

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO
CURSO DE COMPUTAÇÃO/CCEN - MOSSORÓ - LICENCIATURA - A DISTÂNCIA
- MT
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO (2024)

Análise da Distribuição e Produtividade de Usinas Solares Fotovoltaicas no Brasil: Uma Abordagem de Classes de Consumo e Concentração Regional com Python.

ALDECIR PEIXOTO MAIA, ANGÉLICA FÉLIX DE CASTRO, AMANDA GONDIM DE OLIVEIRA

RESUMO

Este trabalho analisa o crescimento e a distribuição da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, com foco nas diferentes classes de consumo e na concentração regional. Desde a promulgação da Lei 14.300/2022, que regulamenta a micro e minigeração distribuída, o país tem experimentado uma expansão expressiva da capacidade instalada, promovendo maior autonomia energética em diversas áreas. Utilizando técnicas de análise de dados em *Python*, foram explorados banco de dado da ANEEL para identificar padrões de produtividade e distribuição das usinas fotovoltaicas, considerando aspectos como densidade populacional e características econômicas regionais. Os resultados indicam que, embora regiões como o Sudeste e Centro-Oeste liderem em potência instalada, as regiões Norte e Nordeste apresentam um grande potencial ainda inexplorado. Além disso, o estudo evidencia o papel estratégico do agronegócio e do setor comercial na adoção de sistemas solares, especialmente em estados como Minas Gerais e Paraná. A pesquisa demonstra que políticas públicas e incentivos econômicos têm impulsionado a diversificação da matriz energética brasileira, destacando a importância da geração distribuída para a sustentabilidade e o desenvolvimento econômico do país.

Palavras-chave: energia solar fotovoltaica, geração distribuída, análise de dados, classes de consumo.

ABSTRACT

This study analyzes the growth and distribution of photovoltaic solar energy generation in Brazil, focusing on different consumption classes and regional concentration. Since the enactment of Law 14.300/2022, which regulates micro and mini distributed generation, the country has experienced a significant expansion in installed capacity, promoting greater energy autonomy in various areas. Using data analysis techniques in *Python*, ANEEL databases were explored to identify patterns of productivity and distribution of photovoltaic plants, considering factors such as population density and regional economic characteristics. The results indicate that, although regions like the Southeast and Center-West lead in installed capacity, the North and Northeast regions still have a vast unexplored potential. Furthermore, the study highlights the strategic role of agribusiness and the commercial sector in adopting solar systems, especially in states like Minas Gerais and Paraná. The research demonstrates that public policies and economic incentives have driven the diversification of Brazil's energy matrix, emphasizing the

importance of distributed generation for sustainability and the country's economic development.

Key words: photovoltaic solar energy, distributed generation, data analysis, consumption classes

1 INTRODUÇÃO

A produção de energia solar no Brasil teve um crescimento notório de acordo com a (ANEEL, 2022) o que proporcionou a promulgação da Lei 14.300/2022, também conhecida como Marco Legal da Geração Distribuída – MLGD (2022), sendo responsável por regulamentar a micro e minigeração de energia solar no Brasil (BRASIL, 2022), a microgeração é a produção de energia elétrica com potência instalada de até 75 kW. Minigeração abrange sistemas com até 5 MW para fontes despacháveis e 3 MW para fontes não despacháveis (ANEEL, 2022). Com seu advento, foi possível estabelecer regras para a produção e taxaço de eletricidade fotovoltaica, permitindo que os consumidores gerem a própria energia e economizem na conta de luz. O Brasil se destaca na produção desse tipo de energia renovável, sendo um dos principais motivos o seu clima tropical em que algumas regiões a presença de irradiação solar são abundantes, especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, e que, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2024), há uma grande quantidade de usinas solares produzindo energia limpa e que têm aumentado exponencialmente.

Devido a este crescimento na produção de energia solar, existe uma busca por soluções mais sustentáveis e pela necessidade de suprir as diferentes classes de consumo, como residencial, rural, comercial e industrial (ABSOLAR, 2024). A produção de energia solar por micro usinas vem se destacando como uma das tecnologias mais promissoras no campo das energias renováveis, por ter se tornado de fácil acesso às diferentes classes de consumo, ela está se destacando com uma crescente importância na matriz energética. De acordo com dados divulgados pela Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica (ABSOLAR, 2024), a energia solar fotovoltaica atingiu mais de 48,2 GW operacionais, sendo a segunda maior fonte renovável produzida no Brasil, equivalente a 20,2% da matriz energética, além de mais de R\$ 222,4 bilhões em investimentos e a geração de 1,4 milhão de novos empregos, fomentando o mercado nacional e demonstrando uma aceitação das diferentes classes de consumo.

A partir desse panorama, é possível observar que o cenário brasileiro para a geração de energia solar se encontra em plena ascensão, com a micro e minigeração desempenhando um papel fundamental na diversificação da matriz energética (ANEEL, 2024). A regulamentação recente proporcionou um ambiente favorável para que consumidores de diferentes perfis pudessem adotar sistemas fotovoltaicos, o que, além de estimular o desenvolvimento econômico, promove avanços significativos em termos de sustentabilidade e eficiência energética. Dessa forma, o Brasil avança na consolidação de políticas que incentivam o uso de fontes limpas, alinhando-se às diretrizes globais de redução de emissões e preservação ambiental (BRASIL, 2022).

Diante desse crescimento acelerado, analisar a distribuição e produtividade das usinas fotovoltaicas em nível regional torna-se essencial para compreender o impacto dessa expansão nas diversas classes de consumo (ABSOLAR, 2024). Com o suporte de tecnologias robustas de análise de dados, como o *Python*, esta pesquisa se propõe a explorar o potencial das usinas em diferentes estados e municípios brasileiros, permitindo identificar tendências e direcionar futuros investimentos. Esse esforço se justifica pela necessidade de mapear o aproveitamento regional da energia solar e de garantir que os benefícios econômicos e ambientais sejam acessíveis a um número crescente de consumidores em todo o país.

2 METODOLOGIA

No que diz respeito ao delineamento metodológico, a pesquisa é classificada como descritiva, pois busca analisar e descrever o fenômeno estudado. Quanto aos procedimentos, trata-se de um estudo documental com levantamento de dados, visando investigar a evolução crescente da geração de energia solar fotovoltaica, especialmente por meio de micro usinas. Para compreender melhor esse fenômeno, torna-se imprescindível analisar os impactos desse crescimento nos setores energético, social e econômico (CHAGAS, 2023).

Para tanto, a presente pesquisa adota uma abordagem quantitativa em virtude do problema apresentado inicialmente (CRESWELL, 2021). Para explorar os dados de produção solar que foram coletados, foi necessário o uso do *Python*, uma das linguagens de programação utilizadas na análise de dados e previsão de resultados. As bibliotecas utilizadas foram o *pandas*, *numpy*, *matplotlib* e *seaborn*, tais ferramentas possibilitam o tratamento eficiente das informações de geração e consumo. A metodologia escolhida possibilita identificar padrões das classes de consumo e da produtividade em diferentes regiões do Brasil, traçar métodos de análise de desempenho das usinas e avaliar a relação entre o número de habitantes e a quantidade de micro usinas em funcionamento por cidade, contribuindo para uma visão ampla do potencial de crescimento e da eficácia das usinas fotovoltaicas distribuídas.

O universo da pesquisa propõe identificar as classes de consumo predominantes e avaliar o crescimento da geração distribuída de energia solar em cada uma delas, além de mapear os estados e cidades com maior produção de energia solar, destacando as regiões de maior concentração de usinas fotovoltaicas. Por fim, busca-se analisar a relação entre a quantidade de micro usinas em operação e a densidade populacional das cidades, proporcionando uma perspectiva detalhada sobre o impacto da geração distribuída no contexto urbano e rural.

2.1 O uso do Python na análise dos dados

Os procedimentos adotados para o filtragem da amostra, partiram inicialmente dos dados que foram baixados em formato *.csv*, contendo mais de 2.939.580 linhas e 23 colunas, tornando inviável sua leitura via *Excel*, que possui um limite máximo de 1.048.576 linhas. Para esta pesquisa, os dados foram obtidos diretamente do portal da ANEEL, disponível no link “<https://dadosabertos.aneel.gov.br/dataset/relacao-de-empresendimentos-de-geracao-distribuida>” e atualizado diariamente. A base utilizada foi extraída em 15 de outubro de 2024, sendo inicialmente bastante densa em informações. Devido às limitações do *Excel*, o uso do *Python* tornou-se essencial, tanto pela sua eficiência na leitura de grandes volumes de dados quanto pela vasta gama de bibliotecas disponíveis para análise, como *pandas* e *plotly*.

Para download do programa de análise dos dados utilizado nessa produção está disponível pelo link a seguir <https://github.com/AldecirMaia/tcc-analise-solar.git>, o mesmo dispõem de todo o programa utilizado na produção do trabalho.

Com o banco de dados baixado, foi criado um arquivo no formato *.ipynb* sendo possível dividir o código em pequenos seguimento, tornando mais prático e visivelmente mais amigável. Em seguida foi realizado uma análise da sua formatação, em seguida a separação dos dados pertinentes a pesquisa, e os dados irrelevantes excluídos com o comando *.drop*, como demonstrado na figura 1.

Figura 1 – Análise dos dados.

```
with open('empreendimento-geracao-distribuida.csv', 'rb') as file:
    result = chardet.detect(file.read(10000))
    print(result)

{ 'encoding': 'ISO-8859-1', 'confidence': 0.73, 'language': '' }

tabela = pd.read_csv("empreendimento-geracao-distribuida.csv",
                    encoding="ISO-8859-1", delimiter=';')
tabela = tabela.drop(
    columns=[ "NomAgente", "CodClasseConsumo", "DatGeracaoConjuntoDados", "AnmPeriodoReferencia",
              "NumCNPJDistribuidora", "SigAgente", "NomSubEstacao", "NomSubEstacao", "NumCoordNSub", "NumCoordESub",
              "DscFonteGeracao", "CodRegiao", "DscPorte", "NumCoordNEmpreendimento", "NumCoordEEmpreendimento",
              "CodUFibge", "DscSubGrupoTarifario", "CodSubGrupoTarifario", "CodCEP", "NumCPFENPJ", "CodMunicipioIbge",
              "NomTitularEmpreendimento", "CodEmpreendimento", "DscModalidadeHabilitado", "QtdUCRecebeCredito",
              "DthAtualizaCadastralEmpreend", "SigTipoConsumidor" ])
display(tabela)
```

Fonte: Autoria Própria (2024).

Após a filtragem, a quantidade de colunas foi reduzida para 7 colunas principais, conforme ilustrado na figura 2.

Figura 2 – Organização dos dados.

```
display(tabela.info())

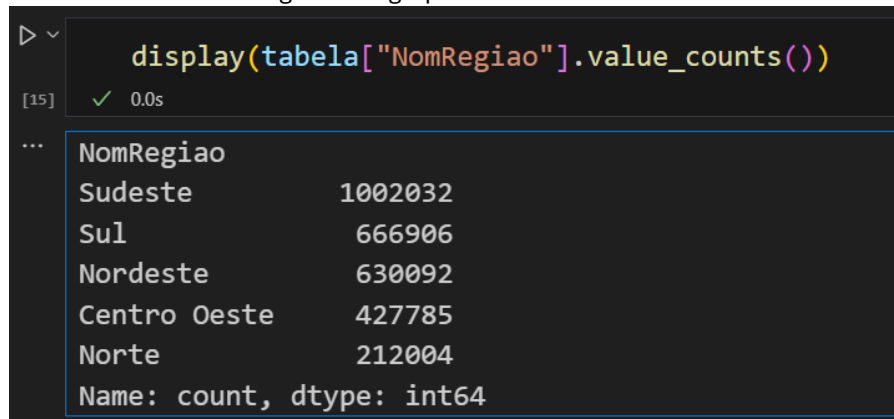
<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>
Index: 2938819 entries, 0 to 2939579
Data columns (total 7 columns):
#   Column                                Dtype
---  ---
0   DscClasseConsumo                      object
1   SigUF                                 object
2   NomRegiao                             object
3   NomMunicipio                          object
4   SigModalidadeEmpreendimento           object
5   SigTipoGeracao                        object
6   MdaPotenciaInstaladaKW                 float64
dtypes: float64(1), object(6)
```

Fonte: Autoria Própria (2024).

A base foi organizada nas seguintes colunas: classe de consumo (DscClasseConsumo), estado (SigUF), região (NomRegiao), município (NomMunicipio), tipo de consumidor (SigTipoConsumidor), tipo de geração (SigTipoGeracao) e média de potência instalada (MdaPotenciaInstaladaKW). Essa organização proporciona uma base sólida para avaliar a distribuição, produtividade e características das usinas solares fotovoltaicas no Brasil, uma vez que é possível distribuir os dados por classe e media de potência instalada em cada regia, estado ou cidade do Brasil, assim, permitindo análises detalhadas e direcionadas para subsidiar tomadas de decisão e planejar estratégias no setor energético.

Os dados obtidos foram organizados e tratados com o objetivo de analisar a quantidade de usinas fotovoltaicas instaladas por região, estado e município. Inicialmente, foi realizado um agrupamento das informações por localização geográfica, permitindo identificar as áreas com maior concentração de empreendimentos. Esse tratamento possibilitou mapear padrões regionais e observar como as características geográficas influenciam na distribuição das usinas. Em cada análise foi utilizado o comando *display* associado a contagem da quantidade de elementos, como visto na figura 3.

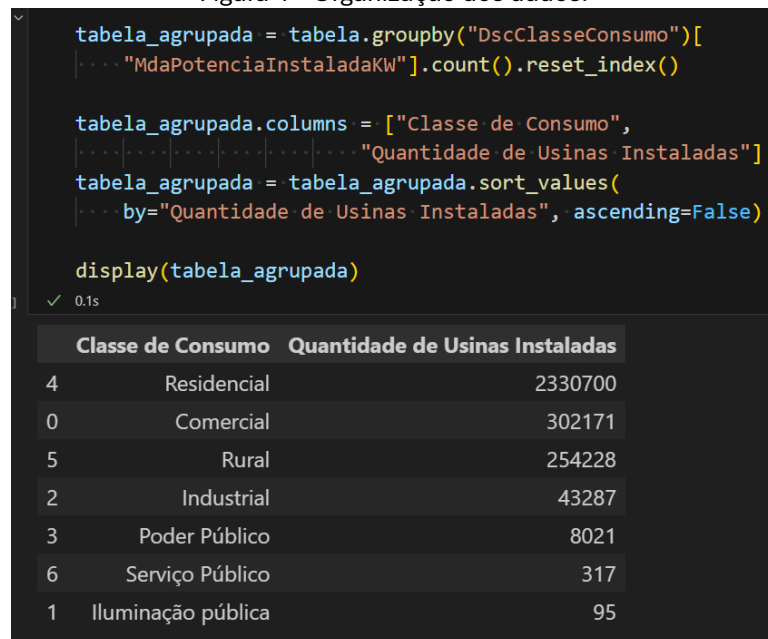
Figura 3 – Agrupamento de dados .



Fonte: Autoria Própria (2024).

Posteriormente, os dados foram filtrados e segmentados por classes de consumo, como residencial, comercial, rural, industrial, poder público, serviço público e iluminação pública como visto na figura 4, assim permitindo compreender a predominância e o crescimento da geração distribuída em cada uma dessas categorias.

Figura 4 – Organização dos dados.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Por fim, foi realizada uma análise específica sobre as potências instaladas, avaliando sua distribuição entre diferentes regiões e estados, o que forneceu uma visão detalhada da capacidade produtiva das usinas fotovoltaicas em todo o Brasil. Esses tratamentos garantiram que as informações fossem devidamente estruturadas para subsidiar as análises propostas pela pesquisa.

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O Brasil apresenta características favoráveis para a produção de energia fotovoltaica (SILVA, 2022). Além disso, conta com um cenário climático propício em boa parte do território. Para que esse processo seja ampliado, é necessária a implementação de políticas que

incentivem a autonomia energética e reduzam a dependência de fontes tradicionais (FAPESP, 2007). Essas políticas podem ampliar significativamente a capacidade de geração de eletricidade por meio de fontes renováveis, destacando-se pela incorporação de sistemas solares em diversas regiões.

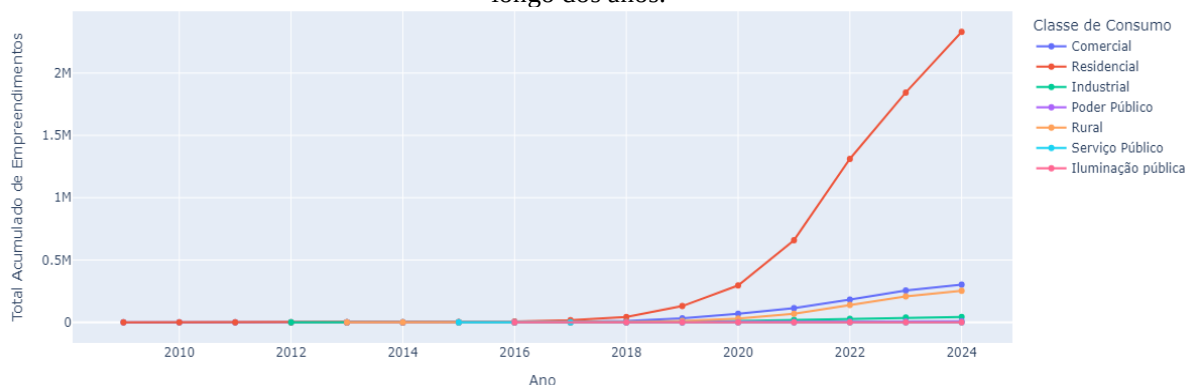
Por sua vez, a análise de dados detalhados e extraídos de bases oficiais permite examinar o desempenho e a distribuição dessa tecnologia em estados e cidades brasileiros, evidenciando um crescimento notável em diferentes segmentos de consumidores. A utilização de técnicas avançadas de processamento de informações é essencial para avaliar tendências e identificar oportunidades de expansão desse setor no país.

3.1 Geração Distribuída: Impactos Regulatórios e Tendências de Crescimento das classes de consumo

A crescente relevância da energia solar no Brasil e sua ampla aplicabilidade em diferentes setores refletem uma transformação significativa na matriz energética nacional. Esse avanço é impulsionado por uma legislação favorável, como o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída de energia - MLGD (2024) que fomenta a geração distribuída e proporciona autonomia para que consumidores de diferentes classes gerem sua própria energia. Essas informações são de livre acesso e são atualizadas diariamente pela ANEEL, que desempenha um papel central na regulamentação e fiscalização do setor elétrico no Brasil. A partir de seus bancos de dados, é possível extrair e organizar informações relevantes para a pesquisa sobre a geração distribuída de energia, tanto de fontes renováveis quanto não renováveis, incluindo dados detalhados sobre usinas solares fotovoltaicas em todo o país, o que permite uma análise precisa e confiável do crescimento e impacto dessa modalidade de geração energética.

Os dados presentes na figura 5 mostram que já existia um crescimento discreto em quase todas as classes de consumo, mas desde a regularização da Emenda 45 ao PL 528/2020, aprovada pelo Senado Federal, que modificou o prazo para que miniprodutores de energia solar possam injetar energia na rede, ampliando-o de 12 para 30 meses, resultou em um crescimento acumulado das classes de consumo de geração de energia distribuída ao longo dos últimos anos.

Figura 5 – Crescimento acumulado das classes de consumo de geração distribuída solar fotovoltaica ao longo dos anos.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Como visto na figura 5, esse crescimento tem variações positivas consideráveis, sendo acentuada na classe residencial, mostrando que a mesma sofreu uma elevação significativa na implantação desde a homologação da emenda, esses dados podem ser melhor analisados na tabela 1.

Tabela 1 – Quantidade de usinas instaladas por classe de consumo de 2012 a novembro de 2024.

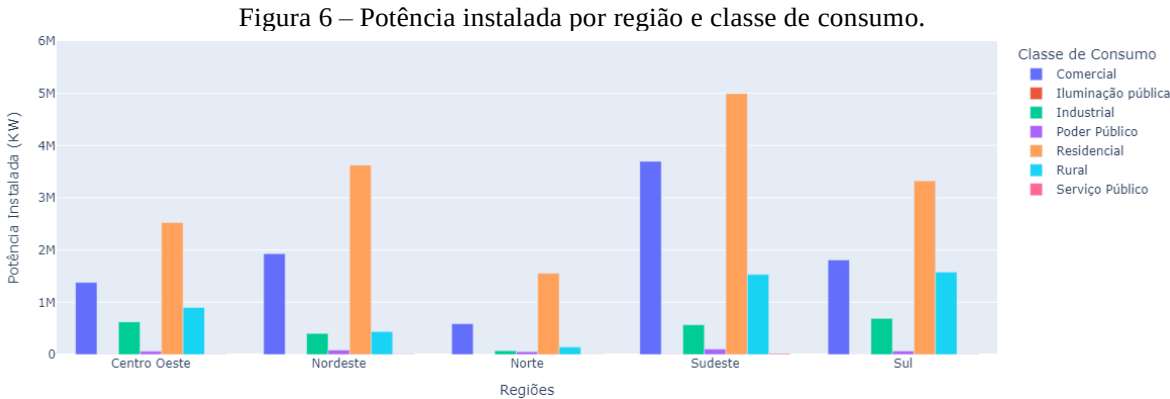
CLASSE DE CONSUMO	QUANTIDADE DE USINAS INSTALADAS
RESIDENCIAL	2 330 700
COMERCIAL	302 171
RURAL	254 228
INDUSTRIAL	43 287
PODER PÚBLICO	8 021
SERVIÇO PÚBLICO	317
ILUMINAÇÃO PÚBLICA	95

Fonte: Autoria Própria (2024).

É possível observar que a regulamentação incentivou especialmente a micro e minigeração na classe residencial, permitindo que os consumidores reduzam seus custos, uma vez que estão gerando energia elétrica, ao mesmo tempo que contribuem para a sustentabilidade ambiental, diminuindo a dependência de fontes não renováveis. Além disso, um fator essencial para o avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil é a diversidade de classes de consumo. A geração distribuída tornou-se acessível a consumidores residenciais, comerciais, industriais e rurais, promovendo uma verdadeira democratização do acesso. Esse crescimento em diversas frentes tem impulsionado a criação de novas micro e minigeradoras, possibilitando uma análise mais detalhada da produtividade por região e classe de consumo, além de ampliar o impacto econômico para cada perfil de usuário.

3.2 Energia Solar no Brasil: Mapeamento da Expansão Regional e Local por Estados e Municípios

No Brasil, as condições geográficas e climáticas são altamente favoráveis à geração de energia solar. O país apresenta uma das maiores médias de irradiação solar do mundo, com destaque para as regiões Nordeste e Centro-Oeste, onde a disponibilidade de radiação se mantém praticamente ao longo de todo o ano (CHAGAS, 2023). Ainda assim, as demais regiões, como o Sul e Sudeste, também contribuem significativamente para a geração de energia fotovoltaica, como pode ser observado no figura 6, que ilustra a produção de energia e suas classes de consumo por região.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Como podemos observar na figura 6, a região Sudeste apresenta a maior média de potência instalada entre todas as regiões do país, destacando-se tanto na classe residencial quanto na comercial, ambas superiores às demais regiões. Apesar da região Sudeste ser um grande polo industrial, ele ainda não teve uma alavancada na exploração de fonte de energia fotovoltaica, o mesmo ficou abaixo das demais regiões, como a região Sul e Centro Oeste. Quando a análise é aprofundada nos estados, observa-se que esse padrão se repete, como demonstrado no figura 7, que ilustra as potências instaladas nos principais estados.

Figura 7 – Os dez estados com maior potência instalada.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na figura 7, os dados mostram que os estados de São Paulo e Minas Gerais estão com a maior concentração de produção de energia fotovoltaica por kW da região, acompanhados pelo Rio Grande do Sul e Paraná. Quando analisada a geração solar fotovoltaica por classe de consumo, conforme ilustrado na figura 8, observam-se dados relevantes sobre a distribuição dessa energia em diversos estados. Destacam-se Minas Gerais e Paraná, que apresenta uma expressiva produção de energia pela classe rural, impulsionado pelo setor agropecuário, que tem alavancado o uso de tecnologias solares para otimizar a produtividade no campo (SEBRAE, 2024).

Figura 8 – Organização de estados em potência instalada por classe de consumo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Como visto na figura 8, no agronegócio brasileiro, a adoção de energia solar tem se mostrado uma solução estratégica, especialmente em estados como Minas Gerais e Paraná. De acordo com a Intelbras, desde 2012, produtores rurais investiram cerca de R\$ 3,4 bilhões em energia solar, resultando na criação de mais de 21 mil empregos. Fazendas e propriedades rurais utilizam sistemas fotovoltaicos, beneficiando-se de linhas de financiamento vantajosas oferecidas pelo poder público, conforme destaca o SEBRAE (2024), para reduzir custos operacionais. Essa iniciativa não apenas diminui a dependência da rede elétrica, mas também promove a sustentabilidade do setor agropecuário, aumentando a eficiência produtiva em áreas remotas.

A análise realizada evidencia que a geração de energia solar no Brasil apresenta uma distribuição heterogênea, com a classe residencial predominante entre as diversas regiões e estados, influenciada por características geográficas, climáticas e econômicas. Estados como Minas Gerais, São Paulo e Rio Grande do Sul se destacam em termos de capacidade instalada, tanto nas áreas urbanas quanto nas rurais, com a classe rural demonstrando forte crescimento impulsionado por políticas públicas e incentivos regulatórios para a geração distribuída. Quando os dados tratam das cidades com as maiores médias de potências instaladas, surgem exceções à tendência geral por estados e regiões. Como é possível observar na tabela 2, a maior parte das cidades com os mais altos índices de produção energética está concentrada em

regiões variadas, com destaque para Teresina e Fortaleza, localizadas na região Nordeste, que se sobressaem pelo aproveitamento significativo da energia solar.

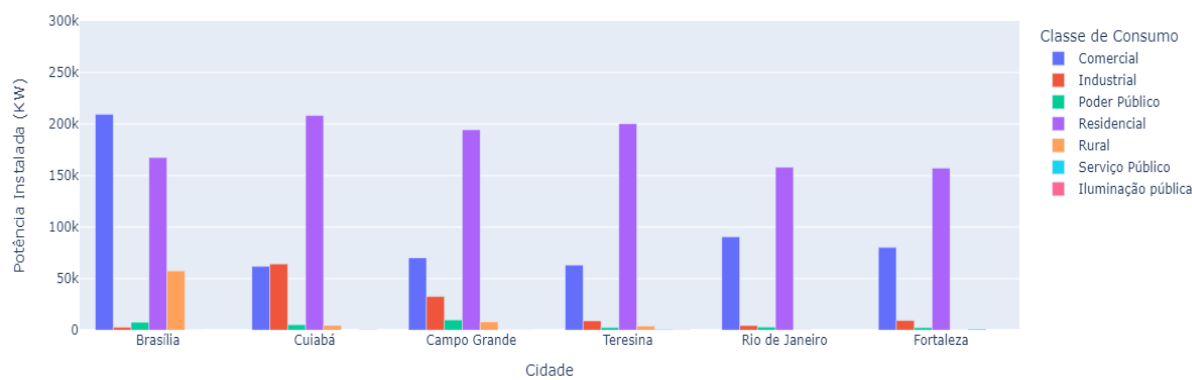
Tabela 2 – As dez cidades com maior média de potência instalada.

Nome do Município	Média da Potência Instalada (kW)
Brasília	444660.07
Cuiabá	344518.30
Campo Grande	314937.15
Teresina	279659.62
Rio de Janeiro	256118.54
Fortaleza	249930.26

Fonte: Autoria Própria (2024).

Brasília se destaca na produção de energia solar no Brasil, especialmente na classe de consumo comercial, podendo ser devido a uma combinação de fatores estratégicos e regulatórios. Como capital federal, Brasília abriga um grande número de edifícios comerciais e administrativos, sendo que Brasília tem uma alta incidência de radiação solar, que é uma das mais elevadas do país, tornando a instalação de painéis solares uma alternativa altamente eficiente e rentável. Como já comentado, o governo tem investido significativamente em energia renovável, e com inúmeros incentivos fiscais e linhas de financiamento favoráveis que tornam viáveis os projetos de energia solar para estabelecimentos comerciais, como pode ser visualizado no figura 9.

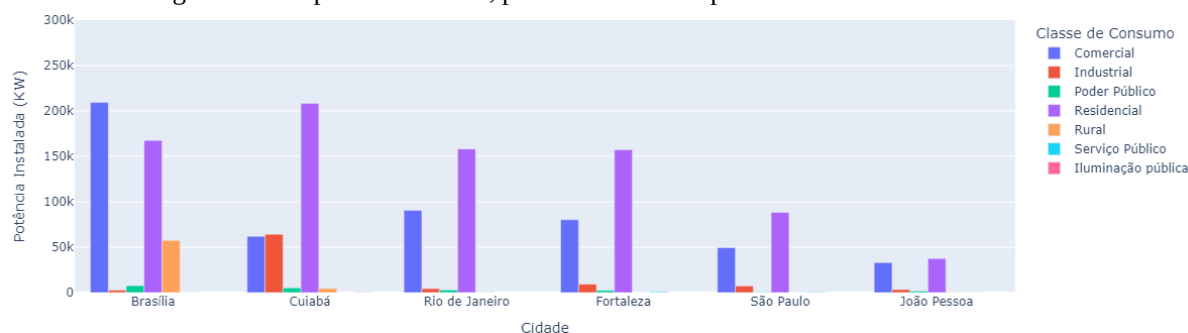
Figura 9 – As cinco cidades com maior potência instalada por classe de consumo.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Na figura 9, quando se analisa todas as cidade, tornou-se notório que a classe residencial é predominante em quase todas as capitais, com pequenas exceções, que é o caso de Brasília, o distrito federal mostra uma característica interessante na análise, uma vez que ela tem uma maior produção energética vinda da classe comercial e uma potência expressiva da classe rural. Ao fazer um comparativo de Brasília com outras capitais, tais como: São Paulo, Rio de Janeiro, João Pessoa, Cuiaba e Fortaleza que estão entre as maiores potencias instaladas no Brasil o mesmo não ocorre, visível no figura 7.

Figura 10 – Capitais Brasileiras; potência instalada por cidade e classe de consumo.



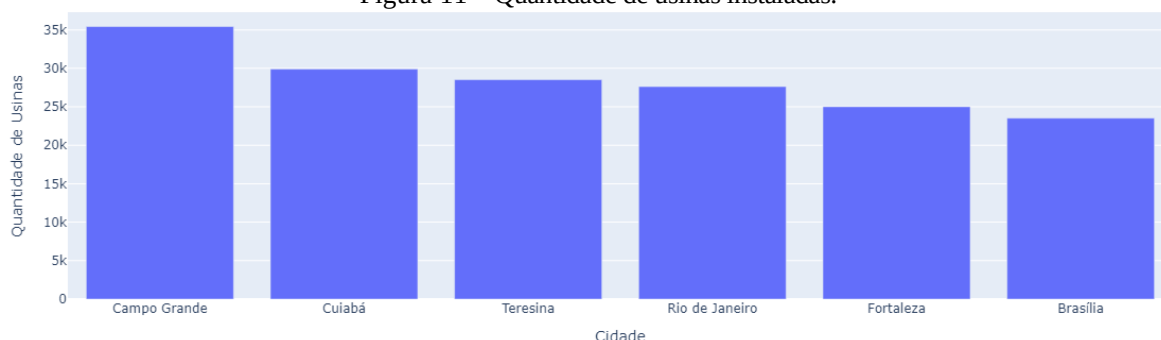
Fonte: Autoria Própria (2024).

A figura 10, mostra que diferentemente de outras capitais, Brasília demonstra que, apesar da alta demanda na classe residencial, há uma significativa expansão no aproveitamento de outras classes de consumo, como a comercial e a rural. Esse diversificado perfil de geração reflete a combinação de políticas públicas favoráveis e incentivos econômicos, como já citado antes, que estimulam tanto empresas quanto produtores rurais a adotarem sistemas fotovoltaicos para reduzir custos e promover a sustentabilidade.

3.3 Relação entre a quantidade de micro usinas e a densidade populacional das cidades

Após a análise dos maiores produtores de energia solar fotovoltaica do país por meio de micro usinas, é fundamental examinar a quantidade de usinas instaladas em cada município, focando nas principais cidades produtoras. Conforme ilustrado na figura 11, observa-se um dado interessante: embora Brasília se destaque como a cidade com a maior produção energética entre as seis principais produtoras, ela apresenta a menor quantidade de usinas instaladas. Esse fenômeno pode ser explicado pela predominância de usinas de maior porte na capital federal, o que permite uma alta capacidade de geração com um menor número de unidades instaladas. Assim, enquanto outras cidades contam com um maior número de micro usinas para atender à sua demanda, Brasília opta por concentrar a produção em instalações de maior potência, refletindo uma estratégia diferenciada na geração distribuída.

Figura 11 – Quantidade de usinas instaladas.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Essa análise revela que a maioria das micro usinas solares estão operando próximo à sua capacidade máxima permitida, que é de 75 quilowatts (kW). De acordo com a Resolução Normativa nº 1.031/2022, a microgeração distribuída é definida como uma central geradora de energia elétrica com potência instalada menor ou igual a esse limite (GOV.BR, 2024). Essa regulamentação visa promover o uso de sistemas de menor escala, permitindo que consumidores residenciais, comerciais e rurais gerem sua própria energia de forma sustentável e eficiente. Além disso, a adesão a esse modelo tem sido impulsionada por incentivos fiscais e linhas de crédito que tornam viável o investimento em micro usinas,

garantindo não apenas economia de custos para os produtores, mas também contribuindo para a diversificação da matriz energética do país.

Após observar a quantidade de usinas em algumas capitais serem relativamente menores que as demais, uma análise da relação entre a quantidade de usinas solares instaladas e o número de habitantes em cada município é fundamental para compreender o nível de adesão à geração distribuída de energia em diferentes contextos populacionais. Relacionar esses dados permite avaliar como a densidade populacional influencia a implantação de sistemas fotovoltaicos.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), a população brasileira, estimada em 212,6 milhões de habitantes em 1º de julho de 2024, é distribuída de maneira desigual pelo território nacional. O país conta com 15 municípios que possuem mais de 1 milhão de habitantes, entre eles, grandes centros urbanos como Rio de Janeiro, Brasília, Fortaleza e Salvador. Esses dados em conjunto com a quantidade de usinas instaladas, que de acordo com a análise da tabela 3, pode revelar importantes padrões de desenvolvimento sustentável, destacando quais cidades têm conseguido alavancar a energia solar para suprir suas crescentes demandas energéticas.

Tabela 3 – Quantidade de usinas por habitantes.

Nome do Município	Usinas Instalada	População	Usinas por Habitantes
Rio de Janeiro	28318	6211223	0,0046
Brasília	24149	2817381	0,0086
Fortaleza	25963	2428708	0,0107
Campo Grande	36397	898100	0,0405
Teresina	28958	866300	0,0334
Cuiabá	30380	650877	0,0467

Fonte: Autoria Própria (2024).

Ao comparar a relação entre a quantidade de usinas solares instaladas e a população dos municípios é possível perceber *insights* importantes sobre o nível de adesão à geração distribuída de energia. Ao calcular o índice de usinas por habitante, foi possível identificar quais cidades têm uma maior densidade de geração solar em relação ao seu número de habitantes. Essa métrica mostra que, embora cidades como Brasília e Rio de Janeiro possuam alta potência instalada total, elas têm poucas usinas instaladas quando comparada com a quantidade de habitantes, já outras cidades, como Fortaleza, Teresina e Cuiabá, podem apresentar uma densidade mais alta de usinas por habitante, que ainda assim é um percentual baixo, mas indicando um maior engajamento local.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise da expansão da energia solar no Brasil demonstra que, apesar do avanço significativo nas últimas décadas, ainda há um grande potencial a ser explorado, especialmente nas regiões Norte e Nordeste, que apresentam alta incidência solar, mas menor densidade de usinas instaladas. A utilização de micro e minigeração tem se mostrado uma solução viável tanto para áreas urbanas quanto rurais, promovendo maior independência energética e contribuindo para a sustentabilidade ambiental. A implementação contínua de políticas públicas e incentivos fiscais é essencial para fomentar o crescimento desse setor, proporcionando um ambiente favorável para novos investimentos e inovações tecnológicas.

A exploração da classe de consumo rural na geração distribuída de energia solar ainda representa uma oportunidade subaproveitada no Brasil. Embora estados como Minas Gerais e Paraná apresentem um crescimento expressivo, muitas áreas rurais do Norte e Nordeste possuem potencial significativo para a instalação de sistemas fotovoltaicos. A adoção da energia

solar em propriedades rurais pode ser uma solução estratégica para reduzir os custos com eletricidade, especialmente em regiões onde a rede elétrica convencional é limitada ou de difícil acesso.

Este trabalho concluiu que a geração distribuída de energia solar possui um potencial significativo não apenas para fornecer eletricidade, mas também para impulsionar o desenvolvimento socioeconômico local. A expansão desse modelo cria novas oportunidades de negócio, fomenta o empreendedorismo e promove a inclusão energética, especialmente em áreas remotas. O uso crescente de sistemas fotovoltaicos, particularmente no setor agropecuário, representa uma estratégia eficaz para diversificar a matriz energética nacional.

A expansão da energia solar nessas não só promove a independência energética, mas também impulsiona o desenvolvimento socioeconômico dos grandes centros comerciais, industriais e das comunidades rurais. Ao democratizar o acesso à energia limpa e renovável, a geração distribuída que pode fortalecer a economia local, gerar empregos e reduzir a desigualdade energética entre regiões do país. Portanto, o incentivo à exploração dessas classes de consumos são fundamentais para garantir uma transição energética justa e eficiente, contribuindo para a diversificação da matriz energética nacional e para o cumprimento das metas de sustentabilidade.

Por fim, essa pesquisa revelou que a aplicação de tecnologias de análise de dados, como o uso de *Python*, é uma ferramenta poderosa para compreender a dinâmica da geração distribuída de energia solar no país. Através da análise regional, foi possível identificar padrões de consumo e distribuição que podem orientar futuras políticas públicas e decisões estratégicas para o setor. No entanto, a expansão desse modelo energético dependerá da continuidade de políticas que incentivem a geração distribuída, bem como do desenvolvimento de novas linhas de financiamento e apoio ao consumidor final, permitindo que mais brasileiros tenham acesso a fontes de energia renovável.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: 2 nov. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR). Infográfico sobre o mercado de energia solar. Disponível em: <https://www.absolar.org.br/mercado/infografico/>. Acesso em: 2 nov. 2024.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Micro e minigeração distribuída: Perguntas frequentes. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/acesso-a-informacao/perguntas-frequentes/micro-e-minigeracao-distribuida#:~:text=1.2%20Qual%20%C3%A9%20a%20diferen%C3%A7a,centrais%20geradoras%20de%20fontes%20despach%C3%A1veis>. Acesso em: 15 nov. 2024.

BRASIL. Lei n. 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída de energia e cria o Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 7 jan. 2022.

CHAGAS, Emanuela Ieda. Análise de produtividade de usinas solares fotovoltaicas pelo indicador final yield: estudo de caso da Universidade Federal Rural do Sem-Árido-UFERSA. 2023.

CRESWELL, J. W. Projeto de Pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto. Tradução de: Sandra Maria Mallmann da Rosa; revisão técnica: Dirceu da Silva. 5. ed. Porto Alegre: Penso, 2021.

FAPESP. Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho. Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo: FAPESP, InterAcademy Council, 2007. Disponível em: <www.fapesp.br/publicacoes/energia.pdf>. Acesso em: 13 nov. 2024

INTELBRAS. Energia solar no agronegócio: como pode beneficiar sua produção rural. Disponível em: <https://blog.intelbras.com.br/energia-solar-no-agronegocio/>. Acesso em: 06 nov. 2024.

SEBRAE. O agronegócio aposta em energia solar. Disponível em: <https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/o-agronegocio-aposta-em-energia-solar,fff14f8166257810VgnVCM1000001b00320aRCRD>. Acesso em: 06 nov. 2024.

SILVA, Heitor Marques Francelino da; ARAÚJO, Francisco José Costa. ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO BRASIL: UMA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA. Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação, [S. l.], v. 8, n. 3, p. 859–869, 2022. DOI: 10.51891/rease.v8i3.4654. Disponível em: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/4654>. Acesso em: 13 nov. 2024.