6 reanalyses using ground and satellite-based data. Solar Energy, [S.L.], v. 164, p. 339-354, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2018.02.059>.
- WILCOX, S.; MARION, W. Users Manual for TMY3 Data Sets. Technical Report NREL/TP-581-43156. Golden: NREL, 2008. 58 p. Disponível em: <https://www.nrel.gov/docs/fy08osti/43156.pdf>. Acesso em: 8 out. 2023.

SIMILARITY ANALYSIS OF DIRECT NORMAL IRRADIATION FROM ERA5 REANALYSIS DATA AND DATA MEASURED *IN SITU*

Abstract. *With the growing concern regarding the climate change, attached to the energy transition, it is possible to see a soar in the installed capacity of renewable sources all around the world. Nevertheless, some sources are not dispatchable without battery, such as solar photovoltaics or wind energy. In this case, concentrated solar power with thermal storage shows itself as a viable solution. Nevertheless, project's simulations of this kind of technology required the so-called typical meteorological year, with a time series of at least 10 years of measurements, which can be a liability for some locations. Hence, an alternative is to use satellite or reanalysis data. This work aimed to analyze the similarity between data measure locally in a solar station located in the University of São Paulo campus in the city of Pirassununga, with the reanalysis data from ERA5, for a base-year. The assessment consisted of error indicators, distribution similarity indicators, as well as visual indicators. The results presented differences between the data for all indicators, with a strong underestimation of reanalysis data for the base-year winter months, which results in a large divergence between simulated and real data.*

Keywords: *Typical Meteorological Year, Concentrated Solar Power, ERA5*