

QUALIFICAÇÃO DE DADOS PARA GERAÇÃO DE MAPA DE RADIAÇÃO SOLAR DO ESTADO DE PERNAMBUCO

1 INTRODUÇÃO

A utilização da energia solar fotovoltaica, no Brasil, vem apresentando crescimento exponencial. As aplicações de média e baixa capacidade são o carro chefe deste desenvolvimento. A potência instalada em micro e minigeração até o momento gira em torno de 10 GW (ANEEL, 2022).

Em relação às usinas de grande porte, a EPE (Empresa de Pesquisa Energética) vem realizando leilões de contratação de energia com fonte solar desde 2013. Em 2018 foram habilitados 422 projetos solares fotovoltaicos, totalizando 17.916 MWp, com previsão de suprimento em novembro de 2022. Do total do leilão, o Estado de Pernambuco teve 31 empreendimentos habilitados com 1.169 MWp ao todo (EPE, 2018).

Para que estes empreendimentos sejam cada vez mais presentes no cenário regional e nacional, tanto nos leilões como em instalações para consumo próprio, o recurso solar é uma das variáveis que influenciam diretamente nos estudos de localização dos projetos. Tais estudos cruzam diversas informações para eleger locais que atendam simultaneamente diversas necessidades, como por exemplo o acesso a linhas de transmissão, estradas, entre outros. A necessidade de informações precisas sobre a disponibilidade e variabilidade do recurso solar é fator preponderante e primordial na avaliação econômica e de viabilidade de um empreendimento.

Uma das maneiras de se disponibilizar informações sobre o recurso solar é na forma de mapas, pois seu aspecto visual permite ao analista ou investidor, observar diretamente áreas e localidades que atendam a sua necessidade de conhecer, onde existe o recurso solar com determinada intensidade. Neste sentido, foram confeccionados diversos mapas solares em escala regional e nacional: Tiba (2000) – 1º atlas solarimétrico brasileiro, Pereira *et al* (2006) – 2º atlas solarimétrico brasileiro, Tiba *et al* (2014) – mapa solarimétrico de Minas Gerais, Krenzinger e Aguiar (2016) – mapa de produtividade fotovoltaica do Rio Grande do Sul, Pedrosa Filho e Cavalcanti (2020) – Mapa de irradiação global do Estado de Pernambuco, Studzinsk (2017) – Atlas Solar e Eólico de Pernambuco, entre outros.

E para que todos os mapas possuam uma maior confiabilidade, é necessária uma excelente coleta e qualificação das informações. E para isso faz-se necessário um minucioso tratamento e uma observação do comportamento diário da irradiação, verificando a possibilidade de eventuais falhas/erros, resultando assim em falta ou inutilização de determinados dados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

São muitas as fontes que possam causar erros nos dados. Dentre elas, podemos elencar: falhas/erros nos equipamentos da estação, agentes externos como poeira, orvalho, sombra sobre o aparelho, falha elétrica na estação e falta de manutenção nos equipamentos presentes na estação (MCARTHUR, 2005).

É essencial que seja adotado um exímio controle de qualidade das informações, pois elas são utilizadas para diversas finalidades, como por exemplo em um estudo sobre a viabilidade de empreendimento num determinado local.

O primeiro filtro aplicado foi o de seleção do período útil, onde separa-se o período de 13 horas de geração das estações de seu restante. O período considerado foi das 6h às 18h para estações APAC e das 9h às 21h para estações do INMET.

Após, verificou-se, dentro dos intervalos válidos, quais horas destes períodos poderiam apresentar anomalias como: falta de dados, falhas de registro de dados e descontinuidades, depois destas, as escalas diária, mensal e anual também foram verificadas.

Apesar de ser relativamente simples, esta etapa forneceu informações importantes acerca da situação de determinadas estações, onde verificou-se que muitas delas apresentavam poucos erros, enquanto outras apresentavam uma quantidade muito maior. A partir disso, foi calculada a irradiação diária, que consiste na soma das radiações horárias positivas constantes no intervalo válido do dia analisado.

Terminado esta fase, os dados diários foram submetidos ao critério da máxima transmitância, que utiliza os valores do Kt diário, que é calculado utilizando a declinação, o ângulo do pôr do Sol e a irradiação extraterrestre conforme Silva e Pedrosa Filho (2018).

A declinação representa a posição do Sol em relação ao plano do equador terrestre que utiliza o dia juliano do ano para seu cálculo, conforme equação (1) (RABL, 1985).

$$\delta = \text{sen}^{-1} \left[-\text{sen } 23,45^\circ \times \cos \left(\frac{360^\circ(n + 10)}{365,25} \right) \right] \quad (1)$$

Sendo que δ é a declinação em graus decimais e "n" o dia juliano.

Outro parâmetro importante é o ângulo do pôr do Sol, que indica o deslocamento angular do Sol, desde o zênite até o ponto onde cruza o horizonte, e pode ser calculado com a equação (2).

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \lambda \times \tan \delta) \quad (2)$$

Onde ω_s é o ângulo do pôr do sol, λ é a latitude e δ é a declinação, todos dados em graus decimais.

A expressão da irradiação extraterrestre mostra qual o valor total de irradiação que a área iria receber em condições ideais sem atenuação da atmosfera. Ela pode ser calculada utilizando a equação (3).

$$H_{0d} = \left(\frac{24 \times I_0}{\pi} \right) \times \left(1 + 0,033 \times \cos \left(\frac{2 \times \pi \times n}{365} \right) \right) \times \cos(\lambda) \times \cos(\delta) \times \frac{\pi}{180} \times \text{sen}(\omega_s) \quad (3) \\ + \left(\frac{\omega_s \times \pi}{180} \right) \times \text{sen}(\lambda) \times \text{sen}(\delta)$$

No qual: H_{0d} é a irradiação extraterrestre (em Wh/m²), I_0 a constante solar, com valor de 1366,1 W/m², "n" corresponde ao dia juliano, λ é a latitude do local e δ é a declinação, ambas em graus decimais.

Com o cálculo da irradiação extraterrestre, é possível obter o valor do Índice de Claridade Diário (Kt diário), indicando o percentual da irradiação extraterrestre que é transmitida pela atmosfera, através da equação (4):

$$Kt = \frac{Hd}{H_{0d}} \quad (4)$$

Sendo que o Índice de Claridade Diário (Kt diário) é adimensional, Hd é a irradiação global horizontal e H0d é a irradiação extraterrestre (ambas em Wh/m²).

Por fim, com base nos dados do Kt diário calculados, realizou-se uma busca de valores extremos deste, como valores maiores que a unidade que fisicamente são impossíveis (SILVA E PEDROSA FILHO, 2018), e foram investigados valores baixos como os menores que 0,15, como indícios de falha na instrumentação ou nos processos de filtragem e qualificação anteriores.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para que o objetivo geral fosse alcançado, num primeiro momento foi necessária a realização de leitura bibliográfica acerca de estudos realizados na área de tratamento de dados gerados por uma estação solarimétrica, estudo esse realizado numa busca em livros e artigos científicos da área.

Após, baseado no trabalho de Silva e Pedrosa Filho (2018), que elaboraram um estudo sobre qualificação de dados da irradiação solar e que resultou na escolha de 27 estações espalhadas ao longo do Estado, foi decidido que neste trabalho seriam estudadas 36 estações pertencente a REDESOLPE (figura 1).

Figura 1 – Distribuição geográfica das estações da REDESOLPE.



Fonte: Pedrosa Filho (2022).

Observa-se na figura 1 que a seleção das cidades realizada por Pedrosa Filho (2022) foi expandida para além dos limites do Estado visando cobrir regiões que por si só não estariam abrangidas pelas estações presentes apenas neste, sempre com o objetivo da elaboração do mapa solarimétrico.

Para prosseguir com a análise, foram selecionados dados dos anos de 2015 a 2017, originados de estações solarimétricas do INMET e da APAC.

INMET

Foram utilizados dados de 21 estações solarimétricas. Os dados foram fornecidos em forma de tabela, na escala horária UTC e em J/m² que inicialmente foram convertidos para Wh/m². O horário padronizado nas tabelas é o UTC, sendo considerados apenas nas análises os valores que estavam no período das 9h às 21h UTC, pois foi observado que fora deste intervalo, os valores da irradiação são negativos.

APAC

Foram utilizadas 15 estações da APAC. As tabelas fornecidas apresentam dados horários da irradiação solar de forma acumulada, sendo necessário dividir por 60 para se obter a irradiação horária em Wh/m². O horário da tabela está na hora local e foi utilizado o intervalo de 6 às 18 h como válido para os dados.

No quadro 1, estão listadas as estações analisadas neste trabalho e suas instituições mantenedoras.

Quadro 1 - Lista de estações analisadas.

Estação	Instituição
Águas Belas – PE	APAC
Araripina – PE	APAC
Arcoverde – PE	INMET
Barbalha – CE	INMET
Barreiros – PE	APAC
Brejão – PE	APAC
Cabaceiras – PB	INMET
Cabrobó – PE	INMET
Campos Sales - CE	INMET
Carpina – PE	APAC
Caruaru – PE	INMET
Cupira – PE	APAC
Curaçá – BA	INMET
Floresta – PE	INMET
Garanhuns – PE	INMET
Goiana – PE	APAC
Ibimirim – PE	INMET
Ipojuca – PE	APAC
Monteiro – PB	INMET
Ouricuri – PE	INMET
Palmares – PE	INMET
Palmeira dos Índios – AL	INMET
Pão de Açúcar – AL	INMET
Patos – PB	INMET
Paulistana – PI	INMET
Petrolina – PE	INMET
Recife – PE	APAC
Recife – PE	INMET
Salgueiro – PE	APAC
São Bento do Una – PE	APAC
São Luis do Quitunde – AL	INMET
Serra Talhada – PE	INMET
Surubim – PE	INMET
Vitória de Santo Antão - PE	APAC

Fonte: Próprio Autor

Com o intuito de melhor aproveitamento e análise, todos os dados foram divididos por anos. Isso é necessário pois segundo a EPE – Empresa de Pesquisa Energética, uma falta de dados consecutiva por um período de 15 ou mais dias torna inútil todo o período a qual foi acometida a análise. Sendo assim, separando por anos, a probabilidade de que todo o período seja inutilizado diminui.

Após a etapa anterior, foi realizada a análise dos dados horários fornecidos e a classificação dos dias em inválidos, faltantes e inúteis. Estas classificações podem dar-se-

á por falhas técnicas e/ou operacionais, tais como: falta de manutenção nos sensores, falta de energia elétrica na estação, entre outros afins. Os dias inválidos são aqueles que possuem menos que 75% de horas do intervalo considerado (GALLEGOS e COQUET, 2017). Portanto, todos os dias que constavam 9 horas ou menos foram descartados e marcados como dias inválidos. Os dias faltantes, por sua vez, são aqueles que não constam registros nos bancos de dados. E os dias inúteis é a soma dos dias inválidos com os faltantes.

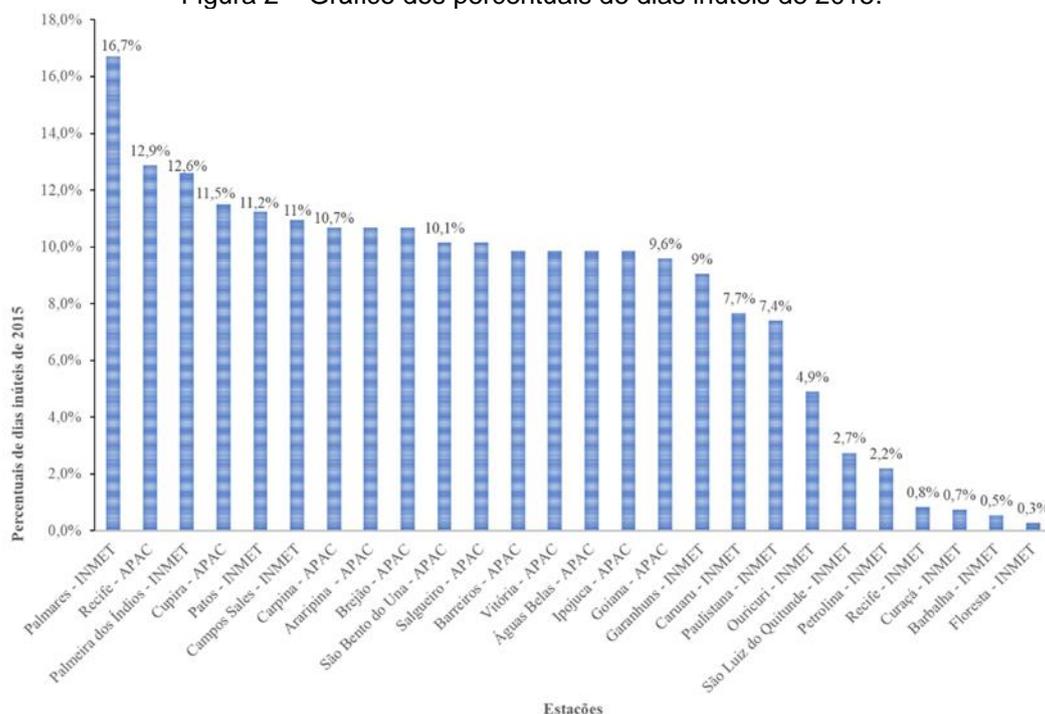
Posteriormente, foram realizados os cálculos de irradiação diária, que nada mais é do que a soma de todos os dados de irradiação horária compreendidos no intervalo válido. E após, foram utilizadas equações para o tratamento e verificação de possíveis anormalidades nos dados diários.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O primeiro passo, após a escolha das estações solarimétricas, foi a verificação da quantidade de dados constantes em suas planilhas eletrônicas. Essa verificação foi realizada seguindo a constatação ou não de dados faltantes e/ou inválidos. Para uma melhor visualização dessa etapa, os dados foram separados em três anos: 2015, 2016 e 2017. Para os anos ímpares, em condições perfeitas, haveriam de constar 365 dias e 4745 horas válidas (caso estejam completos e no intervalo anual total) compreendidas no intervalo de horas válidas das estações. Já o ano de 2016, por se tratar de um ano bissexto, deveria possuir 366 dias e 4758 horas válidas. Analisando os dados das estações, aplicando e analisando os resultados dos filtros, foram gerados gráficos dos percentuais de dias inúteis, inválidos e faltantes para os anos abordados nesse trabalho.

A figura 2 ilustra o percentual de dias inúteis do ano de 2015.

Figura 2 – Gráfico dos percentuais de dias inúteis de 2015.



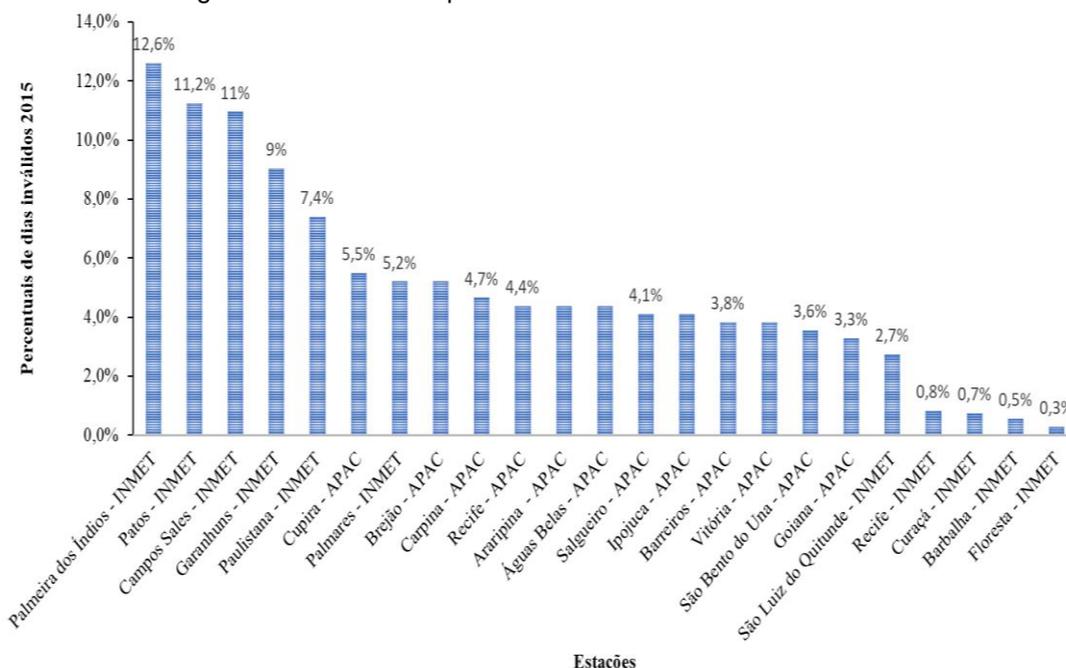
Fonte: Próprio Autor



Na figura 2 percebe-se que a estação que apresentou a maior quantidade de dias inúteis foi a de Palmares-INMET. Também pode ser verificado que as estações da APAC apresentam maior índice de falhas, resultando assim numa maior falta de dados.

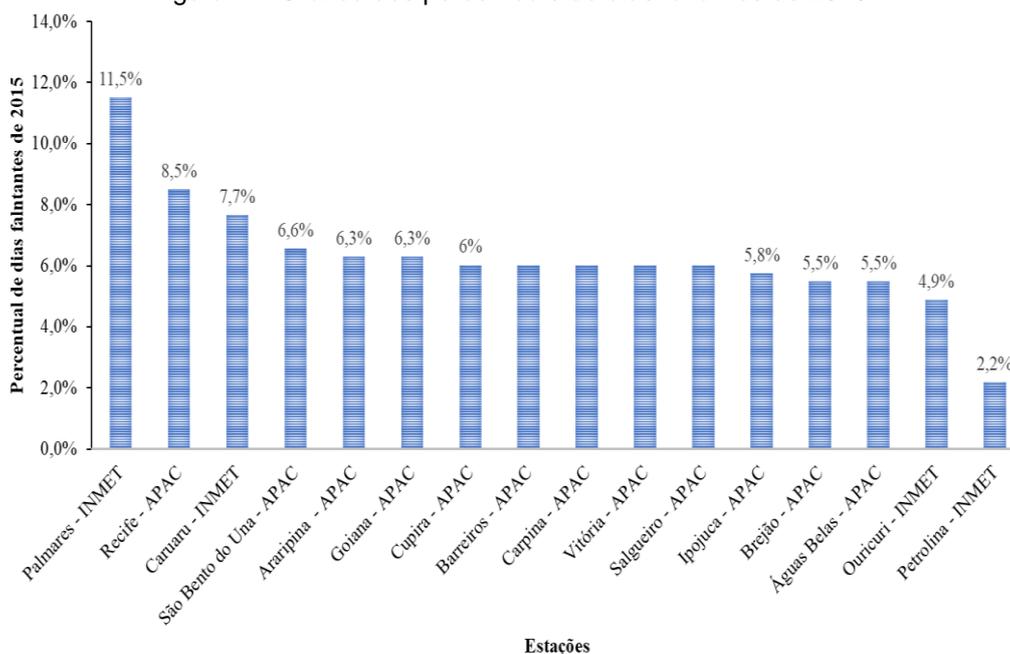
Dentre as elencadas, a estação de Palmares (INMET) destaca-se por ser a estação que mais apresenta falhas, possivelmente pelos motivos já mencionados anteriormente. É importante que todas as estações sejam verificadas, a fim de melhorar futuras medições e estudos na área de solarimetria.

Figura 3 – Gráfico dos percentuais dos dias inválidos de 2015.



Fonte: Próprio Autor

Figura 4 – Gráfico dos percentuais de dias faltantes de 2015.



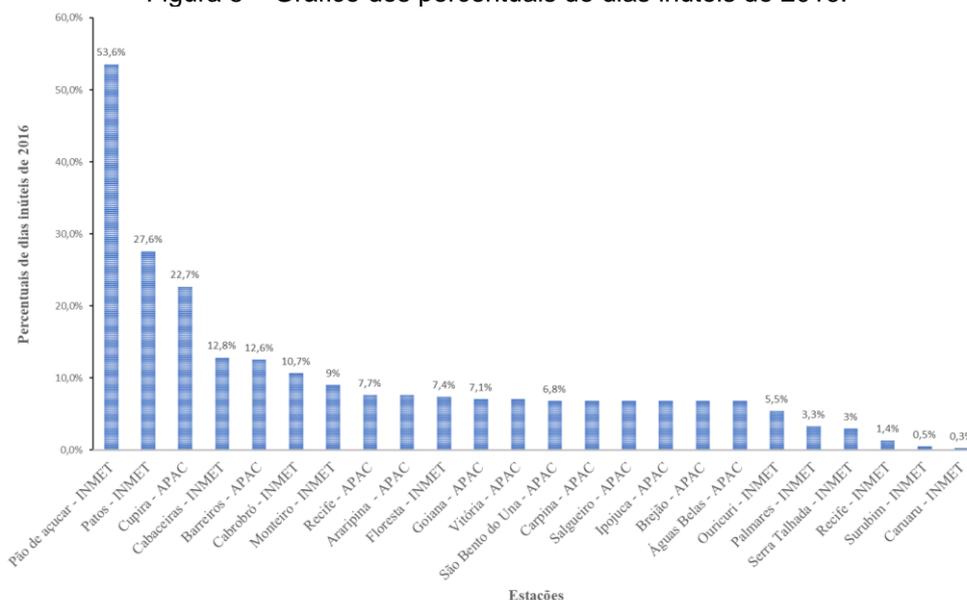
Fonte: Próprio Autor





De acordo com os gráficos das figuras 3 e 4, fica evidente que as estações APAC aparecem com mais frequência que as do INMET. E, tratando-se de estações, Palmares apresenta o maior percentual de falta de dados e Carpina o maior percentual de dados inválidos. Sendo assim, recomenda-se que as mesmas e outras sejam estudadas presencialmente para que possam ser sancionados possíveis causadores de problemas.

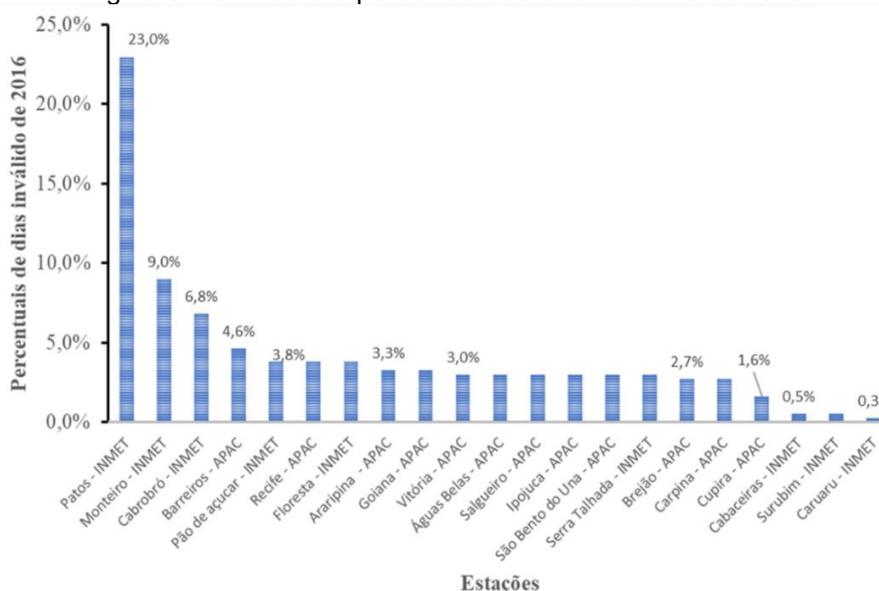
Figura 5 – Gráfico dos percentuais de dias inúteis de 2016.



Fonte: Próprio Autor

De acordo com a Figura 5, houve evoluções de algumas estações em relação ao ano anterior. Entretanto, outras encontram-se num estado de alerta, pois o acréscimo da invalidez apresentada por elas indica que é necessária uma observação mais cautelosa acerca de suas situações.

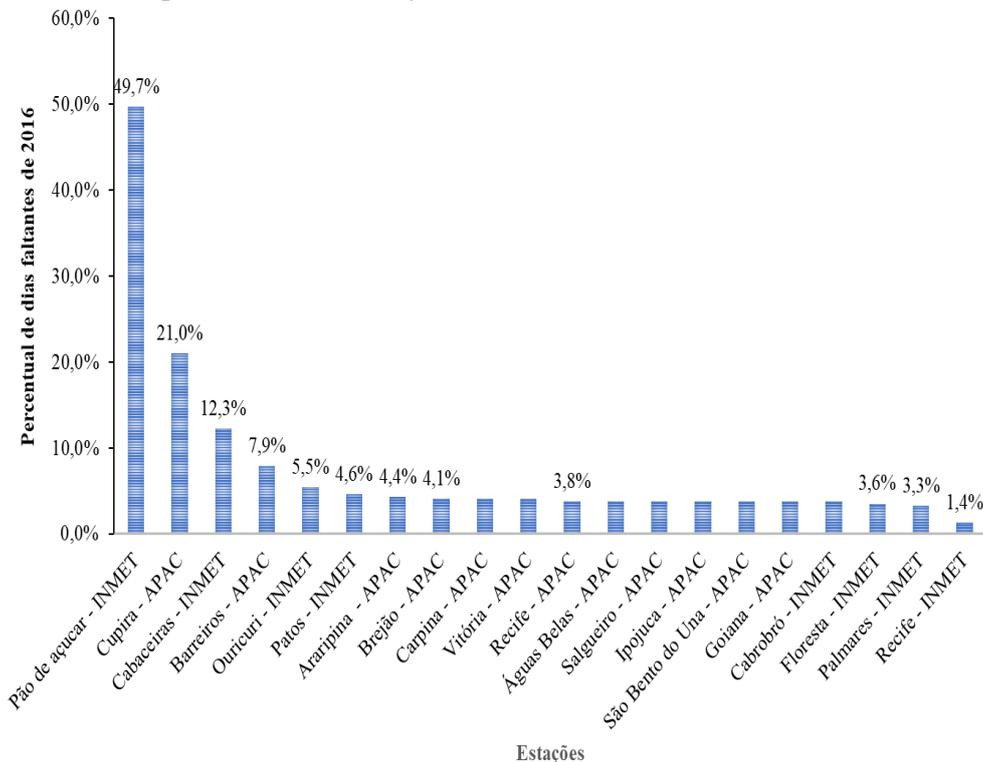
Figura 6 – Gráfico dos percentuais de dias inválidos de 2016.



Fonte: Próprio Autor



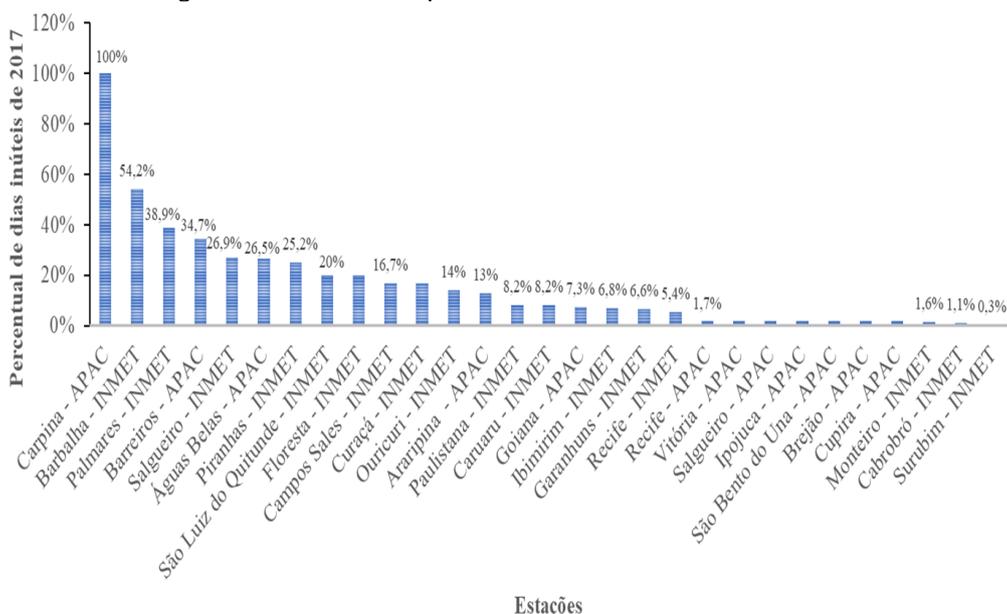
Figura 7 – Gráfico dos percentuais de dias faltantes de 2016.



Fonte: Próprio Autor

As figuras 6 e 7 mostram de forma mais detalhada as situações de ocorrência de falhas nas estações presentes em Pernambuco e municípios circunvizinhos. Assim como na figura 5, é notável que estações como Patos e Pão de açúcar apresentaram um valor muito alto de invalidez/falta de informação dos dados fornecidos, recomendando-se assim a inspeção delas.

Figura 8 – Gráfico dos percentuais de dias inúteis de 2017.



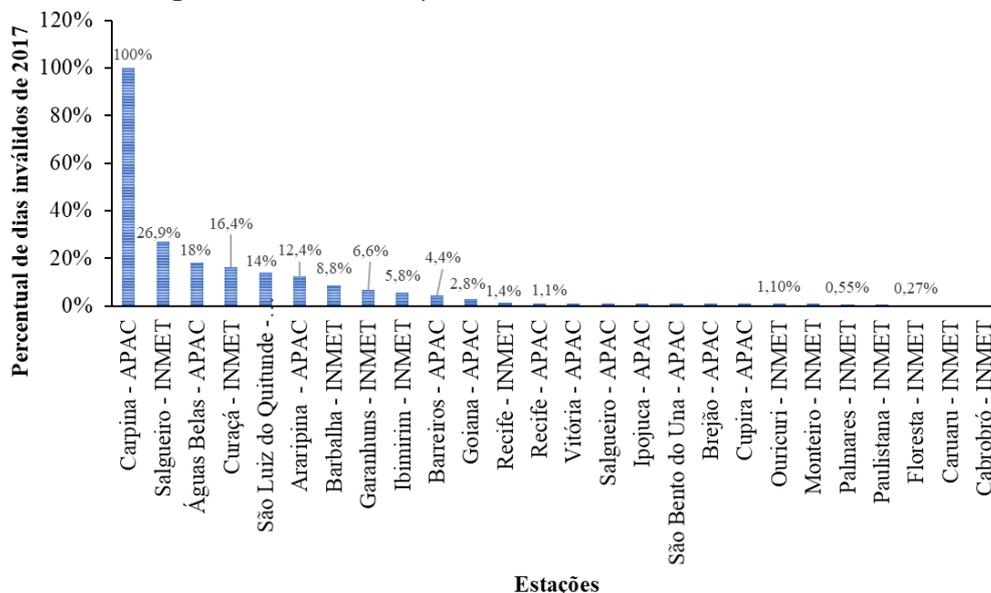
Fonte: Próprio Autor





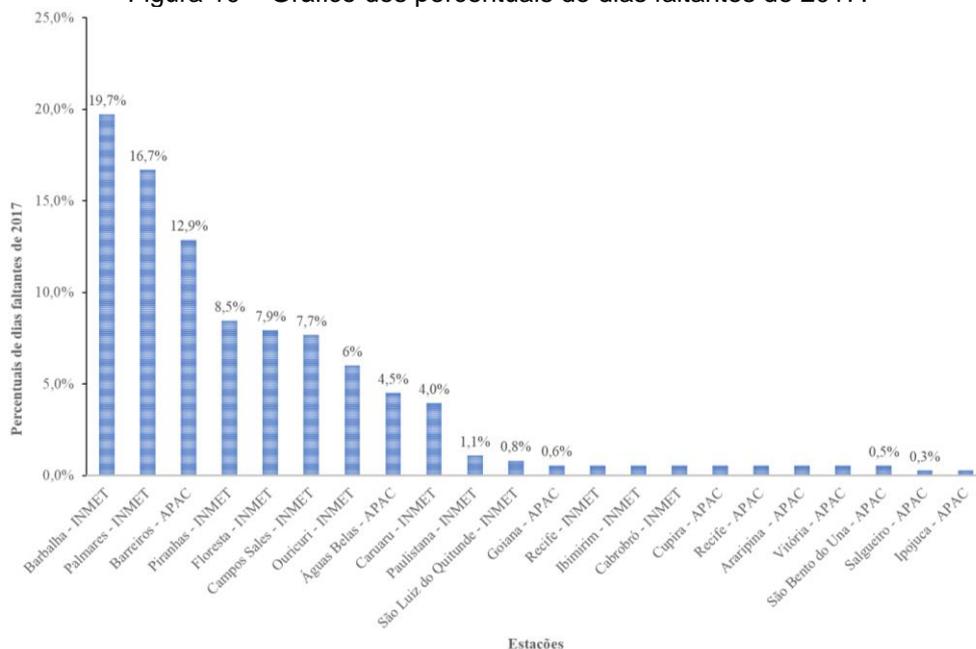
De acordo com as informações da Figura 8, têm-se que muitas das estações já não apresentam mais o registro de falhas que outrora tinham. Outras vieram a ter, possivelmente, pelo tempo de manutenção a qual deveriam estar submetidas. Visando uma melhor análise por tipo de falhas, o gráfico dividiu-se em 2 trechos que serão apresentados logo a seguir.

Figura 9 – Gráfico dos percentuais de dias inválidos de 2017.



Fonte: Próprio Autor

Figura 10 – Gráfico dos percentuais de dias faltantes de 2017.



Fonte: Próprio Autor

Assim como no ano de 2016, algumas estações apresentam valores extremamente elevados. Desta forma, um responsável por instalações elétricas pode ser acionado para fins de calibração de equipamentos e/ou manutenção básica dos componentes





necessários. Estações como Barbalha e até mesmo a própria Carpina tornam-se principais focos de quaisquer tipos de falha nos dados que nelas constavam.

5 CONCLUSÕES

Foi realizada a qualificação dos dados horários coletados nas estações solarimétricas das cidades escolhidas para compor o mapa solarimétrico de Pernambuco. Os princípios da preparação da metodologia utilizada, desde a coleta até o tratamento que foi fornecido aos dados encontrados no site do INMET e APAC, incluindo a seleção dos critérios e filtros de qualificação da irradiação solar, foram obtidos através de diversos estudos realizados anteriormente.

A qualificação dos dados foi diretamente pensada na área selecionada, consistindo essencialmente na retirada dos dados que se encontram fora dos critérios selecionados, e uma criteriosa análise acerca dos que restaram.

Dentre as estações estudadas, vale observar que algumas estações solarimétricas apresentaram muitos dados faltantes ou inválidos, como é o caso das estações de Carpina-PE, Palmares-PE, Barreiros-PE, Barbalha-CE e Pão de Açúcar-AL. Todas as estações mencionadas apresentaram um percentual de dados inúteis acima de 15%. Vale destacar que todo o ano de 2017 da estação de Carpina foi descartado devido a invalidez de dados.

Já as estações de Arcoverde-PE, Surubim-PE, Petrolina-PE, Serra Talhada-PE e Ibimirim-PE apresentaram um percentual de dados inúteis abaixo de 2,5%, com destaque para a estação de Arcoverde que teve um aproveitamento total dos dados.

As planilhas elaboradas com os cálculos e todos os filtros ficam como alguns dos meios para o próximo trabalho sobre qualificação dos dados destas e outras estações.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL. **Brasil ultrapassa marca de 10 GW em micro e minigeração distribuída**. Disponível em: www.aneel.gov.br. Acesso em: 01 abr. de 2022.

Empresa de Pesquisa Energética, EPE. **PROJETOS FOTOVOLTAICOS NOS LEILÕES DE ENERGIA**. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-110/topico-418/EPE-DEE-NT-091_2018-r0.pdf. Acesso em: 25 mar. de 2022.

GALLEGOS, Grossi Hugo; COQUET, Eduardo. **Lá perdida de datos diários de irradiación solar global y una evaluación sobre su influencia em los promedios mensuales**. Revista de Climatología, v. 17, p. 45-47, 2017.

KRENZINGER, A.; AGUIAR D. **Metodologia para Elaboração de Mapas de Produtividade Fotovoltaica no Rio Grande Do Sul**, VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, Belo Horizonte, 2016.

MCARTHUR, L. J. B. **Operations Manual**, Version 2.1, Baseline Surface Radiation Network (BSRN), 2005.





MELO, Ingrid Silva. **Comparação de modelos de correlação de variáveis ambientais com a radiação solar na região nordeste do Brasil**. Relatório final bolsa de iniciação academia BIA-0107-1.01/15. 2016.

PEDROSA FILHO, Manoel H. de O. **REDE SOLARIMÉTRICA DE PERNAMBUCO**. In: IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2022, Florianópolis. Disponível em: <https://www.cbens.org.br/evento/cbens2022/trabalhosaprovados/naintegra/10263>. Acesso em 18 abr.2022.

PEDROSA FILHO, Manoel H. de O.; CAVALCANTI, E. B. **Desenvolvimento de mapa de irradiação solar global para o Estado de Pernambuco**. VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2020, Fortaleza. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/738/738>. Acesso em 18 abr. 2022.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar**, INPE-MCT, São José dos Campos, 2006.

RABL, A. **Active Solar Collectors and Their Applications**. Oxford University Press, New York, 1985, p. 503.

SILVA, C. F. dos S.; PEDROSA FILHO, M. H. de O. **Qualificação de dados para geração de mapas de radiação solar**. Programa Interinstitucional de Bolsas de Iniciação Científica – IFPE, 2018.

STUDZINSK, C. **Atlas Eólico e Solar de Pernambuco**. 2017. Disponível em: <http://www.atlaseolicosolar.pe.gov.br/>. Acesso em 18 abr. 2022.

TIBA, Chigeru. **Atlas Solarimétrico do Brasil**, Ed. Universitária da UFPE, 2000.

TIBA, Chigeru *et al.* **Metodologia para Elaboração de Mapas de Radiação Solar para Minas Gerais**. In: V Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2014, Recife. Disponível em: <https://www.abens.org.br/CBENS2014/resumos/R0248-2.pdf>. Acesso em: 01 abr. 2022.

DATA QUALIFICATION FOR SOLAR RADIATION MAPS GENERATION

Abstract: *To have a map with high reliability as a result, the process of collecting, analyzing, and qualifying the data becomes indispensable. This work aims to present the results of the analysis and qualification of the data generated by INMET and APAC solarimetric stations, located in cities in the State of Pernambuco and some cities close to its limits, aiming at the composition of the solar radiation map of the State. Hourly data of horizontal global solar radiation were used in the period 2015 -2017. In this one, it was possible to verify that some had excellent data, that is, with few flaws and faults. However, others are concerned because of their number of holes, with large intervals of days showing total lack of recording of hourly radiation and others being invalidated by insufficient data. Such anomalies can be had by the lack of electrical energy in the power supply network of the station, by the lack of calibration and/or tests of the sensors installed in it, failure in the transmission of data to the server, among others. The method of data verification was the observation of the daily K_t*



filter, where all values below 0.15 were analyzed individually. For such analysis, the difference between the minimum and maximum temperature recorded, maximum and minimum humidity and the maximum and minimum dew point were seen. If gross changes were detected between them, it was known that there were flaws in the data, causing distrust and infeasibility of using them. When not, a possible use and adequacy of these was sought.

Keywords: *Data qualification, Solar radiation maps generation, Data analysis.*