

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DE COMPARAÇÃO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR MEDIDOS
LOCALMENTE COM DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR BASEADOS EM SATÉLITES

por

Chen Chun Wai

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Agosto de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Chen, Chun Wai
ESTUDO DE COMPARAÇÃO DE DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR
MEDIDOS LOCALMENTE COM DADOS DE IRRADIAÇÃO SOLAR
BASEADOS EM SATÉLITES / Chun Wai Chen. -- 2024.
19 f.
Orientadora: Leticia Jenisch Rodrigues.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Energia Solar Fotovoltaica. 2. Dados de
Irradiância Solar. I. Rodrigues, Leticia Jenisch,
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Chen Chun Wai

Estudo de comparação de dados medidos (Irradiação Global Horizontal) com dados satélites

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientadora: Prof^a. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues

Comissão de Avaliação:

Prof^a. Dra. Letícia Jenisch Rodrigues (Presidente)

Prof. Dr. Cirilo Seppi Bresolin

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Me. Alex Willian Petter

Porto Alegre, Agosto de 2024

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela minha jornada da vida até hoje.

Aos meus pais, pela dedicação dados a mim durante toda a trajetória, me dando forças nos momentos mais desesperadores desde a Malásia até o Brasil.

Aos meus dois irmãos, pelos apoios que dão a mim quando preciso.

A minha professora orientadora, Letícia, pela ajuda, atenção e disponibilidade.

A todos os meus amigos, por ajudarem e fazerem essa trajetória não tão solitária.

Agradeço à DNV, por proporcionar um ambiente profissional de aprendizado para o meu desenvolvimento profissional, especialmente na área de sustentabilidade.

À todas as pessoas, que de uma forma direta ou indireta, contribuíram para que eu consiga terminar essa jornada.

Chen, Chun Wai. **Estudo de comparação de dados de irradiação solar medidos localmente com dados de irradiação solar baseados em satélites**. 2024. 19. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

A escolha dos dados climáticos é um dos fatores importantes na previsão de geração de energia solar fotovoltaica. Desse modo, o presente trabalho tem como objetivo estudar e analisar os dados de irradiância solar de satélites de três empresas diferentes, a Solcast, a Solargis e a Vaisala. Para isso, os dados satélites foram comparados com as medições locais a fim de obter os vieses e as raízes de erro quadrático médio (REQM) para três locais diferentes no Brasil. Os dados medidos foram, primeiramente, tratados e filtrados de acordo com a norma IEC TS 61724-3:2016. Após a análise de resultados, observou-se que todos os fornecedores de dados de satélites apresentaram tanto os vieses como as REQM dentro do seu intervalo de confiança esperado. A Vaisala apresentou uma média absoluta de viés menor de 1,71%, enquanto a Solargis e a Solcast apresentaram 2,11% e 2,56%, respectivamente. No caso de REQM em resolução horária, nota-se que a Solcast tem uma média menor com valor de 16,44%, enquanto a Solargis e a Vaisala apresentaram 18,25% e 18,96%, respectivamente. Portanto, este estudo demonstra que para poder obter a melhor precisão na análise de recurso solar é recomendado a realizar a avaliação dos recursos disponíveis, já que nenhum fornecedor é melhor que os outros consistentemente.

PALAVRAS-CHAVE: Energia Solar Fotovoltaica, Dados de Irradiância Solar, Solargis, Solcast, Vaisala.

Chen, Chun Wai. **Comparison study of locally measured solar irradiation data with satellite-based solar irradiation data.** 2024. 19. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

The choice of climate data is one of the most important factors in forecasting photovoltaic solar energy generation. The aim of this paper is therefore to study and analyze satellite solar irradiance data from three different companies, Solcast, Solargis and Vaisala. To do this, the satellite data was compared with local measurements in order to obtain the biases and root mean square errors (RMSE) for three different locations in Brazil. The measured data was first processed and filtered according to IEC TS 61724-3:2016. After analyzing the results, it was observed that all satellite data providers presented both biases and REQMs within their expected confidence interval. Vaisala had a lower absolute average bias of 1.71%, while Solargis and Solcast had 2.11% and 2.56%, respectively. In the case of REQM in hourly resolution, Solcast had a lower average of 16.44%, while Solargis and Vaisala had 18.25% and 18.96%, respectively. Therefore, this study shows that in order to obtain the best accuracy in solar resource analysis, it is recommended to evaluate the available resources, since no supplier is consistently better than the others.

KEYWORDS: Photovoltaic Solar Energy, Solar Irradiance Data, Solargis, Solcast, Vaisala.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	1
4. FUNDAMENTAÇÃO.....	2
4.1 Energia Solar Fotovoltaica	2
4.2 Simulação de Projetos Sistemas fotovoltaicos	2
4.3 Dados de radiação solar.....	2
4.4 Dados de radiação solar derivado de satélites	2
4.5 Métrica estatística.....	3
5. CASO DE ESTUDO	3
5.1 METODOLOGIA.....	4
5.1.1 Aquisição e Tratamento de dados.....	4
5.1.2 Análise de dados.....	5
6. RESULTADOS	5
6.1 Local 1	5
6.2 Local 2	6
6.3 Local 3	7
6.4 Análise dos resultados	8
7. CONCLUSÃO.....	10
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12

1. INTRODUÇÃO

Impulsionada pela necessidade de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos das mudanças climáticas relacionadas às emissões de gases de efeito estufa, a busca por fontes de energia sustentável e renovável intensifica-se cada vez mais. A adoção de fontes renováveis, como a energia eólica e solar, na geração de energia tem apresentado um rápido crescimento em todo o mundo, e a tecnologia também está cada vez mais evoluída, com maior eficiência na conversão energética.

No Brasil, o setor solar fotovoltaico vivenciou um crescimento significativo na última década, como informou a Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2024), “Nos últimos sete anos, a capacidade instalada de energia solar fotovoltaica no Brasil cresceu mais de 40 vezes, saltando de aproximadamente 1 gigawatt (GW) em 2017 para mais de 42 GW nos primeiros meses de 2024”. Esse crescimento está atrelado à excelente disponibilidade de recursos solares em todas as regiões do país e à conscientização popular cada vez mais presente sobre sustentabilidade.

Com o rápido crescimento das usinas fotovoltaicas, muitos desenvolvedores de usinas buscam a certificação de energia e realizam simulações dos projetos para prever a energia produzida. Para obter previsões com menor incerteza, a escolha dos dados de irradiação solar do local é um dos fatores mais importante. Esses dados climáticos geralmente são adquiridos de empresas que oferecem dados de irradiação baseados em satélites.

O presente trabalho de conclusão de curso visa comparar os dados de irradiação solar de três fornecedores diferentes: Solcast, Solargis e Vaisala. Os dados de satélites serão comparados aos dados medidos localmente em estações solarimétricas em três locais distintos no Brasil. Para avaliar a precisão dos dados fornecidos por esses fornecedores, serão calculadas duas métricas estatísticas: o viés e a raiz do erro quadrático médio (REQM).

2. OBJETIVOS

Avaliar e comparar dados de irradiação de satélites e dados medidos localmente em três locais distintos no Brasil, a fim de estudar e verificar se as incertezas dos dados de satélites estão dentro dos seus desvios padrões e intervalos de confiança fornecidos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em um relatório científico, D. Yang e J.M. Bright (2020), com objetivo de comparação de qualidades dos diferentes fornecedores, fizeram um estudo de validação de dados derivados de satélites com dados locais medidos pela Baseline Solar Radiation Network (BSRN), uma rede de monitoramento de radiação solar que fornece dados gratuitamente para locais em todo o mundo. O estudo mostra que a Solcast, único fornecedor comercial incluído nesse estudo, apresentou o melhor desempenho em termos de raiz erro quadrático médio.

Em um estudo realizado por Pierre Ineichen (2014), foi conduzida uma validação dos dados derivados de satélites de seis fornecedores diferentes na Europa, comparando-os com dados medidos localmente em 18 locais europeus e mediterrâneos ao longo de oito anos. O estudo destaca que o método da Solargis apresenta o melhor desempenho em termos de viés e raiz do erro quadrático médio. Além disso, o estudo afirma que os dados de irradiação global horária derivados de satélites apresentam uma baixa incerteza, tipicamente em torno de 17%.

J.K. Copper e A.G. Bruce (2018) realizaram uma comparação cruzada de mapas anuais de irradiação solar na Austrália, verificando as discrepâncias observadas entre os mapas fornecidos. O estudo aponta que os dados solares da Solargis apresentam um desvio médio de

6% a 8% na região sul da Austrália. No entanto, isso ocorre porque outros fornecedores, como Vaisala, Meteonorm 7.2 e NASA, subestimam a irradiação anual nessa região. O estudo destaca o potencial de utilizar várias fontes de dados para obter uma estimativa mais robusta da irradiação anual.

4. FUNDAMENTAÇÃO

4.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia fotovoltaica é uma forma de geração de energia elétrica a partir da conversão direta da irradiação solar em eletricidade, utilizando o efeito fotovoltaico. Esse efeito ocorre quando a radiação solar incide sobre materiais semicondutores que estão presentes nas células fotovoltaicas. A corrente elétrica gerada a partir desse efeito é uma corrente contínua e é necessário um inversor para a converter em corrente alternada para que essa energia possa ser conectada à rede elétrica (Pinho e Galdino, 2014).

4.2 Simulação de Projetos Sistemas fotovoltaicos

A simulação de projeto de sistema fotovoltaico é uma das etapas iniciais do planejamento de sistema de geração de energia solar. Essa etapa utiliza ferramentas computacionais especializada para modelar o desempenho de um sistema de energia solar e prever sua eficiência e viabilidade. Essa simulação considera diversos fatores, como o layout e as características do sistema, a tecnologia e o modelo dos painéis solares e dos inversores e os dados meteorológicos como irradiação solar. Entre as ferramentas mais comuns estão o PVsyst e o PV-Sol (Pinho e Galdino, 2014) e SolarFarmer (SolarFarmer, 2024).

4.3 Dados de radiação solar

Dados de radiação solar estão disponíveis em várias formas: em medições instantâneas, a taxa de energia incidente em uma superfície, irradiação em W/m^2 , ou em valores de irradiação integrados no tempo, definida como energia radiante incidente acumulada em um período de tempo, irradiação em Wh/m^2 . Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar (Pereira et al., 2017) a irradiação global horizontal (GHI) é a taxa de energia total por unidade de área incidente numa superfície horizontal.

4.4 Dados de radiação solar derivado de satélites

Existem dados de radiação solar que são derivados de satélites, esses são estimados através de imagens de satélites meteorológicos geoestacionários, dados atmosféricos e meteorológicos. Em geral, esses modelos são menos precisos em comparação com as medições de boa qualidade. Entretanto, sua vantagem é a cobertura geográfica e a capacidade de fornecer dados para qualquer local. Os fornecedores da indústria solar como Solargis, Solcast e Vaisala possuem seus próprios algoritmos e modelos avançados que analisam e estimam os dados solares. O processo de estimação, em geral, consiste em analisar a cobertura de nuvem e impacto de aerossóis e assim obter os dados como irradiação global (DNV, 2024).

4.5 Métrica estatística

Para avaliar a acurácia das estimativas de dados solares, são utilizadas duas métricas estatísticas para realizar a comparação entre os dados medidos e dados derivados de satélites: o viés e a raiz do erro quadrático médio (REQM). Esses são definidos a partir das equações abaixo. (Pereira et al., 2017)

$$Viés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i \quad (1)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2} \quad (2)$$

$$nViés = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i - O_i * \frac{100}{\bar{o}} \quad (3)$$

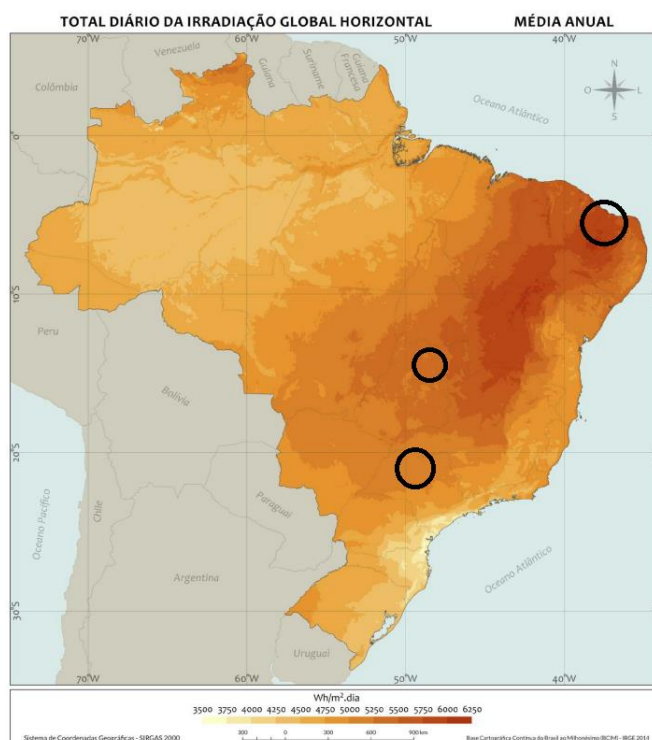
$$nREQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 * \frac{100}{\bar{o}}} \quad (4)$$

Onde P é a grandeza estimada, O é a grandeza medida, \bar{o} é a média da grandeza medida e n representa quantidades de medições. As equações 3 e 4 com prefixo n são as suas formas normalizadas em porcentagens. O viés é útil para avaliar a precisão de dados a longo prazo e REQM mede a acurácia da estimativa.

5. CASO DE ESTUDO

Os locais do estudo nesse trabalho estão situados em três estados diferentes do Brasil, sendo eles Rio Grande do Norte, Goiás e São Paulo. Os locais foram escolhidos com base na média anual estimada no Atlas Brasileiro de Energia Solar 2ª edição (Pereira et al., 2017), conforme mostrado na figura abaixo.

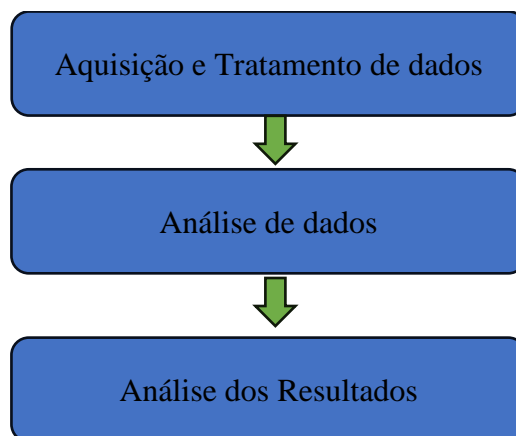
Figura 1 : Mapa de localizações do estudo.



Fonte: Adaptado do Atlas,2017

5.1 METODOLOGIA

Figura 2 : Etapas do trabalho.



Fonte: Autor

A execução do trabalho consiste em 3 etapas conforme mostrado na figura 2.

5.1.1 Aquisição e Tratamento de dados

Os dados medidos localmente são geralmente armazenados em uma unidade central de memória (*datalogger*) da estação solarimétrica. Para garantir a qualidade dos dados e iniciar a análise, foram realizados tratamentos e limpeza dos dados. De acordo com a norma IEC TS

61724-3:2016, os valores de irradiância medidos que forem menores que -6 W/m^2 ou superiores a 1500 W/m^2 devem ser filtrados. Além disso, valores que apresentem mudanças abruptas entre os pontos de dados, detectados pelo uso de derivadas com variações superiores a 800, também devem ser filtrados. Para esse estudo, a análise foi realizada somente com os períodos diurnos para eliminar o impacto das estimativas de 0 W/m^2 durante a noite. O período diurno foi determinado utilizando o filtro de valores horários pela média do ângulo zenital solar menor que 90 graus e pela média da irradiância global horizontal (GHI) maior que 0. Os dados de irradiância da Solcast e Vaisala foram obtidos com resolução horária, enquanto os dados locais e da Solargis tinham resolução de 15 minutos, sendo ambos reamostrados para resolução de 1 hora usando média aritmética. Ademais, foram analisados dados em resolução diária, onde a irradiância foi integrada ao longo do período para obter a irradiação diária. Nota-se que os dados de irradiação diária obtidos de dias com falhas de medições são excluídos para garantir a precisão do estudo.

5.1.2 Análise de dados

Para garantir a validade deste estudo, foram selecionados locais com, no mínimo, 12 meses de medições locais, abrangendo assim a variabilidade anual. Em seguida, os dados derivados de satélites foram filtrados para corresponder ao mesmo período dos dados medidos localmente. A Tabela 1 apresenta algumas características obtidas na análise inicial, como a quantidade de dados válidos utilizados para cada local e as respectivas médias diárias de irradiação global horizontal, disponíveis para comparação.

Tabela 1: Características dos locais.

	Local 1	Local 2	Local 3
Estado do local	Rio Grande do Norte	Goiás	São Paulo
Números de dados válidos para comparação	17.839	5.528	5.517
Médias diárias GHI [Wh/m^2]	5.601	5.422	5.478

Fonte: Autor

6. RESULTADOS

Os resultados de cada local serão apresentados neste capítulo do trabalho. As principais métricas utilizadas para a análise são o viés e a REQM. Como mencionado anteriormente, o viés representa um padrão de erro médio, onde um viés positivo indica uma superestimativa do modelo, enquanto um viés negativo indica uma subestimativa (Pereira et al., 2017). A REQM, por sua vez, é utilizada para indicar as discrepâncias entre os valores modelados de curto prazo com valores observados.

6.1 Local 1

Conforme os resultados mostrados para o local 1 na Tabela 2, observa-se que a Solcast apresentou um viés positivo de $4,78 \text{ W/m}^2$ (1,09%). Isso indica que teve uma superestimativa em relação aos valores medidos, enquanto a Vaisala e a Solargis mostraram vieses negativos de $-6,98 \text{ W/m}^2$ (-1,60%) e $-5,67 \text{ W/m}^2$ (-1,30%), respectivamente, sugerindo subestimativas da irradiância. Por outro lado, ao avaliar a nREQM, é possível notar que, em resolução horária, a Solargis apresentou um erro menor (14,52%), porém, não muito diferente da Solcast (14,99%). Os gráficos da figura 3 mostram que a Vaisala apresenta a maior dispersão de

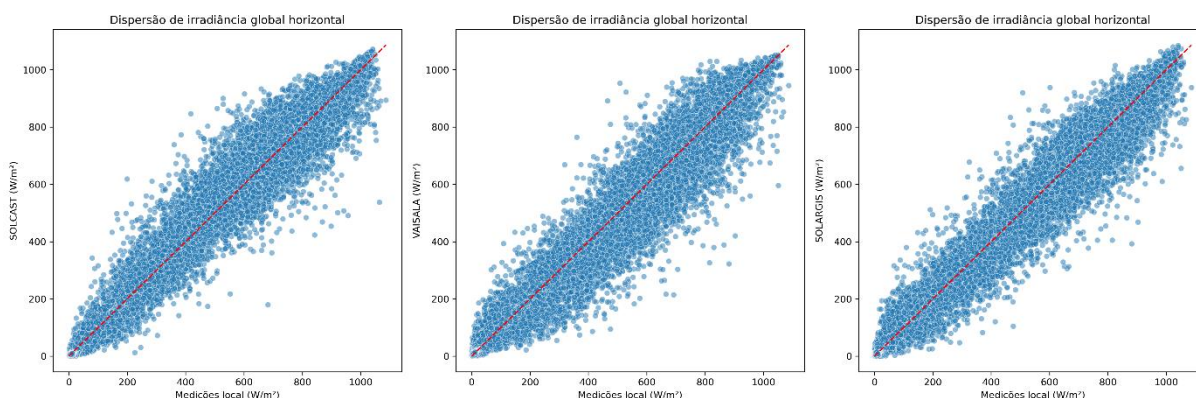
irradiância, indicada pelos espalhamentos dos pontos em torno da diagonal central que representa a estimativa ideal. Para o local 1, portanto, esses resultados sugerem que a Solcast e a Solargis apresentam um desempenho ligeiramente superior ao da Vaisala.

Tabela 2: Resultados do local 1.

	Solcast	Vaisala	Solargis
Viés [W/m^2]	4,78	-6,98	-5,67
nViés [%]	1,09	-1,60	-1,30
nREQM horária [%]	14,99	16,48	14,52
nREQM diária [%]	5,57	7,00	5,67
nREQM mensal [%]	2,35	2,55	2,46

Fonte: Autor

Figura 3 : Gráficos de dispersão entre os dados medidos e dados derivados de satélites para a Irradiância Global Horizontal no local 1. A esquerda, Solcast, ao centro, a Vaisala, a direita, Solargis.



Fonte: Autor

6.2 Local 2

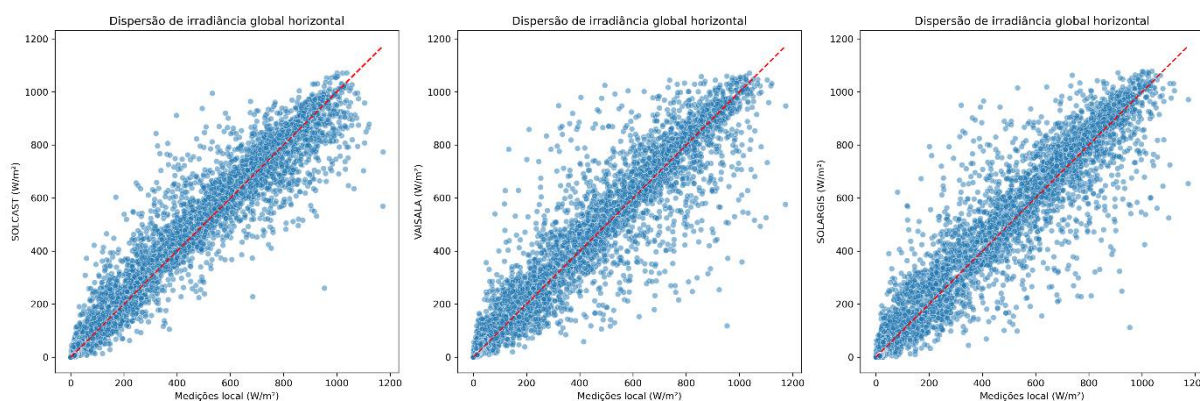
Para local 2, a Tabela 3 aponta que a todos os fornecedores apresentaram um viés positivo com o maior sendo a Solargis (3,5%) indicando uma superestimativa em relação aos valores medidos, seguida pela Solcast (3,08%), e pela Vaisala (2,5%), ou seja, a Vaisala teve o menor viés em comparação aos outros. Entretanto, ao avaliar a nREQM, é possível observar que, em resolução horária, a Solcast apresentou um valor de 19,75%, indicando uma precisão maior em comparação com a Vaisala e a Solargis, que registraram valores de 24,41% e de 24,49% respectivamente. Os gráficos da figura 4 mostram também que a Solcast apresentou a menor dispersão, com menor quantidade de valores distantes da estimativa ideal. Contudo, os resultados demonstram que, apesar da maior precisão horária da Solcast, a Vaisala teve um desempenho mensal mais consistente e isso é refletido pelo menor viés entre os três fornecedores.

Tabela 3: Resultados do local 2.

	Solcast	Vaisala	Solargis
Viés [W/m^2]	13,20	10,72	15,00
nViés [%]	3,08	2,50	3,50
nREQM horária [%]	19,75	24,41	24,49
nREQM diária [%]	7,98	9,35	9,85
nREQM mensal [%]	4,35	3,69	5,04

Fonte: Autor

Figura 4 : Gráficos de dispersão entre os dados medidos e dados derivados de satélites para a Irradiância Global Horizontal no local 2. A esquerda, Solcast, ao centro, a Vaisala, a direita, Solargis.



Fonte: Autor

6.3 Local 3

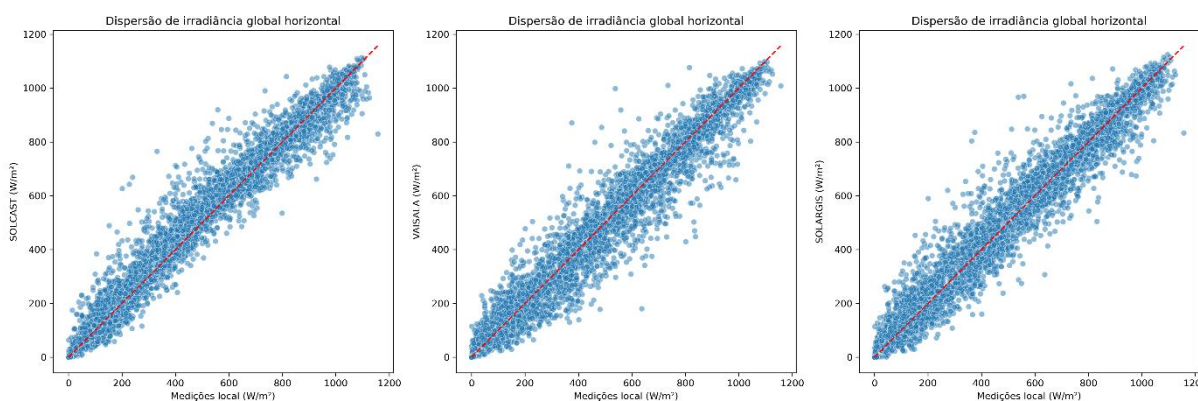
Os resultados para o local 3 são apresentados na Tabela 4. É possível notar que a Solcast teve o maior viés positivo, com $15,00 W/m^2$ (3,51%) em comparação com os outros dois fornecedores, A Solargis e a Vaisala que apresentam viés de $6,60 W/m^2$ (1,54%) e de $-4,38 W/m^2$ (-1,03%) respectivamente. Analisando a nREQM e os gráficos na figura 5 das três fontes, percebe-se que mesmo com os erros de estimativa de curto prazo parecidos entre os três, a Vaisala e a Solargis demonstram um desempenho melhor na estimativa mensal para esse local.

Tabela 4 : Resultados do local 3.

	Solcast	Vaisala	Solargis
Viés [W/m^2]	15,00	-4,38	6,60
nViés [%]	3,51	-1,03	1,54
nREQM horária [%]	14,59	15,98	15,75
nREQM diária [%]	5,84	6,03	5,57
nREQM mensal [%]	4,00	2,13	2,62

Fonte: Autor

Figura 5 : Gráficos de dispersão entre os dados medidos e dados derivados de satélites para a Irradiância Global Horizontal no local 3. A esquerda, Solcast, ao centro, a Vaisala, a direita, Solargis.



Fonte: Autor

6.4 Análise dos resultados

De acordo com a validação da Solcast (DNV, 2024), o viés esperado para os dados de satélites de irradiância global horizontal é de 0,33%, com um desvio padrão de $\pm 2,47\%$ e um intervalo de confiança de 80% que varia de -2,84% a 3,50%. A média do erro de estimativa (REQM) em resolução horária pelo modelo da Solcast é de 15,99% com um desvio padrão de $\pm 5,74\%$. Sendo assim, com uma média de viés de 2,56% e de erro estimativa horária de 16,44%, para esses 3 locais, os resultados obtidos apontam que os dados satélites adquiridos da Solcast estão dentro de intervalo de confiança proposta pelo fornecedor.

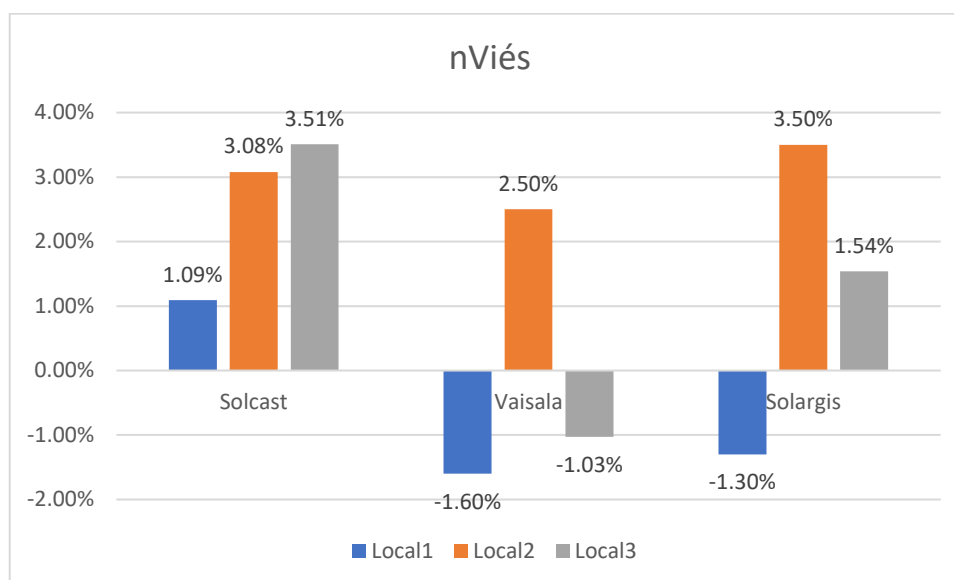
Conforme mostrado na Global Solar Atlas 2.0 Validation report (Solargis, 2019), o modelo da Solargis apresenta um viés 0,3%, com um desvio padrão de $\pm 3,00\%$ e um intervalo de confiança de 80% de $\pm 3,90\%$. Por outro lado, para a REQM horária, o valor esperado é de 16,8% com um desvio padrão de 6,1%. Os resultados do estudo mostram que os dados derivados de satélites, para esses 3 locais, possuam uma média absoluta de viés de 2,11% e a média REQM horária de 18,25%. Dessa forma, é possível afirmar que os dados fornecidos pela Solargis atinjam as qualidades garantidas estando dentro de intervalo de confiança descrita na validação.

Por último, mas não menos importante, segundo a validação Vaisala Global Solar Dataset 2019 Release VER.1., (Vaisala, 2020), o viés dos dados de irradiância solar pelo modelo da Vaisala é de 1,2%, com um desvio padrão de $\pm 4,09\%$. A REQM horária da Vaisala é esperada

de ser 19,94%, entretanto, o desvio padrão não foi fornecido. De acordo com os resultados da comparação, os dados de satélites da Vaisala que apresentam uma média absoluta de viés de 1,71% e uma média do erro de estimativa horária de 18,96% estão, então, dentro de intervalo determinado pela fonte.

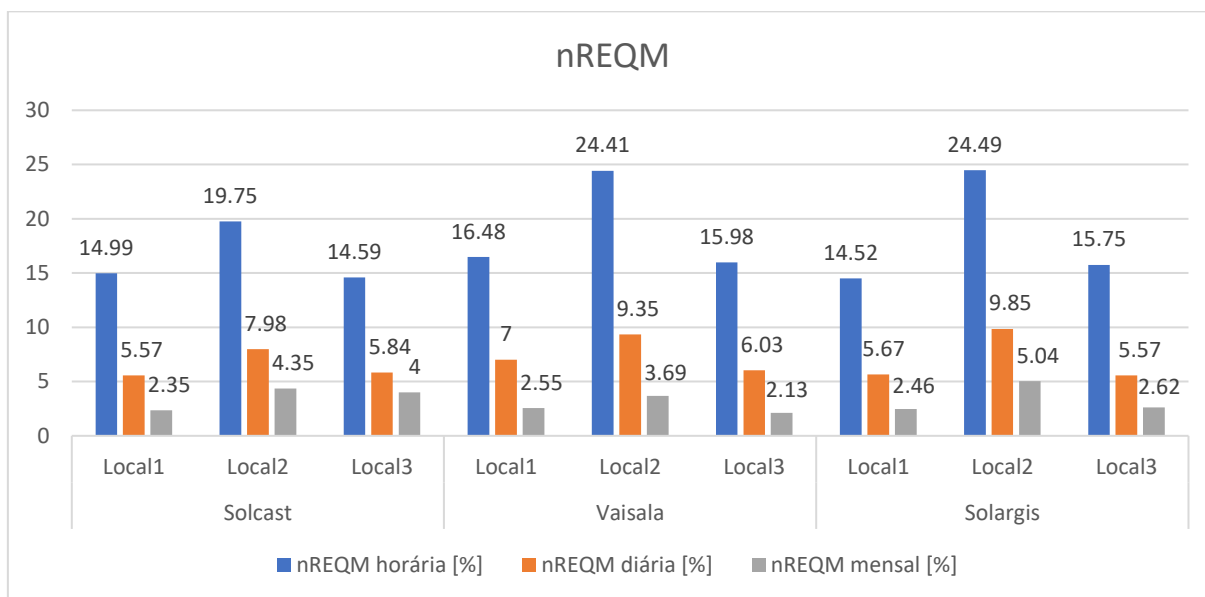
Por fim, nas figuras 6 e 7 são apresentados os resumos dos resultados obtidos neste estudo. Os gráficos na figura do viés indicam que o modelo da Solcast tem uma tendencia de superestimativa em comparação com outros dois modelos. Além disso, é possível perceber que, à medida que a resolução aumenta, os erros de estimativas diminuem, ou seja, a REQM horaria é sempre maior que a REQM diária, que por sua vez é sempre maior que a REQM mensal. Isso é devido ao fato de que os dados obtidos modelos baseados em satélite, em geral, são derivados de imagens satélites que possuam resolução espacial alta enquanto as medições locais são fornecidas em pontos específicos (Solargis, 2019).

Figura 6 : Resumo dos resultados de nViés dos três fornecedores em 3 locais.



Fonte: Autor

Figura 7 : Resumo dos resultados de nREQM dos três fornecedores em 3 locais.



Fonte: Autor

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo estudar a precisão dos dados de irradiância solar derivados de satélites para que as simulações dos projetos de sistemas fotovoltaicos possam ter precisão maior em relação ao recurso solar. Neste trabalho, foi realizado um estudo de comparação entre os dados de irradiação solar de satélites de três fornecedores diferentes e os dados medidos localmente. Para isso, foram escolhidos três locais situados em estados diferentes do Brasil, sendo eles Rio grande do Norte, Goiás e São Paulo. Foram consideradas as medições de períodos superiores a 12 meses, possibilitando uma comparação que incluía sazonalidade do local. Além disso, somente dados diurnos foram utilizados para a análise eliminando o impacto dos dados com ausência de irradiância solar.

Os resultados obtidos indicam que os dados de irradiância solar derivados de satélites são, em geral, precisos e confiáveis ao comparar com medições locais. Os produtos de satélites, para os locais selecionados apresentam uma média de erro de estimativa de 17,8% para os dados horários, 7% para os diários e 3,24% para os mensais. Ademais, os vieses apresentados também mostram que os dados de satélites em geral não apresentam um erro sistemático grande, com uma média absoluta de 2,13%.

Para o primeiro fornecedor, a Solcast, a análise dos resultados indica que a média do viés pelos dados de irradiância global horizontal é de 2,56% e que a média do erro de estimativa horária é de 16,44%. Dessa forma, é possível afirmar que os produtos da Solcast estão de acordo com a validação e atingiram a incerteza fornecida. Além disso, é possível perceber que a Solcast apresenta uma tendência de superestimativa com todos os três vieses positivos, com o maior deles no local 3, situado em São Paulo (3,51%).

No caso da Solargis, a média absoluta de viés apresentada para os três locais estudados é de 2,11%, a qual indica que os dados derivados de satélites estão dentro de intervalo de confiança esperado pelo fornecedor. Por outro lado, a média do erro de estimativa horária é de 18,25%, o que também atinge a incerteza indicada na validação da Solargis.

Por fim, para a Vaisala, a média absoluta de viés obtida é de 1,71% para os três locais estudados. É possível notar que a Vaisala apresenta a menor média absoluta de viés entre os três fornecedores, com o menor deles no local 3 (-1,03%). Além disso, a Vaisala apresentou vieses negativos em 2 locais analisados indicando uma tendência de subestimativa do modelo. A média do erro de estimativa horária é a maior entre as três fontes satélites, de 18,96%, porém, esse valor está dentro da incerteza fornecida pela empresa.

O presente trabalho ressalta que um fornecedor com o melhor resultado de um local não necessariamente apresentará o melhor resultado para os outros locais. Portanto, torna-se essencial a análise dos recursos solares para cada local de projetos de sistemas fotovoltaicos, devendo ser realizada para garantir a menor incerteza da simulação.

Para os estudos futuros, seria indicado aumentar o número de locais da análise, assim será possível obter um resultado com menos incerteza. Além disso, com a diversificação dos locais nos quais os dados são medidos, o resultado pode definir se o modelo satélite tem um melhor desempenho em regiões que tem média maior ou menor de irradiância solar. Por fim, seria interessante aumentar o número de fornecedores de dados de irradiância solar de satélites, tanto pelos órgãos públicos como por setores privados, uma vez que possam apresentar um resultado diferente dos três analisados nesse trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABSOLAR. **A evolução tecnológica fotovoltaica e seus benefícios ao Brasil**. Disponível em <<https://www.absolar.org.br/artigos/a-evolucao-tecnologica-fotovoltaica-e-seus-beneficios-ao-brasil/>> Acesso em : 7 de Agosto 2024.

DNV, **REVIEW AND VALIDATION OF SOLCAST HISTORICAL AND TMY DATA**. 2024. Disponível em: <<https://www.dnv.com/publications/review-and-validation-of-solcast-historical-and-tmy-data/>>. Acesso em: 7 de Agosto 2024.

D. Yang e J.M. Bright, **Worldwide validation of 8 satellite-derived and reanalysis solar radiation products: A preliminary evaluation and overall metrics for hourly data over 27 years**, 2020. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.016> >

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. e RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. INPE, 2017.

Pierre Ineichen, **Long term satellite global, beam and diffuse irradiance validation**, 2014. Disponível em: < [doi: 10.1016/j.egypro.2014.02.179](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.02.179) >

J.K. Copper e A.G. Bruce, **Comparison of Annual Global Horizontal Irradiation Maps for Australia**, 2018.

PINHO, João Tavares; GALDINO, Marco Antonio. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro, 2014.

SolarFarmer, 2024. Disponível em :< <https://www.dnv.com/software/services/solarfarmer/>>. Acesso em : 7 de Agosto 2024.

Solargis, **GLOBAL SOLAR ATLAS 2.0 VALIDATION REPORT**. 2019. Disponível em: <<https://solargis.com/technology/methodology/accuracy-and-comparisons/overview>>. Acesso em: 7 de Agosto 2024.

The International Electrotechnical Commission (IEC), **IEC TS 61724-3:2016 Photovoltaic system performance Part 3: Energy evaluation method**. 2016

Vaisala, **Vaisala Global Solar Dataset 2019 Release REV. 1**. 2020. Disponível em: <<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/WEA-DIG-RE-Vaisala-SolarValidation-WP-8.5x11-v1.pdf>>. Acesso em: 7 de Agosto 2024.