

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO E SISTEMAS
CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO ELÉTRICA

Lucas Armando Cielo

**Análise da relevância de critérios na escolha da localização de instalações
fotovoltaicas para geração de energia**

Florianópolis
2023

Lucas Armando Cielo

Análise da relevância de critérios na escolha da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia

Trabalho de Conclusão de Curso submetida ao Curso de Engenharia de Produção Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista com habilitação em Engenharia de Produção.
Orientador: Prof. Dra. Mônica Maria Mendes Luna

Florianópolis
2023

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Ciello, Lucas Armando Ciello

Análise da relevância de critérios na escolha da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia / Lucas Armando Ciello Ciello ; orientadora, Mônica Maria Mendes Luna Luna, 2023.

78 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia de Produção Elétrica, Florianópolis,
2023.

Inclui referências.

1. Engenharia de Produção Elétrica. 2. Estudo de Localização. 3. Multicritério. 4. Usina Solar Fotovoltaica. I. Luna, Mônica Maria Mendes Luna. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Produção Elétrica. III. Título.

Lucas Armando Cielo

Análise da relevância de critérios na escolha da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia

O presente trabalho em nível de Engenheiro Eletricista com habilitação em Engenharia de Produção foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Mônica Maria Mendes Luna.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Gisele Chaves.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Prof.(a) Maurício Uriona Maldonado.
Instituição Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheiro Eletricista com habilitação em Engenharia de Produção.

Prof. Dra. Mônica Maria Mendes Luna
Orientador

Florianópolis, 2023.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais, que me apoiaram em todas as etapas da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Nelson e Nazarete que sempre estiveram ao meu lado me apoiando ao longo de toda a minha trajetória. A professora Mônica, por ter sido minha orientadora e ter desempenhado tal função com dedicação e amizade.

"We cannot predict the future, but we can create it"
(Peter Drucker)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo analisar a relevância dos critérios utilizados na escolha da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia solar. Para isso, foram revisados dez artigos científicos e documentos governamentais relevantes, a fim de identificar os critérios mais frequentemente mencionados na literatura e nas diretrizes governamentais. Em seguida, foi realizada uma comparação entre os critérios mencionados e os dados reais de usinas solares já instaladas, a fim de verificar se os critérios citados estavam sendo efetivamente aplicados na prática. Essa análise permitiu validar a importância e a aplicabilidade dos critérios na tomada de decisão sobre a localização das usinas. Com base nessa análise, foi desenvolvido um modelo multicritério para a seleção da localização de usinas solares, levando em consideração a relevância de cada critério. Esse modelo destacou a importância relativa de cada critério, levando em conta o tamanho da usina. Os resultados obtidos mostraram que diferentes critérios têm diferentes níveis de importância, dependendo do contexto específico do projeto. Este estudo contribuiu para uma melhor compreensão dos critérios relevantes na escolha da localização de instalações fotovoltaicas, oferecendo subsídios para tomadas de decisão mais embasadas e eficientes nesse campo. Além disso, o modelo proposto pode ser utilizado como uma ferramenta prática para auxiliar os responsáveis pela seleção da localização de usinas solares, considerando as particularidades de cada projeto e a diversidade de atores envolvidos.

Palavras-chave: Estudo de Localização. Multicritério. Usina Solar Fotovoltaica. Geração centralizada. Geração Distribuída.

ABSTRACT

This work aimed to analyze the relevance of the criteria used in choosing the location of photovoltaic installations for solar energy generation. For this, ten scientific articles and relevant government documents were reviewed in order to identify the criteria most frequently mentioned in the literature and in government guidelines. Then, a comparison was made between the mentioned criteria and the real data of solar plants already installed, in order to verify if the mentioned criteria were being effectively applied in practice. This analysis allowed validating the importance and applicability of the criteria in decision-making on the location of the plants. Based on this analysis, a multicriteria model was developed for selecting the location of solar plants, taking into account the relevance of each criterion. This model highlighted the relative importance of each criterion, taking into account the size of the plant. The results obtained showed that different criteria have different levels of importance, depending on the specific context of the project. This study contributes to a better understanding of the relevant criteria in choosing the location of photovoltaic installations, offering subsidies for more informed and efficient decision-making in this field. In addition, the proposed model can be used as a practical tool to assist those responsible for selecting the location of solar plants, considering the particularities of each project and the diversity of actors involved.

Keywords: Location Study. Multicriteria. Photovoltaic Solar Plant. Centralized Generation. Distributed generation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Procedimento de pesquisa	15
Figura 2 – Usina fotovoltaica de Piauí.	16
Figura 3 – Efeito fotovoltaico.	19
Figura 4 – Célula, módulo e arranjo.	19
Figura 5 – Geração, Transmissão e Distribuição.	20
Figura 6 – Mapeamento organizacional das Instituições que fazem parte do setor elétrico nacional.	21
Figura 7 – Critérios mais citados nos estudos.	43
Figura 8 – Mapa de irradiação solar no Brasil	45
Figura 9 – Mapa de usinas instaladas de geração centralizada no Brasil	46
Figura 10 – Mapa da localização das nove maiores usinas do Brasil	47
Figura 11 – Mapa de usinas instaladas de geração distribuída no Brasil	48
Figura 12 – Mapa topográfico brasileiro	49
Figura 13 – Mapa rodoviário brasileiro	50
Figura 14 – Densidade demográfica	51
Figura 15 – Mapa principais linhas de transmissão	52
Figura 16 – Mapa da temperatura média anual no Brasil	53
Figura 17 – Mapa da potencialidade agrícola natural das terras do Brasil	54
Figura 18 – Mapa da velocidade média do vento no Brasil	57
Figura 19 – Mapa de unidade relativa no Brasil	58
Figura 20 – Mapa de áreas protegidas no Brasil	59
Figura 21 – Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil	60
Figura 22 – Estrutura hierárquica proposta.	63
Figura 23 – Estrutura hierárquica proposta para usinas de geração centralizada	66
Figura 24 – Estrutura hierárquica proposta para usinas médias	67
Figura 25 – Estrutura hierárquica proposta para usinas de geração distribuída .	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Wang <i>et al.</i> (2022) .	24
Quadro 2 – Critérios utilizados no estudo de Wang <i>et al.</i> (2022)	25
Quadro 3 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Rediske <i>et al.</i> (2020)	26
Quadro 4 – Critérios utilizados no estudo de Rediske <i>et al.</i> (2020)	26
Quadro 5 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Wang <i>et al.</i> (2018) .	27
Quadro 6 – Critérios utilizados no estudo de Wang <i>et al.</i> (2018)	27
Quadro 7 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Villacreses <i>et al.</i> (2022)	28
Quadro 8 – Critérios utilizados no estudo de Villacreses <i>et al.</i> (2022)	28
Quadro 9 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Azevêdo (2016) . .	29
Quadro 10 – Critérios utilizados no estudo de Azevêdo (2016)	29
Quadro 11 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Tafula <i>et al.</i> (2023)	31
Quadro 12 – Critérios utilizados no estudo de Tafula <i>et al.</i> (2023)	32
Quadro 13 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Marquesine, Chamma e Batistella (2022)	33
Quadro 14 – Critérios utilizados no estudo de Marquesine, Chamma e Batistella (2022)	33
Quadro 15 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Türk, Koç e Şahin (2021)	34
Quadro 16 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Mokarram <i>et al.</i> (2020)	35
Quadro 17 – Critérios utilizados no estudo de Mokarram <i>et al.</i> (2020)	35
Quadro 18 – Descrição dos critérios utilizados no estudo Souza <i>et al.</i> (2020) . .	36
Quadro 19 – Critérios utilizados no estudo Souza <i>et al.</i> (2020)	36
Quadro 20 – Critérios para orientar a escolha de locais de para usinas de gera- ção de energia solar fotovoltaica	37
Quadro 21 – Itens descritos no estudo de ABINEE (2012)	38
Quadro 22 – Lista de critérios	43
Quadro 23 – Métodos utilizados	44
Quadro 24 – Grupos de critério	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
2	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	14
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1	USINA SOLAR FOTOVOLTAICA	16
3.1.1	Geração de energia fotovoltaica	18
3.2	INDÚSTRIA DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL	19
3.2.1	Transmissão e distribuição de energia elétrica	20
3.2.2	Setor elétrico brasileiro	20
3.3	ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO	22
3.3.1	Estudos de caso sobre localização	23
3.3.1.1	Documentos de órgãos governamentais	36
3.3.1.2	Outros critérios	39
3.3.2	Identificação de alternativas potenciais	40
3.3.3	Atores	40
4	DESENVOLVIMENTO	42
4.1	ANÁLISE DOS CRITÉRIOS	42
4.1.1	Irradiação solar	44
4.1.2	Topografia	48
4.1.3	Distância de rodovias	49
4.1.4	Distância de áreas urbanas	50
4.1.5	Distância da rede elétrica	51
4.1.6	Temperatura	52
4.1.7	Uso do solo	53
4.1.8	Incentivos	55
4.1.9	Velocidade do vento	56
4.1.10	Umidade	57
4.1.11	Área protegida	58
4.1.12	Distância de recursos hídricos	59
4.1.13	Demanda potencial	60
4.1.14	Viabilidade econômica	61
4.2	PROPOSIÇÃO DE MODELO	61
4.2.1	Estruturação hierárquica	61
4.2.2	Relevância dos critérios	64
4.3	ANÁLISE DE RESULTADOS	68
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	70
	Referências	72

1 INTRODUÇÃO

O aumento no consumo de energia elétrica é uma tendência global que acompanha o crescimento econômico e populacional. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA, 2021), a demanda global por eletricidade aumentou cerca de 4,6% em 2021, em comparação com 2020. Alguns fatores que contribuem para o aumento da demanda de energia elétrica incluem o crescimento populacional, o aumento da urbanização, o avanço tecnológico e o maior uso de dispositivos eletrônicos (IEA, 2021).

No Brasil, a EPE (2023) indica que o consumo de energia elétrica teve um crescimento de 0,6% em janeiro de 2023 em comparação ao mesmo período do ano anterior, totalizando 42.837 GWh. O desempenho positivo foi impulsionado pela classe residencial, que apresentou um aumento de 1,8%, as classes comercial e industrial também contribuíram para a alta, com crescimento de 1,4% e 1,2%, respectivamente (EPE, 2023). No acumulado dos últimos 12 meses, o consumo nacional de energia elétrica totalizou 508.954 GWh, o que representa um aumento de 1,4% em relação ao período anterior (EPE, 2023).

Para atender à crescente demanda por energia, existem diversas opções de geração de eletricidade disponíveis. No Brasil, a principal fonte de geração de energia é a hidrelétrica, correspondendo a cerca de 53,4% da capacidade instalada no país (EPE, 2022). No entanto, como apontado por Azevêdo (2016), a geração de energia a partir de fontes hídricas é suscetível às variações climáticas globais, podendo apresentar redução da sua capacidade instalada em função da diminuição do período de chuva e, conseqüentemente, dos reservatórios das hidrelétricas. Por essa razão, torna-se necessário investir em meios de geração de energia alternativos para complementar a matriz energética e garantir a segurança energética do país. A energia solar, como destaca a EPE (2022), foi responsável por 2,5% da eletricidade gerada no Brasil, sendo uma alternativa muito promissora em termos de crescimento.

De acordo com Mapa e Lima (2012a), a localização de instalações é uma tarefa complexa que envolve a análise de diversas variáveis. No caso da instalação de uma usina fotovoltaica, trata-se de um investimento significativo que requer uma visão de longo prazo. Fatores como a incidência de radiação solar, a proximidade de linhas de distribuição de média tensão, as tarifas locais e os impostos cobrados por estado podem ser críticos para o sucesso desse tipo de empreendimento (KALOGIROU, 2013). Realizar um estudo de localização é crucial para avaliar as diferentes opções de local para um empreendimento ou projeto, considerando fatores como a disponibilidade de recursos naturais, acesso à infraestrutura, aspectos ambientais e regulatórios, dentre outros (MOREIRA, 1998).

Além disso, conforme nota da EPE (2022), a escolha de um local inadequado pode gerar impactos ambientais e sociais negativos, como a degradação de áreas de

preservação ambiental, conflitos com comunidades locais e impactos na fauna e flora da região. Portanto, um estudo de localização bem realizado pode minimizar esses impactos e reduzir os riscos da instalação de uma usina em um local inadequado.

Logo, a utilização dos critérios corretos em um estudo de localização de um projeto desempenha um papel fundamental na obtenção de análises precisas e eficazes. Critérios adequados permitem uma compreensão abrangente das características e requisitos do local, possibilitando uma tomada de decisão embasada e robusta. No contexto de usinas solares, é importante ressaltar que esses critérios podem variar em termos de importância, dependendo do tamanho da usina e dos atores envolvidos.

Neste trabalho, é realizado um estudo com o objetivo de identificar os critérios e os níveis de importância de diversos critérios para diferentes tamanhos de usina fotovoltaica. Compreender a relevância relativa de cada critério é crucial para orientar as decisões de localização dessas instalações. Ao considerar as necessidades específicas de cada tipo de usina, é possível estabelecer uma hierarquia clara de critérios.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral realizar uma análise da relevância dos critérios utilizados na seleção da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia solar. Como objetivos específicos, procura-se neste trabalho:

- Identificar critérios usados para localização de usinas solares;
- Avaliar se os critérios identificados justificam a localização das usinas instaladas no Brasil;
- Discutir a importância de cada critério para geração centralizada e distribuída;
- Propor uma estrutura hierárquica multicritério de apoio à decisão que apoie a escolha de localização de usinas de geração centralizada e distribuída.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho pode ser caracterizado como uma pesquisa qualitativa e, quanto aos objetivos, como uma pesquisa descritiva. Procura-se, por meio, de pesquisa bibliográfica e documental identificar os critérios a serem considerados no processo de escolha de um local para instalação de uma usina solar e a importância dos mesmos em função do tamanho das usinas.

A escolha da localização mais adequada para uma usina fotovoltaica leva em consideração diversos critérios que podem variar de acordo com o tamanho da usina e os objetivos dos investidores. Entre os critérios mais comuns estão a irradiação solar na região, a topografia do terreno, as condições climáticas, a disponibilidade de infraestrutura elétrica e de transporte, as restrições ambientais e regulatórias, entre outros.

Para identificar esses critérios e compreender a importância de cada um, realizamos uma pesquisa no Google Acadêmico por publicações relacionadas à escolha de localização de usinas fotovoltaicas, utilizando as palavras-chave "Análise multicritério de localização de usina solar". Os estudos foram selecionados de forma sequencial, utilizando aqueles que não abordavam critérios para escolha de usinas solares como leitura secundária, e passando para o próximo artigo. Esse processo foi repetido até obtermos um total de dez artigos relevantes.

Artigos científicos que apresentam modelos multicritérios de escolha de localização de instalação, foram analisados buscando identificar, a estrutura hierárquica adotada, os critérios, subcritérios, a importância dada aos vários critérios e a dimensão da usina (se usina de geração concentrada, minigeração ou geração distribuída). Essa análise, permitiu identificar quais os critérios mais comumente usados e sua relevância para as usinas de geração distribuída e geração centralizada.

Durante a análise dos estudos sobre a localização de usinas fotovoltaicas, foi adotada uma abordagem criteriosa na seleção dos critérios utilizados neste estudo. Foi estabelecido como critério mínimo de inclusão aqueles que foram mencionados em pelo menos dois estudos distintos e que possuíam pesos superiores a 0,09.

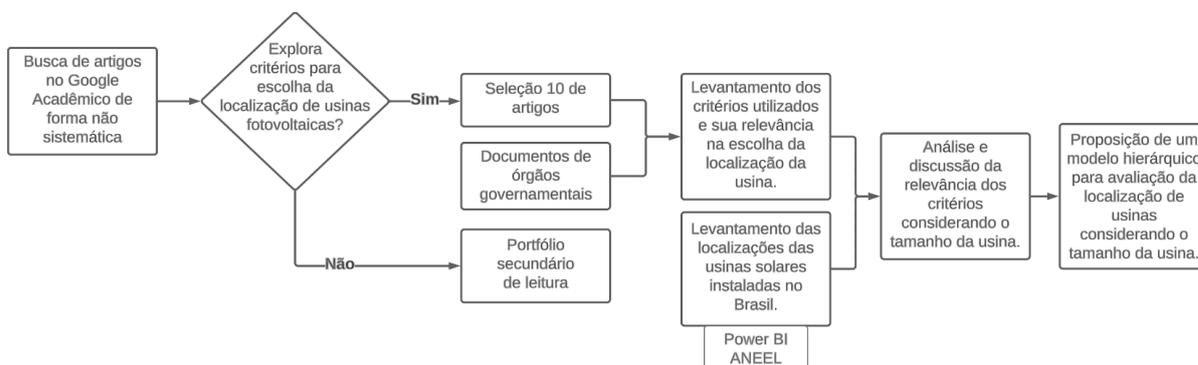
Após essa etapa, foi analisada a localização das usinas instaladas no Brasil, com o objetivo de verificar se esses critérios são de fato considerados na escolha dos locais e se a relevância dos critérios citada na literatura explica a concentração de usinas no Brasil. Nessa etapa, foram usados dados obtidos no Sistema de Informações de Geração da ANEEL (SIGA) que contém informações das usinas em operação segundo a capacidade de Geração. Essa análise permitiu identificar a aplicação prática dos critérios e avaliar a sua relevância na seleção dos locais onde estão instaladas as usinas.

Ao examinar as usinas instaladas em relação aos critérios estabelecidos, tornou-

se possível verificar se houve uma correspondência entre os critérios identificados nos estudos e as características das usinas já instaladas, identificando se os critérios considerados como importantes no estudo acadêmico também foram levados em conta pelos empreendedores e responsáveis pela instalação das usinas solares.

Com base nas informações coletadas e nos estudos realizados, é apresentado um modelo multicritério para avaliar a localização de uma usina fotovoltaica. Esse modelo classifica e destaca cada critério em função da sua relevância considerando o tamanho da usina. A figura 1 ilustra o procedimento de pesquisa.

Figura 1 – Procedimento de pesquisa



Fonte: Autor

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 USINA SOLAR FOTOVOLTAICA

Uma usina solar, também conhecida como parque solar ou complexo solar, é uma central geradora de energia elétrica de que converte a energia da luz solar em eletricidade por meio de painéis fotovoltaicos. A eletricidade gerada é transmitida por linhas de transmissão para os centros urbanos (FERREIRA, 1986).

A usina solar é composta por uma área onde são instalados mesas com painéis solares para captar a energia solar. Na figura 2, é possível visualizar um exemplo de uma usina solar. No Piauí, encontra-se a maior usina solar da América do Sul, que ocupa uma área de aproximadamente 12.000.000 m², possui cerca de 2.2 milhões de painéis solares e tem capacidade de 475 MW (ANEEL, 2022b).

Figura 2 – Usina fotovoltaica de Piauí.



Fonte: CMA (2019)

As usinas fotovoltaicas podem ser classificadas como geração distribuída e a geração centralizada (ou concentrada), sendo duas abordagens diferentes para a produção de energia elétrica. Na geração distribuída, a eletricidade é produzida em pequenas instalações próximas ao local de consumo, enquanto na geração centralizada, grandes usinas de geração são construídas em locais remotos e a eletricidade é transportada por longas distâncias até os centros de consumo (ANEEL, 2022a).

As unidades de geração distribuída podem ser classificadas de acordo com sua potência instalada. De acordo com a lei Nº 14.300 (ANEEL, 2022a), as usinas com potência de até 75 kW, geralmente conectadas em baixa tensão, são classificadas como microgeração distribuída. Usinas com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW, normalmente conectadas em média tensão, são classificadas como mini geração distribuída (ANEEL, 2022a).

A geração centralizada de energia solar fotovoltaica é um modelo utilizado em todo o mundo, com grandes usinas concentradas em países como China, Estados Unidos, Japão, Índia e Europa (MAIA, 2018). Embora países menores também estejam investindo em geração centralizada, geralmente possuem usinas de menor porte em

relação aos países líderes do setor (MAIA, 2018). Por outro lado, a geração distribuída pode ser mais eficiente e confiável do que a geração centralizada, uma vez que a eletricidade é produzida localmente e pode ser usada imediatamente, sem perdas na transmissão (SANTOS; SANTOS, 2008).

O espaço necessário para instalar uma usina solar depende de vários fatores, tais como: a eficiência dos painéis solares utilizados; a densidade de potência da instalação; a topografia e a disponibilidade de terra. Em geral, uma usina fotovoltaica de 1 MW ocupa aproximadamente de 8.000 a 10.000m² (PORTAL SOLAR, 2022). Dependendo da área ocupada pela usina, a instalação pode gerar impactos negativos (BARBOSA FILHO *et al.*, 2015), dentre os quais:

- impacto visual e paisagístico na região onde a usina é instalada;
- impacto na fauna e flora local, principalmente durante a fase de construção da usina;
- necessidade de grandes áreas para a instalação das placas fotovoltaicas, podendo competir com outras atividades econômicas e sociais;
- impactos no solo e nos recursos hídricos da região, caso não sejam tomadas medidas adequadas de gestão ambiental.

Apesar dos impactos negativos, de acordo com Barbosa Filho *et al.* (2015), a instalação de uma usina solar também gera impactos positivos, dentre os quais:

- redução das emissões de gases de efeito estufa e da poluição do ar, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas e para a melhoria da qualidade do ar;
- geração de energia limpa e renovável, sem o consumo de combustíveis fósseis;
- estímulo ao desenvolvimento de tecnologias limpas e à transição para uma matriz energética mais sustentável;
- possibilidade de geração de empregos locais durante a construção e manutenção da usina;
- contribuição para a segurança energética do país, reduzindo a dependência de fontes de energia importadas.

É importante ressaltar que a energia fotovoltaica é geralmente considerada uma forma de energia limpa e sustentável devido à sua capacidade de gerar eletricidade sem a emissão direta de gases de efeito estufa durante a operação. No entanto, é importante reconhecer que a produção e o descarte dos materiais utilizados na fabricação dos painéis solares podem ter impactos ambientais significativos (WECKEND; WADE; HEATH, 2016).

3.1.1 Geração de energia fotovoltaica

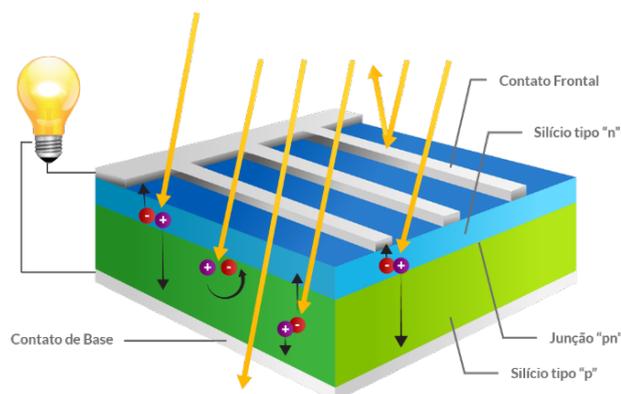
A geração de energia elétrica ocorre a partir da conversão de diferentes formas de energia disponíveis na natureza. Por exemplo, em uma hidrelétrica ou usina eólica, a energia mecânica da água ou do vento é transformada em energia elétrica através da rotação das turbinas, movidas pelas forças exercidas pela água ou pelo vento (QUEIROZ *et al.*, 2013). Para geração de energia solar, o processo de conversão é diferente e ocorre através do efeito fotovoltaico. Esse efeito consiste na conversão direta de radiação eletromagnética em energia elétrica, sem a necessidade de partes móveis ou mecânicas, pois a conversão ocorre por meio da geração e separação de cargas elétricas pela interação da radiação solar com o material semicondutor presente nas células fotovoltaicas (EINSTEIN, 1965).

As células fotovoltaicas consistem em duas camadas de material semicondutor, geralmente o silício, combinadas com outros materiais, a fim de alterar sua estrutura eletrônica (COELHO *et al.*, 2008). Como resultado, uma das camadas torna-se negativa, com excesso de elétrons, enquanto a outra camada torna-se positiva, com falta de elétrons, a área de contato entre as duas camadas é conhecida como junção PN (COELHO *et al.*, 2008).

A junção PN é definida como uma região de contato entre duas regiões dopadas com impurezas de tipos opostos em um material semicondutor. De acordo com Coelho *et al.* (2008), na junção PN, a região P é caracterizada por uma alta concentração de lacunas, que são espaços vazios na estrutura atômica, enquanto a região N é caracterizada por uma alta concentração de elétrons. Essa junção PN é criada durante a fabricação do dispositivo semicondutor pela difusão de impurezas dopantes. A região P é produzida pela introdução de impurezas do tipo aceitador de lacunas, como por exemplo boro, enquanto a região N é produzida pela introdução de impurezas do tipo doador de elétrons, como por exemplo fósforo. Essa difusão de impurezas gera uma camada com diferentes propriedades eletrônicas, criando assim uma barreira de potencial que forma um campo elétrico que impede que os elétrons em excesso da camada negativa atravessem para a camada com falta de elétrons Coelho *et al.* (2008).

Sendo assim, a junção PN é responsável pela formação de uma barreira de potencial elétrico que impede que os elétrons em excesso da camada negativa difundam para a camada com falta de elétrons, bloqueando a corrente elétrica no sentido reverso. Quando a radiação luminosa incide na célula fotovoltaica, os elétrons dos átomos na camada externa ganham energia suficiente dos fótons para se libertarem da força de atração dos núcleos dos átomos e se tornarem elétrons livres. Devido ao campo elétrico da junção PN, esses elétrons se acumulam na camada negativa e, assim, uma finíssima grade na face das células fotovoltaicas (geralmente feita de pasta de prata) é utilizada para capturar os elétrons livres, permitindo a formação de uma corrente elétrica (COELHO *et al.*, 2008). A figura 3 ilustra o efeito fotovoltaico.

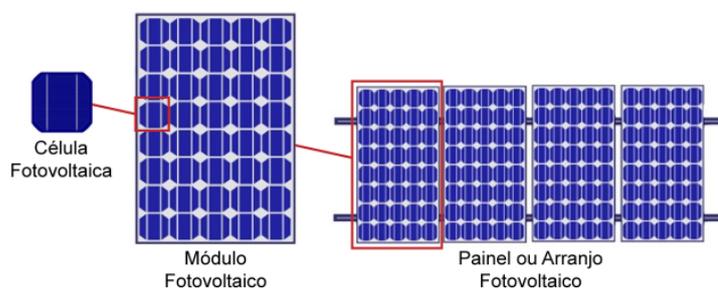
Figura 3 – Efeito fotovoltaico.



Fonte: Brito (2008)

De acordo com Duffie e Beckman (2013), uma célula fotovoltaica é a unidade fundamental de um dispositivo fotovoltaico, responsável por converter a energia solar diretamente em energia elétrica. Um módulo solar, por sua vez, é um dispositivo completo composto por várias células fotovoltaicas conectadas eletricamente em série e paralelo, e uma estrutura de suporte para proteção e fixação. Por fim, um arranjo fotovoltaico é composto por um conjunto interconectado de módulos, formando a base de um sistema fotovoltaico para geração de eletricidade a partir da luz solar. A figura 4 ilustra a diferenciação entre célula, módulo e arranjo.

Figura 4 – Célula, módulo e arranjo.



Fonte: Morais (2020)

3.2 INDÚSTRIA DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL

Segundo nota da ABRADÉE (2018), a indústria de energia elétrica é composta por geradores que estão distribuídos em diversas localidades, por linhas de transmissão e distribuição de energia, formando o que é conhecido como "indústria de rede".

Todo o sistema é interconectado eletricamente, o que exige o constante e instantâneo equilíbrio entre a produção e o consumo de energia.

3.2.1 Transmissão e distribuição de energia elétrica

O processo de geração de energia elétrica envolve, além da produção, a transmissão e distribuição da energia gerada. Na etapa de transmissão, a energia é transportada das usinas para os pontos de distribuição em alta tensão, por meio de linhas de transmissão. Essas linhas são compostas por cabos aéreos revestidos com materiais isolantes, que são fixados em torres ao longo do trajeto. Na etapa de distribuição, a energia é reduzida em sua tensão e, então, distribuída para os consumidores pelas concessionárias responsáveis (ABRADEE, 2018). A figura 5 ilustra os processos de geração, transmissão e distribuição.

Figura 5 – Geração, Transmissão e Distribuição.



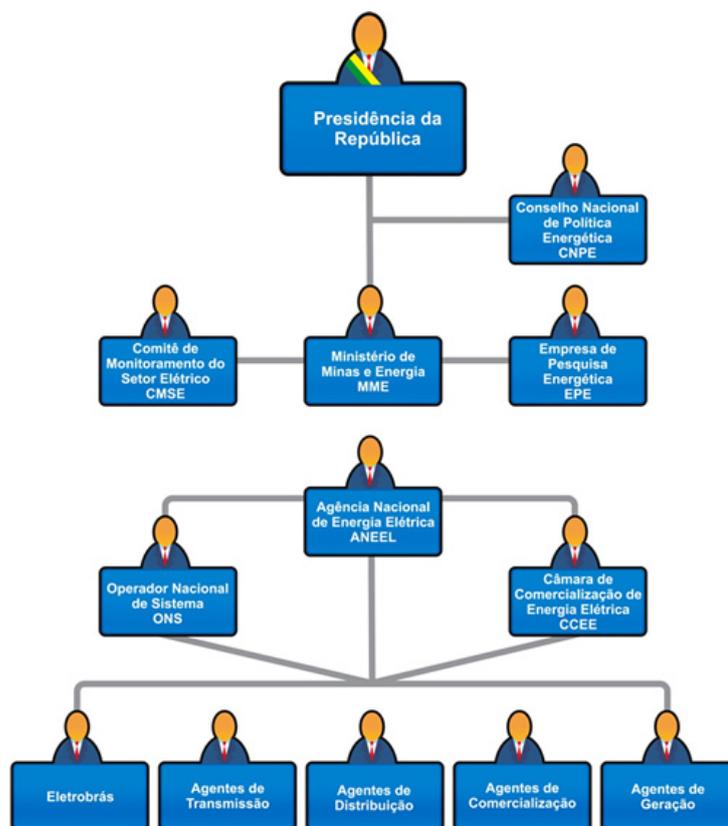
Fonte: ABRADEE (2018)

3.2.2 Setor elétrico brasileiro

O setor elétrico brasileiro é composto por diversos agentes, incluindo órgãos governamentais responsáveis pela formulação e implementação de políticas energéticas, regulação, operação centralizada e comércio de energia. Além disso, existem os agentes que atuam diretamente na produção e transporte de energia elétrica. Os geradores, responsáveis pela geração da eletricidade em usinas de diferentes fontes, os transmissores transportam a energia gerada por meio de linhas de transmissão de alta tensão para as subestações e os distribuidores são responsáveis por distribuir a energia elétrica para os consumidores finais, cada agente tem um papel importante na cadeia de fornecimento de energia elétrica no país (ABRADEE, 2018).

A figura 6 ilustra o mapeamento organizacional das instituições que dão corpo ao setor elétrico nacional.

Figura 6 – Mapeamento organizacional das Instituições que fazem parte do setor elétrico nacional.



Fonte: ABRADÉE (2018)

O Conselho Nacional de Política de Energia (CNPE) é o órgão que presta assessoria ao Presidente da República, e que possui como atribuição principal a formulação de políticas e diretrizes de energia destinadas a promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos do País (BRASIL, 2021).

O Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE) é o órgão sob coordenação direta do MME, criado para acompanhar e avaliar a continuidade e a segurança do suprimento elétrico em todo o território nacional (BRASIL, 2021).

O Ministério de Minas e Energia (MME) é o órgão do governo federal responsável pela condução das políticas energéticas do país. Suas principais obrigações incluem a formulação e a implementação de políticas para o setor energético. (BRASIL, 2021).

A Empresa de Pesquisa Energética (EPE) tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético (BRASIL, 2021).

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é quem que regulamenta a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica (BRASIL, 2021).

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) é o órgão responsável pela

coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) e pelo planejamento da operação dos sistemas isolados do país, sob a fiscalização e regulação da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (BRASIL, 2021).

A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) tem por finalidade viabilizar a comercialização de energia elétrica no mercado de energia brasileiro (BRASIL, 2021).

3.3 ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO

A importância de instalar uma usina solar em lugar um local adequado está diretamente relacionada ao seu desempenho e rentabilidade. O potencial de geração de energia solar depende de fatores como a irradiação solar, temperatura, sombreamento, entre outros, portanto, a escolha do local de instalação deve ser feita de forma cuidadosa, levando em consideração esses fatores e utilizando ferramentas de análise para determinar a melhor localização (AZEVEDO, 2016).

Moreira (1998) relata que o processo de estudo de localização é uma etapa crucial e altamente específica na implantação de um empreendimento dessa natureza, tendo em vista que cada projeto apresenta particularidades que devem ser consideradas. Mapa e Lima (2012b) afirmam que problemas de localização de instalações são altamente complexos, exigindo uma análise minuciosa de diversas variáveis. Para enfrentar esses desafios, existem várias técnicas sistemáticas e quantitativas que podem ser utilizadas no processo de tomada de decisão. Alguns exemplos incluem a técnica de ponderação de fatores, o método do centro de gravidade e o método AHP. Cada uma dessas técnicas apresenta vantagens e desvantagens, e a escolha da mais adequada dependerá das particularidades do empreendimento em questão.

A combinação de diferentes técnicas em estudos, conhecida como abordagem híbrida, pode trazer benefícios significativos. Ao combinar métodos, é possível aproveitar as vantagens de cada um e superar suas limitações individuais. Por exemplo, é possível utilizar a ponderação de fatores para atribuir pesos iniciais aos critérios e, em seguida, aplicar o método AHP para refinar as ponderações com base nas preferências dos tomadores de decisão. Essa abordagem permite uma análise mais abrangente e uma tomada de decisão mais fundamentada.

No entanto, é importante destacar que a escolha das técnicas a serem combinadas deve ser feita com base na natureza do problema, disponibilidade de dados e recursos, e conhecimento dos especialistas envolvidos. A adequação da combinação de técnicas deve ser cuidadosamente avaliada para garantir resultados confiáveis e significativos.

Visando identificar os critérios adotados para definir a localização de usinas solar, foram levantados os modelos usados na literatura, relatórios técnicos publicados

pelo e outros artigos sobre geração de energia que, embora não trouxessem estudos de localização, citassem aspectos relevantes que não estavam contemplados nos demais estudos.

3.3.1 Estudos de caso sobre localização

Vários estudos de caso foram realizados com o objetivo de analisar os melhores locais para a instalação de usinas fotovoltaicas. Esses estudos levam em consideração diversos fatores como disponibilidade de radiação solar, clima, topografia, condições ambientais e socioeconômicas locais, entre outros. A identificação do local adequado para a instalação de uma usina fotovoltaica é fundamental para garantir a máxima produção de energia e operação eficiente da usina, minimizando custos e impactos negativos ao meio ambiente e à sociedade. Portanto, a análise de estudos de caso torna-se uma ferramenta fundamental para a tomada de decisão no setor de energia renovável.

O trabalho de Wang *et al.* (2022) utiliza uma abordagem de análise multicritério para a seleção de locais de instalação de estações de energia integrada em áreas urbanas. A metodologia utilizada neste estudo foi baseada na integração de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e uma abordagem aprimorada do método TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution). Os autores argumentam que o método proposto pode ajudar a melhorar a eficiência e a sustentabilidade da geração de energia em áreas urbanas. O estudo considera uma usina de grande porte, sendo classificada como geração centralizada. O quadro 1 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 2 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 1 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Wang *et al.* (2022)

Critério	Descrição
Radiação solar	Potencial de irradiação solar em cada localização
Temperatura	Temperatura média em cada localização
Velocidade do vento	Velocidade do vento em cada localização
Declive	Topografia de cada local
Direção da inclinação	Direção da inclinação do terreno
Inclinação ideal para radiação	Inclinação ideal dos painéis solares
Radiação solar no plano horizontal	Potencial de irradiação solar no plano horizontal
Distância às rodovias	Proximidade às Rodovias
Densidade populacional	Densidade populacional da região
Nível de desenvolvimento econômico	Nível de desenvolvimento econômico da região
Condições das instalações de apoio	Disponibilidade de redes de abastecimento de energia, água, calor e gás-duto no local
Área protegida	Proteção de áreas de preservação ambiental, restrições legais
Área de escritório	Proximidade de centros urbanos
Espaços verdes e instalações paisagísticas	Proximidade de espaços verdes e instalações paisagísticas
Suporte a político	Incentivos e apoios governamentais para instalação da usina
Escopo de construção	Área necessária para construção

Fonte: Adaptado Wang *et al.* (2022)

Quadro 2 – Critérios utilizados no estudo de Wang *et al.* (2022)

Grupo de Critério	Critério	Peso
Fatores naturais	Radiação solar	0,1426
	Temperatura	0,081
	Velocidade do vento	0,0899
	Declive	0,0613
	Direção da inclinação	0,0319
	Inclinação ideal para radiação	0,0809
	Radiação solar no plano horizontal	0,0523
Fatores econômicos	Distância às Rodovias	0,0785
	Densidade populacional	0,032
	Nível de desenvolvimento econômico	0,0353
	Condições das instalações de apoio	0,0176
Fatores sociais	Área protegida	0,1089
	Área de escritório	0,045
	Espaços verdes e instalações paisagísticas	0,0579
	Suporte político	0,0259
	Escopo de construção	0,0593

Fonte: Adaptado Wang *et al.* (2022)

O estudo conclui que o método proposto de análise e avaliação de usinas de energia integradas urbanas é eficaz e pode ser utilizado para selecionar o local mais adequado para a construção dessas usinas. O estudo também destaca a importância de considerar não apenas os fatores técnicos, mas também os fatores socioeconômicos e ambientais na tomada de decisão.

Outro estudo de caso é o de Rediske *et al.* (2020), que tem como objetivo propor um modelo para identificar a melhor localização para implantação de uma usina solar de grande porte (Geração centralizada). Foram identificados os principais fatores a serem considerados na escolha do local adequado, os quais foram combinados com as ferramentas SIG-MCDM. A análise das áreas foi realizada utilizando o software gvSIG e os métodos AHP para ponderação dos fatores e TOPSIS para ordenação das alternativas. Foram identificadas 453 áreas adequadas para a usina. Segundo a classificação adotada, 67,23% dessas áreas são inadequadas, 0,52% são boas, 12,34% são muito boas e apenas 19,91% são excelentes. O quadro 3 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 4 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 3 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Rediske *et al.* (2020)

Critério	Descrição
Capacidade Agrológica	Potencial da área para sustentar atividades agrícolas e produzir cultivos de maneira eficiente
Uso do solo	Tipo de uso atual do solo na área
Distância da Subestação	Distância em km até a subestação de energia mais próxima
Distância das Estradas	Distância em km até a rodovia mais próxima
Distância das Áreas Urbanas	Distância em km até a cidade ou centro urbano mais próximo
Irradiação Solar	Média anual da quantidade de radiação solar incidente na superfície do terreno em kWh/m ² por dia
Inclinação	Ângulo de inclinação do terreno em graus, que influencia na exposição aos raios solares e no escoamento de água

Fonte: Adaptado Rediske *et al.* (2020)

Quadro 4 – Critérios utilizados no estudo de Rediske *et al.* (2020)

Grupo de Critério	Critério	Peso
Ambiental	Capacidade Agrológica	0,16
	Uso do solo	0,13
Localização	Distância da Subestação	0,27
	Distância das Estradas	0,07
	Distância das Áreas Urbanas	0,04
Climático	Irradiação Solar	0,23
Geomorfológica	Inclinação	0,10

Fonte: Adaptado Rediske *et al.* (2020)

O estudo evidencia que a utilização de dados GIS e ferramentas analíticas são fundamentais para o planejamento estratégico e para a otimização de investimentos no setor de energia. A pesquisa apresentou uma abordagem que integra GIS-MCDM, permitindo a identificação de locais promissores para a instalação de usinas solares fotovoltaicas de grande porte.

O estudo de Wang *et al.* (2018) teve como objetivo projetar uma abordagem MCDM para a construção de usinas de energia solar com base em fatores naturais e sociais, os autores apresentam um modelo de tomada de decisão multicritério (MCDM) combinando três metodologias, incluindo fuzzy processo hierárquico analítico (FAHP), análise envoltória de dados (DEA) e a técnica de ordem de preferência por similaridade com a solução ideal (TOPSIS). O estudo considera uma usina de 12 MW, sendo classificada como geração centralizada. O quadro 5 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 6 mostra os grupos de critério o peso de cada critério.

Quadro 5 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Wang *et al.* (2018)

Critério	Descrição
Mecanismos de suporte	Suporte e incentivos
Leis de proteção	Leis de proteção
Conformidade legal e regulamentar	Regulamentação da instalação
Temperatura	Temperatura média em cada localização
Horas de sol	Quantidade de horas de sol diária
Umidade	Umidade
Distância da estrada principal	Distância da estrada principal
Distância da rede elétrica	Distância da rede elétrica
Demanda potencial	Demanda em potencial para venda da energia gerada
Custo de construção	Custo de construção
Custo de operação e gerenciamento	Custo de operação e gerenciamento
Custo do novo alimentador	Custo do novo alimentador
Ecologia	Ecologia do local
Elevação	Grau de inclinação do terreno e forma da superfície da área de implantação
Acessibilidade	Acessibilidade ao local

Fonte: Adaptado Wang *et al.* (2018)Quadro 6 – Critérios utilizados no estudo de Wang *et al.* (2018)

Grupo de Critério	Critério	Peso
Social	Mecanismos de suporte	0,05755
	Leis de proteção	0,02417
	Conformidade legal e regulamentar	0,01522
Ambiental	Temperatura	0,10246
	Horas de sol	0,16264
	Umidade	0,06454
Tecnológico	Distância da estrada principal	0,04624
	Distância da rede elétrica	0,07339
	Demanda potencial	0,1165
Econômico	Custo de construção	0,05346
	Custo de operação e gerenciamento	0,03368
	Custo do novo alimentador	0,08487
Características do local	Ecologia	0,05495
	Elevação	0,02308
	Acessibilidade	0,08723

Fonte: Adaptado Wang *et al.* (2018)

Os resultados do estudo indicam que a abordagem MCDM é uma ferramenta eficaz para a seleção de locais para instalação de usinas de energia solar no Vietnã.

Os resultados mostram que Binh Thuan é o local ideal para construir uma usina de energia solar por ter a maior nota de classificação na fase final deste estudo.

O estudo de Villacreses *et al.* (2022), teve como objetivo avaliar e comparar locais adequados para a instalação de usinas de energia eólica e fotovoltaica nas Ilhas Galápagos, a metodologia multicritério utilizada neste estudo é baseada em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e em métodos de decisão multicritério. A análise combina o uso de Sistemas de Informação Geográfica com os métodos Analytical Hierarchical Processes (AHP) e Ordered Weighted Average (OWA). O estudo considera uma usina de 10 MW, sendo classificada como geração centralizada. Neste estudos não são definidos grupos de critérios, o quadro 7 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 8 mostra o peso de cada critérios.

Quadro 7 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Villacreses *et al.* (2022)

Critério	Descrição
Velocidade do vento	Indica a velocidade média do vento em m/s na área de estudo
Radiação solar global	Indica a radiação solar média em kWh/m ² /dia na área de estudo
Declive	Indica a inclinação do terreno em graus
Distância da subestação	Indica a distância da área de estudo até a subestação de energia mais próxima
Distância da rede rodoviária	Indica a distância da área de estudo até a rodovia mais próxima
Distância da zona urbana	Indica a distância da área de estudo até a zona urbana mais próxima

Fonte: Adaptado Villacreses *et al.* (2022)

Quadro 8 – Critérios utilizados no estudo de Villacreses *et al.* (2022)

Critério	Peso
Velocidade do vento e Radiação solar global	0,092
Declive	0,123
Distância da subestação	0,230
Distância da rede rodoviária	0,354
Distância da zona urbana	0,200

Fonte: Adaptado Villacreses *et al.* (2022)

O estudo considera como critério a velocidade do vento para usinas eólicas e a radiação solar global para usinas solares. Segundo esse estudo, a combinação de tecnologias eólica e solar em um local de alta pontuação seria a opção mais viável para fornecer energia limpa e confiável para as Ilhas Galápagos, ajudando a proteger a biodiversidade e a minimizar a dependência de combustíveis fósseis. O estudo também destacou a importância da avaliação cuidadosa dos critérios relevantes e da aplicação

adequada de ferramentas de MCDM na seleção de locais adequados para a geração de energia renovável.

O estudo de Azevêdo (2016) apresenta dois métodos distintos e macroespaciais para auxiliar a seleção de áreas potenciais para a inserção de usinas solares, as metodologias empregadas são o Método baseado no Processo Analítico Hierárquico (AHP) e o Método do Custo de Produção de Eletricidade. Ambas as metodologias foram aplicadas para Pernambuco, localizado na região Nordeste do Brasil, e considerou a implantação de usinas de coletores parabólicos de 80MW, sendo classificada como geração centralizada. O quadro 9 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 10 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 9 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Azevêdo (2016)

Critério	Descrição
Radiação Solar Direta Normal	Quantidade e qualidade da radiação solar recebida em cada local
Declividade do Terreno	Relevo e inclinação do terreno
Distância aos Recursos Hídricos	Proximidade aos Recursos Hídricos
Distância às Rodovias	Proximidade às Rodovias
Distância às Linhas de Distribuição	Proximidade às Linhas de Distribuição
Distância às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana	Proximidade às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana
Uso e Ocupação do Solo	Tipo de uso do solo na área

Fonte: Adaptado Azevêdo (2016)

Quadro 10 – Critérios utilizados no estudo de Azevêdo (2016)

Grupo de Critério	Critério	Peso
Climático	Radiação Solar Direta Normal	0,22
Topográfico	Declividade do Terreno	0,20
	Distância aos Recursos Hídricos	0,05
Localização	Distância às Rodovias	0,04
	Distância às Linhas de Distribuição	0,07
	Distância às Áreas Urbanas e de Expansão Urbana	0,02
Ambiental	Uso e Ocupação do Solo	0,40

Fonte: Adaptado Azevêdo (2016)

O estudo mostra que Pernambuco apresenta grande potencial para a implantação de usinas solares, principalmente no Sertão Pernambucano, onde foram encontrados os ambientes mais favoráveis à instalação.

O estudo de Tafula *et al.* (2023) propõe um enquadramento espacial para planejamento de energia solar fora da rede com base em um Sistema de Informação Geográfica e lógica booleana, Lógica Fuzzy e Métodos de Tomada de Decisão Multicritério de Processo Analítico de Hierarquia. O estudo leva em consideração uma usina de geração distribuída (entre 4kW e 550 kW). O quadro 11 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 12 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 11 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Tafula *et al.* (2023)

Critério	Descrição
Radiação solar	Quantidade de energia solar disponível na área
Temperatura	Média das temperaturas anuais na área
Umidade relativa	Média das umidades relativas anuais na área
Precipitação	Média das precipitações anuais na área
Velocidade do vento	Média da velocidade do vento anual na área
Declive	Inclinação do terreno em graus
Elevação	Altitude acima do nível do mar
Orientação	Direção em que a área está voltada para o sol
Povoado	Número de pessoas que vivem na área
Densidade populacional	Número de pessoas por unidade de área na região
Estradas	Distância entre a área e a estrada mais próximas
Ferrovias	Distância entre a área e a ferrovia mais próximas
Aeroportos	Distância entre a área e os aeroportos mais próximos
Rede de transmissão de eletricidade	Distância entre a área e a rede de transmissão de eletricidade
Água interior	Distância entre a área e as fontes de água mais próximas
Oportunidades de trabalho	Disponibilidade de trabalho na área
Índice de Desenvolvimento Humano	Medida composta do desenvolvimento humano na área
Justiça energética e equidade	Considerações sobre a distribuição justa da eletricidade
Plano nacional de eletrificação rural	Apoio governamental para a eletrificação rural na área
Política e suporte regulatório	Apoio político e regulatório para o desenvolvimento de micro-redes

Fonte: Adaptado Tafula *et al.* (2023)

Quadro 12 – Critérios utilizados no estudo de Tafula *et al.* (2023)

Grupo de Critério	Critério	Peso Critério
Climático	Radiação Solar	0,264101
	Temperatura	0,101610
	Umidade relativa	0,062783
	Precipitação	0,026589
	Velocidade do vento	0,023916
Orográfico	Declive	0,051316
	Elevação	0,020281
	Orientação	0,216403
Técnico e Localização	Povoado	0,0,37801
	Densidade populacional	0,045767
	Estradas	0,018438
	Ferrovias	0,011986
	Aeroportos	0,008223
	Rede de transmissão de eletricidade	0,002196
	Águas interiores	0,008589
Social	Oportunidades de trabalho	0,011582
	Índice de Desenvolvimento Humano	0,048841
	Justiça energética e equidade	0,004577
Institucional	Plano Nacional de Eletrificação Rural	0,022668
	Política e suporte regulatório	0,011332

Fonte: Adaptado Tafula *et al.* (2023)

Os resultados obtidos com o estudo mostram que a seleção de locais ideais para projetos de microrredes de energia solar fotovoltaica fora da rede em Moçambique é significativamente influenciada pela seguinte ordem de critérios: climatologia, orografia, critérios técnicos e locais, sociais e institucionais. Geograficamente, cerca de 49% (344.664,36 km²) da área total de estudo são considerados inicialmente adequados para um projeto de microrrede de energia solar fotovoltaica fora da rede, enquanto 4% são pouco adequados, 14% são moderadamente adequados, 18% são adequados e 13% são altamente adequados. No entanto, 51% das áreas classificadas como inviáveis e restritas encontram-se principalmente em áreas de conservação, áreas protegidas e áreas de alto risco de inundações e ciclones, cobrindo um total de 387.005,5 km² dentro da área de estudo.

O estudo de Marquesine, Chamma e Batistella (2022) avalia a localização mais adequada para a instalação de uma usina solar centralizada no município de Pato Branco, no sudoeste do Paraná, com potência entre 50 e 100 MW. Foi utilizada uma

metodologia de análise multicritério Analytic Hierarchy Process (AHP) para comparar e avaliar diferentes localizações potenciais com base em critérios técnicos, econômicos e ambientais. A análise foi realizada em quatro etapas: seleção de critérios, obtenção de dados, análise multicritério e análise de sensibilidade. O quadro 13 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 14 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 13 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Marquesine, Chamma e Batistella (2022)

Critério	Descrição
Radiação solar	Intensidade da radiação solar incidente na região
Declive	Relevo e inclinação do terreno
Proximidade aos recursos hídricos	Proximidade aos Recursos Hídricos
Proximidade de rodovias	Proximidade às Rodovias
Proximidade de linhas de transmissão	Distância entre o local da usina fotovoltaica e o ponto de conexão à rede elétrica
Proximidade às Áreas Urbanas	Proximidade às Áreas Urbanas

Fonte: Adaptado Marquesine, Chamma e Batistella (2022)

Quadro 14 – Critérios utilizados no estudo de Marquesine, Chamma e Batistella (2022)

Grupo de Critério	Critério	Peso Critério
Climático	Radiação solar	0,42
Topográfico	Declive	0,24
Infraestrutura	Proximidade aos recursos hídricos	0,16
	Proximidade de rodovias	0,07
	Proximidade de linhas de transmissão	0,04
	Proximidade às Áreas Urbanas	0,07

Fonte: Adaptado Marquesine, Chamma e Batistella (2022)

O estudo identifica áreas mais propícias para a instalação da usina à base de energia solar concentrada, sendo essas majoritariamente próximas aos limites do município, estendendo-se pela extremidade noroeste-sudeste.

O estudo de Türk, Koç e Şahin (2021) analisa possíveis locais para instalação de usinas de energia solar, com aproximadamente 12,5 MW (Geração centralizada), usando um método de mapeamento, GIS, e Intuitionistic Fuzzy é aplicado ao problema para obter áreas ótimas para energia solar. Neste estudos não são definidos grupos de critérios e os pesos não são apresentados. O quadro 15 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições.

Quadro 15 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Türk, Koç e Şahin (2021)

Critério	Descrição
Linha de transmissão	Distância até a linha de transmissão mais próxima
Radiação solar	Quantidade de radiação solar incidente na área
Velocidade do vento	Velocidade média do vento na área
Uso da terra	Tipo de uso da terra na área
Temperatura da superfície	Temperatura média da superfície terrestre na área
Umidade do ar	Umidade média do ar na área
Pressão do ar	Pressão média do ar na área
Temperatura do ar	Temperatura média do ar na área
Aspecto	Orientação da área em relação ao sol
Declive	Inclinação média do terreno na área

Fonte: Adaptado Türk, Koç e Şahin (2021)

O estudo de Mokarram *et al.* (2020) propõe uma estrutura para a determinação da localização ideal para a construção de parques solares fotovoltaicos. Para identificar as áreas mais adequadas para as usinas solares, é utilizado um método fuzzy para homogeneizar os parâmetros de entrada, seguido pelo processo de hierarquia analítica (AHP) e pelos métodos Dempster-Shafer (DS) utilizados de forma independente. O tamanho da usina não é mencionado no resumo do estudo, entretanto pela área utilizada podemos concluir que seria uma usina de geração centralizada. Neste estudos não são definidos grupos de critérios, o quadro 16 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 17 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 16 – Descrição dos critérios utilizados no estudo de Mokarram *et al.* (2020)

Critério	Descrição
Radiação solar	Quantidade de radiação solar disponível na área
Temperatura	Temperatura média na área
Distância até a linha de transmissão de energia	Distância até a linha de transmissão de energia mais próxima
Distância da estrada principal	Distância até a estrada principal mais próxima
Distância até área residencial	Distância até a área residencial mais próxima
Elevação do terreno	Altitude do terreno
Declive de terra	Inclinação do terreno
Uso da terra	Tipo de uso da terra (agricultura, floresta, urbano, etc.)
Número de dias nublados	Frequência de dias nublados na região
Umidade relativa	Umidade do ar na região
Número de dias empoeirados	Frequência de dias com poeira na região

Fonte: Adaptado Mokarram *et al.* (2020)

Quadro 17 – Critérios utilizados no estudo de Mokarram *et al.* (2020)

Critério	Peso Critério
Radiação solar	0,248
Temperatura	0,199
Distância até a linha de transmissão de energia	0,152
Distância da estrada principal	0,114
Distância até área residencial	0,085
Elevação do terreno	0,062
Declive de terra	0,046
Uso da terra	0,034
Número de dias nublados	0,025
Umidade relativa	0,019
Número de dias empoeirados	0,016

Fonte: Adaptado Mokarram *et al.* (2020)

Os resultados indicam que, de acordo com o método fuzz_AHP, 32% da área estudada apresenta alta ou boa aptidão para a instalação de usinas solares.

O estudo de Souza *et al.* (2020) tem o objetivo de identificar o local mais adequado para a instalação de uma usina solar fotovoltaica de grande porte no estado do Rio de Janeiro, Brasil. O estudo utiliza a lógica fuzzy em conjunto com o Sistema de Informações Geográficas (SIG) como metodologia multicritério. Foram estabelecidos critérios principais para avaliação da localização. Neste estudos não são definidos

grupos de critérios, o quadro 18 mostra os critérios utilizados neste estudo e suas descrições, enquanto o quadro 19 mostra os grupos de critério o peso de cada critérios.

Quadro 18 – Descrição dos critérios utilizados no estudo Souza *et al.* (2020)

Critério	Descrição
Radiação solar	Média anual de radiação solar da região
Temperatura média	Temperatura média da região
Inclinação do terreno	Inclinação do terreno para maximização da produção de energia solar
Orientação dos painéis	Orientação dos painéis
Proximidade a Rodovias	Distância até a linha de rodovia mais próxima
Proximidade a Linhas de Transmissão	Distância até a linha de transmissão mais próxima
Proximidade de Centros Urbanos	Distância até o centro urbano mais próximo
Utilização da terra	Fertilidade do solo

Fonte: Adaptado Souza *et al.* (2020)

Quadro 19 – Critérios utilizados no estudo Souza *et al.* (2020)

Critério	Peso Critério
Radiação solar	0,4241
Temperatura média	0,1134
Inclinação do terreno	0,1369
Orientação dos painéis	0,0850
Proximidade a Rodovias	0,0533
Proximidade a Linhas de Transmissão	0,0912
Proximidade de Centros Urbanos	0,0568
Utilização da terra	0,0392

Fonte: Adaptado Souza *et al.* (2020)

A análise foi realizada com o auxílio do software Expert Choice. Ao final do estudo, foi identificada a melhor localização para a instalação da usina solar fotovoltaica, que apresentou a maior pontuação na análise multicritério realizada.

3.3.1.1 Documentos de órgãos governamentais

Em muitos países, os órgãos governamentais responsáveis pela regulamentação e planejamento do setor energético fornecem diretrizes e listam critérios para orientar a decisão de localização de usinas fotovoltaicas. A Eletrobras (2021) apresenta em um documento técnico orientações e procedimentos para a implementação de sistemas de geração de energia solar fotovoltaica em comunidades rurais e isoladas atendidas pelos programas de universalização do acesso à energia elétrica do governo federal.

A Eletrobras (2021) apresenta em um documento que tem como objetivo fornecer orientações técnicas e procedimentos para a implementação de sistemas de

geração de energia solar fotovoltaica em comunidades rurais e isoladas atendidas pelos programas de universalização do acesso à energia elétrica do governo federal.

O referido guia (ELETROBRAS, 2021) traz informações sobre a tecnologia fotovoltaica, dimensionamento e projeto de sistemas solares, instalação, operação e manutenção, além de abordar questões regulatórias e procedimentos para acesso aos programas governamentais. O documento visa, portanto, a orientar os agentes envolvidos nos programas, tais como a Eletrobras, as distribuidoras de energia elétrica e as empresas responsáveis pela instalação dos sistemas fotovoltaicos, a identificar critérios que devam ser considerados na escolha de localização de uma instalação e, assim, garantir a qualidade e a efetividade dos projetos e a satisfação dos beneficiários finais. O documento considera os critérios indicado no quadro 20.

Quadro 20 – Critérios para orientar a escolha de locais de para usinas de geração de energia solar fotovoltaica

Critério	Descrição
Radiação solar	Avaliação da quantidade de radiação solar disponível na região onde será instalada a usina solar fotovoltaica.
Rede elétrica local	Verificação da existência de infraestrutura para conexão do sistema fotovoltaico à rede elétrica local.
Distância subestação	Avaliação da distância entre o local de instalação da usina solar fotovoltaica e a subestação mais próxima.
Viabilidade técnica e econômica	Análise da viabilidade técnica e econômica do projeto de instalação da usina solar fotovoltaica, considerando os custos e o retorno financeiro esperado.
Condições climáticas	Avaliação das condições climáticas da região onde será instalada a usina solar fotovoltaica.
Interconexão	Verificação da possibilidade de interconexão entre os sistemas fotovoltaicos instalados, visando maximizar a eficiência da geração de energia elétrica.

Fonte: Adaptado de Eletrobras (2021)

O guia é voltado aos profissionais responsáveis pelo planejamento e execução de projetos de instalação de sistemas de geração fotovoltaica em comunidades rurais atendidas pelos programas Luz para Todos e Mais Luz para a Amazônia.

Um outro documento que trata desse tema foi elaborado pela ABINEE (2012), com o objetivo de apresentar propostas para incentivar a inserção da energia solar fotovoltaica na matriz elétrica brasileira. Entre as propostas apresentadas, estão a criação de incentivos fiscais para a instalação de sistemas fotovoltaicos, a simplificação dos

processos de licenciamento e outorga para a geração distribuída, o estabelecimento de metas e objetivos para a expansão da energia solar fotovoltaica, e a criação de linhas de financiamento específicas para o setor. O documento também destaca a importância da capacitação de profissionais para a instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos, bem como da realização de estudos técnicos para avaliar a viabilidade de projetos de geração de energia solar (ABINEE, 2012).

O estudo ABINEE (2012) não apresenta uma lista explícita de critérios para instalação de uma usina solar, mas discute diversos aspectos relevantes para a sua implantação e desenvolvimento no Brasil. Dentre os temas abordados no estudo, destacam-se os itens indicados no quadro 21.

Quadro 21 – Itens descritos no estudo de ABINEE (2012)

Item	Descrição
Potencial de geração	Análise do potencial de geração de energia solar no Brasil, considerando a disponibilidade de radiação solar em diferentes regiões do país, e o potencial de geração em usinas de grande porte e em sistemas de geração distribuída.
Viabilidade econômica	Discussão sobre aspectos relacionados aos custos de implantação e operação de usinas solares, incluindo a evolução dos preços dos equipamentos e dos serviços, a disponibilidade de financiamento e incentivos governamentais, e a comparação com outras fontes de geração de energia.
Regulação e incentivos	Proposição de medidas para estimular o desenvolvimento da energia solar no país, como a criação de programas de incentivo e financiamento, a simplificação do processo de conexão à rede elétrica, a revisão de normas e regulamentos para viabilizar a geração distribuída, entre outras.
Desenvolvimento tecnológico	Abordagem de questões relacionadas ao desenvolvimento de tecnologias de geração de energia solar mais eficientes e competitivas, além de temas como armazenamento de energia, integração com outras fontes de geração e gerenciamento da rede elétrica.

Fonte: Adaptado ABINEE (2012)

Embora não apresente uma lista específica de critérios para instalação de usinas solares, ABINEE (2012) oferece uma visão abrangente dos principais aspectos

envolvidos no desenvolvimento da energia solar no Brasil e pode ser útil para orientar a tomada de decisões nesse campo.

3.3.1.2 Outros critérios

Além dos critérios comumente citados nos documentos supracitados, artigos e guias para escolha de localização de usinas solares, outros critérios podem ser considerados no processo de escolha do local para implantação de uma usina solar. Um desses fatores é a presença de nuvens e a nebulosidade, que podem afetar significativamente a geração de energia solar, pois áreas com alta incidência de nuvens e nebulosidade podem ter menor produção de energia solar, o que pode prejudicar a viabilidade econômica da usina (BONKANEY; MADOUGOU; ADAMOU, 2017).

Embora não seja um critério comum para a escolha de localização de usinas solares, o efeito das cargas dinâmicas externas na eficiência estrutural dos painéis solares, é analisado em alguns estudos. Kilikevičius, Čereška e Kilikevičienė (2016) mostram que cargas externas, como ventos, neve e terremotos, podem afetar a integridade estrutural dos painéis solares e levar a falhas precoces. A sujeira acumulada nos painéis solares também é um critério citado por, Said *et al.* (2018), que investigam o efeito da acumulação de poeira em painéis solares e propõem estratégias para mitigar esse efeito. Os resultados mostram que a acumulação de poeira pode ter um impacto significativo na eficiência dos painéis solares, podendo reduzir a eficiência da produção de energia em até 40%. Além disso, os pesquisadores identificaram que a limpeza regular dos painéis solares pode mitigar o efeito da poeira na produção de energia. Outro fator importante na escolha de localização de usinas solares é a poluição atmosférica (KALDELLIS; KOKALA; KAPSALI, 2010). Estudos mostraram que a deposição de poluição do ar nas células solares pode diminuir a eficiência dos painéis solares em até 10%, dependendo do tipo e quantidade de poluentes presentes no ar (KALDELLIS; KOKALA; KAPSALI, 2010).

A presença de pássaros e outros animais é outro ponto pouco citado, segundo o estudo de Upton (2014), a expansão das usinas solares pode representar uma ameaça à conservação das aves e da biodiversidade em geral, especialmente se as usinas são construídas em áreas importantes para a migração de aves ou habitats críticos.

O descomissionamento de painéis fotovoltaicos, é um processo importante e muitas vezes negligenciado na indústria de energia solar. O Descomissionamento refere-se à remoção segura e ambientalmente responsável de painéis solares que atingiram o fim de sua vida útil ou que precisam ser substituídos por tecnologias mais recentes (WECKEND; WADE; HEATH, 2016). Embora os painéis solares sejam projetados para durar décadas, eventualmente chegam ao fim de sua vida útil em tempo menor e é preciso que seja dada uma destinação adequada a esses resíduos. Os painéis solares podem precisar ser removidos precocemente devido a falhas prematuras

ou mudanças nas necessidades da usina (WECKEND; WADE; HEATH, 2016).

O descomissionamento adequado de painéis fotovoltaicos é crucial para evitar impactos ambientais negativos, como a contaminação do solo e da água, isso pode ser especialmente importante em grandes usinas solares, onde há uma grande quantidade de painéis solares que precisam ser desmontados e descartados (WECKEND; WADE; HEATH, 2016). A distância entre a usina solar e o centro de descomissionamento pode afetar o custo do processo de descarte dos painéis solares no final de sua vida útil ou em caso de substituição, se a usina solar estiver localizada muito longe do centro de desmontagem e destinação final, o transporte dos painéis solares pode se tornar caro e difícil, aumentando assim o custo geral do processo de descomissionamento (WECKEND; WADE; HEATH, 2016).

Os estudos de localização supracitados utilizam em, em sua maioria, uma estrutura de critérios baseada no AHP, embora utilizem outros métodos, como TOPSIS, DEA, etc, em conjunto com o AHP, todos apresentam um modelo hierárquico.

3.3.2 Identificação de alternativas potenciais

A etapa de identificação de alternativas potenciais envolve a avaliação de diferentes áreas ou locais que podem ser adequados para a instalação de uma usina solar. Essa análise é essencial, pois em alguns casos podem existir elementos restritivos que impedem a implantação da usina em determinadas regiões.

Ao identificar e avaliar várias alternativas, é possível contornar esses elementos restritivos e encontrar locais que atendam aos critérios desejados. Alguns desses elementos restritivos podem incluir restrições legais, como zonas de proteção ambiental ou áreas de preservação, limitações de uso do solo, restrições de infraestrutura, restrições políticas ou outros fatores que possam inviabilizar a instalação da usina em determinadas áreas.

Portanto, a identificação de alternativas potenciais garante que o estudo considere diversas opções viáveis, permitindo que sejam avaliadas as melhores soluções disponíveis. Isso aumenta as chances de encontrar um local adequado, que atenda aos requisitos técnicos, legais e ambientais, e que seja economicamente viável para a implantação da usina solar.

3.3.3 Atores

A tomada de decisão envolve várias pessoas, chamadas de atores ou stakeholders, que têm diferentes níveis de influência no processo, alguns atores, como facilitadores e decisores, agem diretamente na tomada de decisão, enquanto outros, chamados de agidos, sofrem as consequências da decisão, mesmo sem participar do processo (DETONI *et al.*, 1996). Para Haan e Heer (2012) os atores são todos

os grupos de pessoas ou organizações que podem impactar ou ser impactado pelas decisões.

Uma perspectiva ou ponto de vista é fundamental para avaliar uma situação existente ou para criar um modelo de avaliação, ele representa todos os aspectos da realidade decisória percebidos como importantes, esses aspectos são influenciados pelo sistema de valores e/ou estratégia de intervenção de um ator no processo de decisão, cada ponto de vista agrupa elementos primários que interferem de forma indissociável na formação das preferências deste ator, dessa forma, cada ator pode ter um ponto de vista diferente, dependendo das suas crenças, valores, interesses e objetivos, é importante considerar essas diferentes perspectivas ao avaliar um projeto ou tomar uma decisão, a fim de garantir que os interesses de todos os envolvidos sejam considerados de maneira justa e equilibrada (BANA E COSTA, 1993).

Existem grupos de atores em projetos de energias renováveis, Rio e Burguillo (2009) destaca os seguintes:

- Agentes institucionais, que é composto pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), Câmara de Comercialização de Energia (CCEE), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério Público (MP), Operador Nacional do Sistema Financeiro (ONS) e Órgãos de Licenciamento Ambientais;
- Organizações não governamentais, composto por ONGs Ligadas à causa de Proteção Ambiental;
- O grupo de bancos e investidores é composto por Banco Nacional de Desenvolvimento (BNDES) e Bancos Regionais de Desenvolvimento;
- O grupo de consumidores, composto pelas indústrias e toda a população que vai utilizar a energia;
- O grupo dos fornecedores do setor, que é composto por Consultorias ambientais, Construtoras civis e Fabricantes de peças e equipamentos.

4 DESENVOLVIMENTO

4.1 ANÁLISE DOS CRITÉRIOS

Durante a análise dos estudos sobre a localização de usinas fotovoltaicas, foi adotada uma abordagem criteriosa para a seleção dos critérios utilizados neste estudo. Foi estabelecido como critério mínimo de inclusão aqueles que apareceram em pelo menos dois estudos diferentes e com pesos superiores a 0,09. Essa escolha teve como objetivo garantir a representatividade e a robustez dos critérios selecionados, uma vez que sua recorrência em diferentes estudos indica sua importância na tomada de decisão sobre a localização das usinas solares.

Ao considerar apenas os critérios que apareceram em dois estudos ou mais e possuíam um peso superior a 0,09 nos estudos, evitou-se a inclusão de critérios específicos de um único estudo, que poderiam estar mais relacionados a um contexto particular ou a uma abordagem específica. Essa abordagem visa garantir uma visão mais abrangente e generalizável dos critérios relevantes para a seleção da localização de usinas fotovoltaicas.

A inclusão de critérios presentes em múltiplos estudos e com pesos superiores a 0,09 permite identificar aqueles que são mais recorrentes e amplamente aceitos pela comunidade acadêmica e profissional. Dessa forma, o estudo se baseia em critérios que têm uma maior base de evidências e consenso em relação à sua importância na escolha da localização das usinas solares.

Foi observado que diferentes autores utilizam critérios similares, porém com nomenclaturas distintas. Ao agrupar os critérios por sua descrição, foi possível evitar a duplicidade de critérios com nomes distintos, facilitando a compreensão e a análise dos resultados. Essa padronização dos critérios contribui para uma maior consistência e clareza na discussão dos resultados obtidos.

Portanto, a seleção dos critérios utilizados neste estudo foi baseada em uma análise da literatura existente, buscando uma representatividade dos critérios mais mencionados e evitando a inclusão de critérios específicos de estudos isolados. O quadro 22 apresenta os critérios citados nos artigos e documentos governamentais que serão utilizados neste estudo.

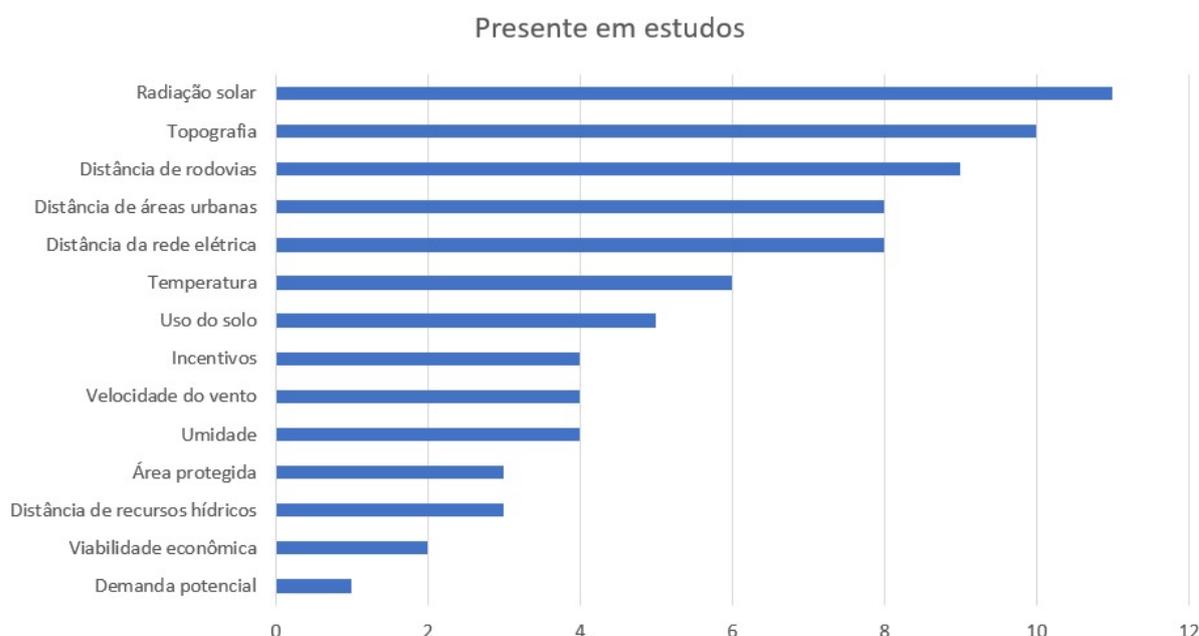
Quadro 22 – Lista de critérios

	Nacional x Internacional	Geração Centralizada x Distribuída	Estudos	Critério													
				Radiação solar	Temperatura	Umidade	Velocidade do vento	Topografia	Distância de rodovias	Distância da rede elétrica	Distância de áreas urbanas	Distância de recursos hídricos	Área protegida	Incentivos	Uso do solo	Demanda potencial	Viabilidade econômica
Artigos	I	GC	Yongli Wang et al. (2022)	x	x		x	x	x		x		x	x			
	I	GC	Chia-Nan Wang et al. (2018)		x	x		x	x	x			x	x		x	
	I	GC	Villacreses et al. (2022)	x			x	x	x	x	x						
	I	GC	Türk et al. (2021)	x	x	x	x	x		x					x		
	I	GC	Mokarram et al. (2020)	x	x	x		x	x	x	x				x		
	I	GD	Tafula et al. (2023)	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x			
	N	GC	Rediske et al. (2020)	x				x	x	x	x		x		x		
	N	GC	Azevedo (2016)	x				x	x		x	x			x		
	N	GC	Marquesine et al. (2022)	x				x	x	x	x	x					
Documentos governamentais			Souza et al. (2020)	x	x			x	x	x	x				x		
			Eletrobras (2021)	x													x
			ABINEE (2012)	x										x			x

Fonte: Autor

A figura 7 apresenta um histograma com os dados referentes aos critérios mais citados nos estudos.

Figura 7 – Critérios mais citados nos estudos.



Fonte: Autor

OS métodos desempenham um papel fundamental na análise e tomada de decisões em estudos multicritério, fornecendo abordagens sistemáticas e quantitativas

para lidar com diferentes critérios e avaliar alternativas. O quadro 23 mostra os métodos utilizados nos estudos.

Quadro 23 – Métodos utilizados

Método	Frequência da utilização
SIG	4
TOPSIS	3
AHP	6
fuzzy	5
DEA	1
OWA	1
GIS	1
DS	1

Fonte: Autor

Destaca-se que alguns desses métodos foram utilizados em conjunto nos estudos analisados, demonstrando a importância de abordagens integradas e complementares na análise multicritério. Por exemplo, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) foi amplamente utilizado em combinação com outros métodos, como o TOPSIS, o AHP e o fuzzy. Essa combinação permitiu a consideração de aspectos espaciais e geográficos, juntamente com a análise multicritério, enriquecendo a avaliação e a tomada de decisões.

O uso do TOPSIS e do AHP em conjunto também foi observado em alguns estudos, aproveitando as vantagens de cada método. Enquanto o TOPSIS fornece uma abordagem para classificar alternativas com base em critérios ponderados, o AHP permite a determinação desses pesos por meio de análise hierárquica. Essa abordagem híbrida oferece uma estrutura sólida para a avaliação multicritério, considerando tanto a classificação das alternativas quanto a definição dos pesos dos critérios.

Além disso, outros métodos, como DEA (Análise Envoltória de Dados), OWA (Agregação Ordenada Ponderada) e DS (Sistema Dinâmico), também foram utilizados, embora com menor frequência. Cada um desses métodos possui suas características e aplicações específicas, contribuindo para a diversidade e a robustez das análises realizadas nos estudos.

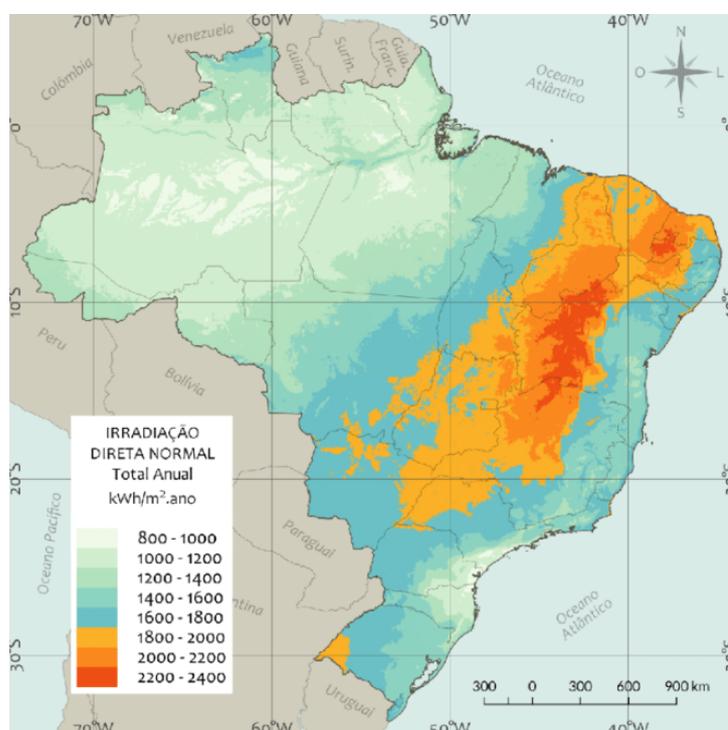
Para analisar os critérios identificados nos estudos, será utilizado a base de dados da ANEEL, incluindo mapas de usinas instaladas de geração centralizada (ANEEL, 2023b) e distribuída (ANEEL, 2023a). afim de validar se os critérios citados estão sendo efetivamente aplicados na prática.

4.1.1 Irradiação solar

A irradiação solar, é um critério citado como fundamental para o bom desempenho da usina fotovoltaica. Arnette e Zobel (2011) afirmam que quanto maior a irradiação

solar em uma determinada área, maior será o potencial de geração de energia elétrica por meio de sistemas fotovoltaicos. A unidade de medida comumente utilizada para a irradiação solar é o watt por metro quadrado (W/m^2), medida que indica a quantidade de energia solar incidente em uma determinada área durante um determinado período de tempo. Embora haja uma forte correlação entre a intensidade da irradiação solar e a geração de energia fotovoltaica, ao comparar o mapa de irradiação solar no país, indicado na figura 8, com o mapa das usinas de geração centralizada em operação, indicado na figura 9, é possível perceber que muitas usinas não estão localizadas nas áreas com maior potencial de geração de energia solar.

Figura 8 – Mapa de irradiação solar no Brasil



Fonte: Pereira *et al.* (2017)

Figura 9 – Mapa de usinas instaladas de geração centralizada no Brasil



Fonte: ANEEL (2023b)

Entretanto se considerar apenas as nove maiores usinas, que de acordo com Solar (2023) são:

- Usina solar São Gonçalo em São Gonçalo do Gurguéia, PI, com 475 MW;
- Usina solar Pirapora em Pirapora, MG, 321 MW;
- Usina solar Nova Olinda em Ribeira do Piauí, PI, com 292 MW;
- Parque solar Ituverava na Bahia, BA, com 292 MW;
- Complexo solar Lapa em Bom Jesus da Lapa, BA, com 168 MW;
- Central Fotovoltaica Juazeiro Solar em Juazeiro, BA, com 156 MW;
- Usina solar Guaimbê em Guaimbê, SP, com 150 MW;
- Usina solar Apodi em Quixeré, CE, com 132 MW;
- Parque solar Paracatu em Paracatu, MG, com 132 MW;

A figura 8 ilustra a localização das nove maiores usinas instaladas no Brasil.

Figura 10 – Mapa da localização das nove maiores usinas do Brasil



Fonte: Autor

Pode-se perceber que todas se encontram nas áreas com maior irradiação solar. Isso sugere que a relevância desse critério pode variar de acordo com o tamanho da usina, pois mesmo sendo classificada como geração centralizada o seu tamanho pode variar bastante, visto que a classificação de usinas de geração centralizada completa as usinas com potência maior que 5 MW e na relação das 9 maiores usinas as potências são maiores que 100 MW.

Por outro lado, no caso da geração distribuída, ao comparar o mapa de irradiação solar, indicado na figura 8, com o mapa de usinas de geração distribuída instaladas nos Brasil, indicado na figura 11, é possível perceber que não há uma relação direta entre a irradiação solar e as usinas instaladas, isso indica que outros fatores podem ter maior relevância na escolha da localização deste tipo de usina.

Figura 11 – Mapa de usinas instaladas de geração distribuída no Brasil



Fonte: ANEEL (2023a)

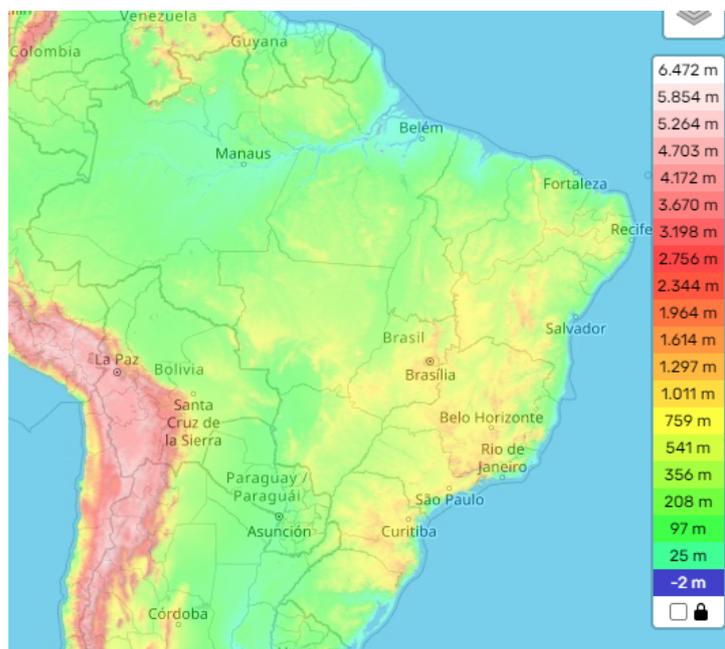
Uma característica da geração distribuída é que ela permite a instalação de usinas solares em praticamente todas as regiões do Brasil, independentemente do nível de irradiação solar. Isso ocorre porque essas usinas são instaladas próximas ao local de consumo, o que reduz as perdas na transmissão de energia elétrica e aumenta a eficiência do sistema como um todo. Dessa forma, mesmo em regiões com menor irradiação solar, é possível aproveitar a energia solar como fonte de energia limpa e renovável. Isso indica que a escolha da localização das usinas solares não é determinada exclusivamente pelo potencial de irradiação solar. Existem outros critérios com maior relevância.

4.1.2 Topografia

A topografia do terreno tem um impacto direto nos custos de preparação e nivelamento do terreno na instalação de uma usina, o terreno deve ter pequena inclinação, o suficiente para permitir uma drenagem natural, além disso, é importante também que morros, árvores ou torres não obstruam o campo dos coletores solares em ângulos visuais superiores a 10° (TIBA *et al.*, 2014). A topografia é geralmente descrita em termos de altitudes, elevações e declividades, que são expressas em metros. Ao se comparar o mapa de usinas de geração centralizada instaladas no Brasil, indicado na figura 9, com o mapa topográfico brasileiro, indicado na figura 12, pode-se observar que a maioria delas está concentrada em regiões com baixo relevo, enquanto em áreas com topografia mais acidentada a presença de usinas é menor. Por outro lado, no caso da geração distribuída, ao se comparar o mapa de usinas de geração dis-

tribuída, indicado na figura 11, com o mapa topográfico brasileiro, indicado na figura 12, não é possível identificar uma relação direta entre a localização das usinas e a topografia, uma vez que elas podem ser instaladas em diversos tipos de edificações, independente da topografia da região.

Figura 12 – Mapa topográfico brasileiro



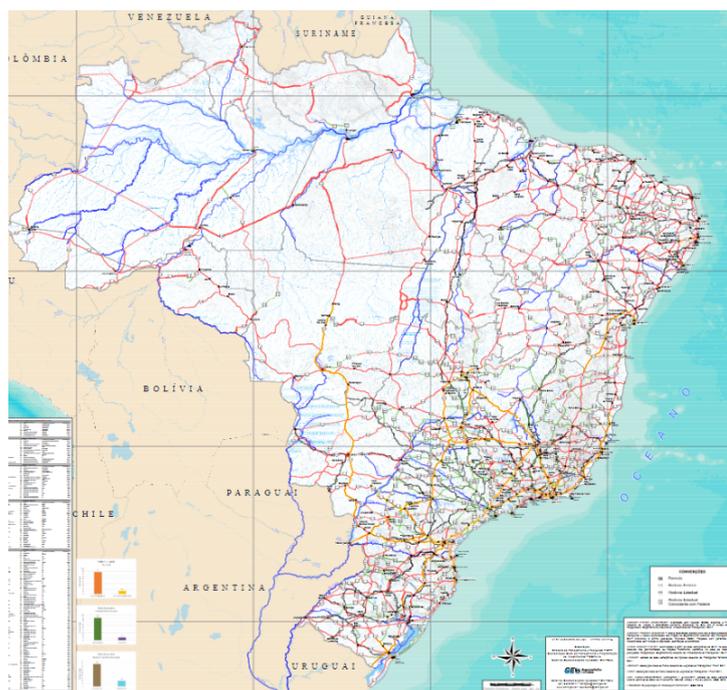
Fonte: Topographic (2023)

No caso da geração centralizada, há uma preferência de instalação de usinas em regiões com baixo relevo, indicando relevância para este critério. No caso da geração distribuída, a topografia não é um fator determinante, outros critérios têm maior influência na escolha da localização dessas usinas.

4.1.3 Distância de rodovias

A distância da usina até as rodovias, medida em quilômetro (km), é um critério considerado, especialmente no caso em que haja necessidade de transportar grande volume de equipamentos de grande porte e frágeis, como os painéis solares utilizados em projetos de geração centralizada. Dessa forma, a proximidade do local de implantação da usina às vias de acesso pode influenciar significativamente o custo geral do empreendimento (AZEVEDO, 2016). Ao se comparar o mapa de usinas de geração centralizada, indicado na figura 9, e o mapa de usinas de geração distribuída, indicado na figura 11, com mapa rodoviário brasileiro, indicado figura 13, fica evidente a proximidade das usinas de geração centralizada e distribuída com as vias de transporte terrestre.

Figura 13 – Mapa rodoviário brasileiro



Fonte: Infraestrutura (2023)

Portanto, é possível perceber que a localização das usinas de geração centralizada e distribuída próxima às rodovias é estratégica e facilita tanto a construção e manutenção das usinas quanto o escoamento da energia elétrica produzida. A infraestrutura rodoviária desempenha um papel importante na viabilização e operacionalização desses projetos de energia solar no Brasil. Indicando relevância para este critério para usinas de geração centralizada. Para usinas de geração distribuída, mesmo sendo possível observar uma relação entre as rodovias e as usinas instaladas o volume a ser transportado é significativamente menor, e por estarem geralmente mais próximas a áreas urbanas o acesso a localização é facilitado, sendo assim este critério não apresenta relevância para usinas de geração distribuída.

4.1.4 Distância de áreas urbanas

A distância de centros urbanos, medida em quilômetro (km), é um ponto importante a ser analisado, Wang *et al.* (2022) afirmam que, durante a construção da usina, existem problemas, tais como o tráfego, a ocupação de terrenos públicos e o impacto na vida laboral da população local. A seleção de um local afastado da área de escritórios pode reduzir o número de protestos públicos, reclamações e outros incidentes causados pela construção, além de melhorar o apoio público para a estação de energia integrada. Ao comparar o mapa densidade demográfica, apresentado na figura 14, com o mapa de usinas de geração distribuída, indicado na figura 11, é possível notar que a maior concentração de usinas está presente nas regiões com maior densidade popula-

cional. No caso da geração centralizada, ao comparar o mapa densidade demográfica, apresentado na figura 14, com o mapa de usina centralizadas, indicado na figura 9, a maior concentração de usinas se encontra em regiões com menor densidade.

Figura 14 – Densidade demográfica



Fonte: IBGE (2010a)

Dessa forma, é possível observar que a localização das usinas de geração distribuída está diretamente relacionada à densidade populacional. Para usinas de geração distribuída, apesar da relação, este critério ela se enquadra como uma consequência e não como um critérios de escolha pois em áreas urbanas densamente povoadas, é possível aproveitar melhor os espaços disponíveis, como telhados de edifícios e estacionamentos, para a instalação de painéis solares. Já a geração centralizada tende a se concentrar em regiões menos densamente povoadas, onde há disponibilidade de terrenos e espaço para a construção de usinas solares de maior porte, afastada dos centros urbanos para evitar problemas nas fase de construção.

4.1.5 Distância da rede elétrica

A conexão com a rede elétrica, medida em quilômetro (km), é um fator fundamental para o transporte da energia elétrica gerada pela usina solar até os centros de consumo. Como os custos de construção de novas linhas de distribuição são geralmente elevados, é necessário que a usina solar seja instalada o mais próximo possível das linhas já existentes, desde que estas apresentem capacidade de carga adequada, nesse sentido, a viabilidade do local para instalação da usina é avaliada de acordo com a proximidade entre a usina solar e as linhas de distribuição existentes, quanto maior a distância entre a usina solar e as linhas de distribuição, menos adequada é a área para a implantação de projetos (AZEVEDO, 2016). Realizando uma comparação dos mapas

de usinas instaladas, indicados nas figuras 9 e 11, com o mapa das principais linha de transmissão, indicado na figura 15, nota-se que todas as usinas estão localizadas próximas a uma linha de transmissão.

Figura 15 – Mapa principais linhas de transmissão



Fonte: Eletrobras (2018)

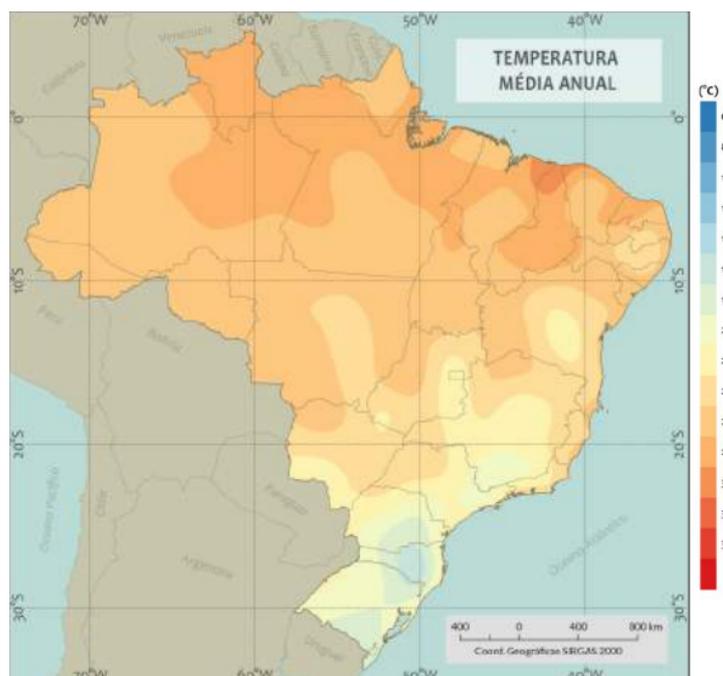
A localização estratégica das usinas de geração centralizada próxima às linhas de transmissão é crucial para garantir a viabilidade e a eficiência do sistema elétrico. Essa proximidade facilita o escoamento da energia gerada, assegurando o suprimento energético de forma adequada e sustentável. Sendo assim um critério relevante para usinas de geração centralizada. As usinas de geração distribuída exigem muito menos da rede por serem menores e tem o principal objetivo atender uma demanda local, este critério apresenta uma relevância reduzida para usinas de geração distribuída.

4.1.6 Temperatura

Wang *et al.* (2022) apontam que a temperatura ambiente exerce um impacto na quantidade de eletricidade gerada pelos equipamentos fotovoltaicos, em células solares de silício, por exemplo, a potência de saída é inversamente proporcional à temperatura, ou seja, quanto mais alta a temperatura, menor será a potência gerada, a cada aumento de 1 °C na temperatura ambiente, a taxa de perda da potência de pico da célula solar varia de 0,35% a 0,45%. Adicionalmente, um aumento na temperatura pode levar a uma degradação severa no desempenho da bateria solar (WANG, *et al.*, 2022). A unidade de medida mais comumente utilizada para representar a temperatura é o grau Celsius (°C).

Ao realizar um comparativo dos mapas de usinas instaladas, indicados nas figuras 9 e 11, com o mapa da temperatura média anual, apresentado na figura 16, É possível observar que a maior concentração das usinas de geração centralizadas estão localizadas em regiões com temperaturas entre 24° e 28°. Já para as usinas de geração distribuída, existem instalações em todas as faixas de temperatura, não havendo uma relação forte entre este critério e a localização das usinas.

Figura 16 – Mapa da temperatura media anual no Brasil



Fonte: Pereira *et al.* (2017)

Embora a temperatura média anual possa ter relevância na localização das usinas de geração centralizada, sua relevância na escolha dos locais para usinas de geração distribuída parece ser menos significativa.

4.1.7 Uso do solo

O uso da terra está relacionado a aptidão agrícola do solo, uma vez que solos com alta aptidão agrícola possuem maior potencial para serem utilizados na agricultura de forma mais eficiente (AZEVEDO, 2016). A unidade de medida mais comumente utilizada para medir a fertilidade do solo é a porcentagem. Geralmente, são realizadas análises de laboratório para determinar os níveis de nutrientes e outros componentes importantes no solo, como nitrogênio, fósforo, potássio, pH, matéria orgânica, entre outros.

Ao realizar um comparativo dos mapas de usinas instaladas indicados nas figuras 9 e 11, com mapa da potencialidade agrícola natural das terras apresentado na figura 17, É possível observar que a maior concentração de usinas de geração

centralizada está localizada em áreas classificadas como restritas ao desenvolvimento agrícola.

Figura 17 – Mapa da potencialidade agrícola natural das terras do Brasil



Fonte: IBGE (2010b)

A instalação de usinas solares em áreas com grande potencial agrícola pode gerar conflitos de uso do solo, já que essas áreas podem ser usadas para a produção de alimentos e outros cultivos. Além disso, a instalação de uma usina solar requer a remoção da cobertura vegetal, o que pode levar à erosão do solo e à degradação ambiental. Portanto este critério apresenta relevância para usina de geração centralizada.

Este critério pode ser considerado um custo de oportunidade, pois a escolha de utilizar um determinado local para a instalação de uma usina solar implica em renunciar ao potencial aproveitamento agrícola desse solo. Quando o solo apresenta um alto potencial agrícola, é mais indicado direcionar investimentos nessa área, o que torna o critério restritivo para a escolha da localização da usina solar. Sendo assim este deve ser considerado como uma restrição ao invés de um critério de avaliação.

4.1.8 Incentivos

Existem diversas formas pelas quais o governo pode incentivar a instalação de usinas solares, tais como: Políticas fiscais; Tarifas de energia; Leilões de energia; Linhas de financiamento; Regulamentação ambiental; Programas de incentivo. Os incentivos podem tornar a implantação de uma usina viável do ponto de vista financeiro (AZEVEDO, 2016). Outro ponto de incentivo indicado por Wang *et al.* (2022) é que as instalações de apoio disponham de infraestrutura completa, com redes de abastecimento de energia, água, calor e gasoduto, a presença dessas facilidades no local de instalação da usina reduz significativamente os custos de construção e investimento e assegura o desempenho da central no longo prazo.

Os incentivos do governo desempenham um papel fundamental na viabilização de projetos de usinas solares, ao oferecer estímulos econômicos e regulatórios. Esses incentivos têm o objetivo de impulsionar o desenvolvimento de energias renováveis e reduzir a dependência de fontes de energia não renováveis, como os combustíveis fósseis. Sendo assim, um critério com relevância para usinas de geração centralizada e distribuída. Aqui estão algumas formas como os incentivos governamentais podem tornar um projeto de usina solar viável:

- Incentivos financeiros: O governo pode oferecer subsídios, financiamentos em condições favoráveis, isenção ou redução de impostos e tarifas para facilitar o acesso a recursos financeiros e reduzir os custos iniciais do projeto. Esses incentivos ajudam a diminuir o tempo de retorno do investimento e melhoram a atratividade econômica do projeto;
- Políticas de suporte: O governo pode implementar políticas e regulamentações que favoreçam o desenvolvimento da energia solar, como a obrigatoriedade de cotas de energia renovável, tarifas de energia incentivadoras que garantem preços de compra favoráveis para a energia solar produzida e regras que facilitam a conexão da usina solar à rede elétrica;
- Desburocratização e simplificação de processos: O governo pode agilizar e simplificar os processos de licenciamento, autorização e conexão à rede elétrica para projetos de energia solar, reduzindo a burocracia e os custos administrativos.

Um exemplo significativo de incentivo à geração distribuída de energia solar foi o Projeto Bônus Fotovoltaico, implementado em Santa Catarina no ano de 2017. O Projeto Bônus Fotovoltaico foi uma iniciativa do Programa Eficiência Energética da Celesc em parceria com a ENGIE Geração de Energia Fotovoltaica, com o objetivo de incentivar a geração de energia elétrica por meio da instalação de sistemas fotovoltaicos em residências unifamiliares, além de promover a eficiência energética e combater o desperdício de energia elétrica (ANTONIOLLI *et al.*, 2020). Inicialmente,

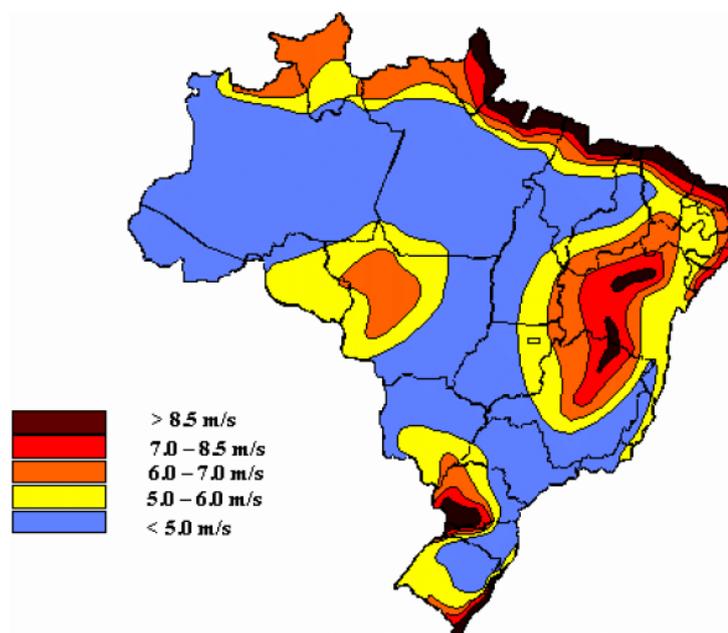
o projeto previa a instalação de 1.000 sistemas, porém, devido à grande aceitação e à viabilização econômica da expansão, foram instalados 1.250 sistemas idênticos de produção de energia elétrica, o projeto tinha como propósito viabilizar a instalação de kits fotovoltaicos de 2,6 kWp em unidades consumidoras residenciais e beneficiar os participantes com um bônus de 60% do valor total do custo de aquisição de um sistema fotovoltaico em relação ao preço de mercado, além disso, o projeto visou incentivar o consumidor a gerar energia através de fontes renováveis e fornecer o excedente da energia não utilizada pela residência para a rede de distribuição, incrementando a geração distribuída (ANTONIOLLI *et al.*, 2020). Os projetos de incentivo podem aumentar a conscientização das pessoas sobre os benefícios da energia solar. Com a realização desses projetos, mais pessoas podem se tornar conscientes das vantagens ambientais e econômicas da energia solar e se interessar por aderir à tecnologia.

4.1.9 Velocidade do vento

De acordo com Türk, Koç e Şahin (2021) a velocidade do vento é um dos aspectos mais significativos para reduzir a temperatura dos painéis solares. Já Tafula *et al.* (2023) indica que além de resfriar os painéis solares a a velocidade do vento também auxilia a limpar e evitar a poeira nos painéis solares, aumentando assim o desempenho dos sistemas fotovoltaicos. A unidade de medida mais comum para a velocidade do vento é o metro por segundo (m/s). Essa medida indica a distância percorrida pelo ar em um segundo.

Ao comparar os mapas de usinas instaladas, indicados nas figuras 9 e 11, com o mapa da velocidade média do vento, apresentados na figura 18, é possível observar que não há um padrão claro em relação à velocidade do vento.

Figura 18 – Mapa da velocidade média do vento no Brasil



Fonte: Samuel Neto (2005)

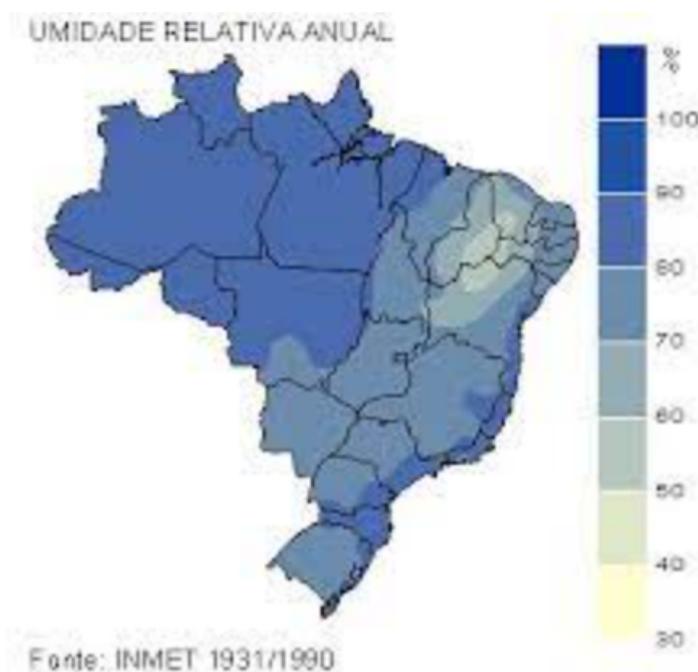
Portanto, a velocidade do vento pode não ser um fator relevante na localização das usinas, sendo que outros critérios podem ter maior peso na decisão, tornando a velocidade do vento menos determinante.

4.1.10 Umidade

De acordo com Tafula *et al.* (2023) quando há excesso de umidade, pode haver infiltração nas células fotovoltaicas através de rachaduras, o que resulta em perda de energia da radiação solar e redução na produtividade da célula solar devido à absorção ou reflexão pela camada de água. A umidade relativa do ar é comumente expressa em porcentagem (%). É uma medida que indica a quantidade de vapor de água presente no ar em relação à quantidade máxima que o ar poderia conter na mesma temperatura.

Ao realizar uma comparação dos mapas de usinas instaladas, indicados nas figuras 9 e 11, com o mapa de umidade relativa no Brasil, apresentado na figura 19, não fica evidente uma relação entre a localização da usina e a umidade.

Figura 19 – Mapa de unidade relativa no Brasil



Fonte: Mota *et al.* (2007)

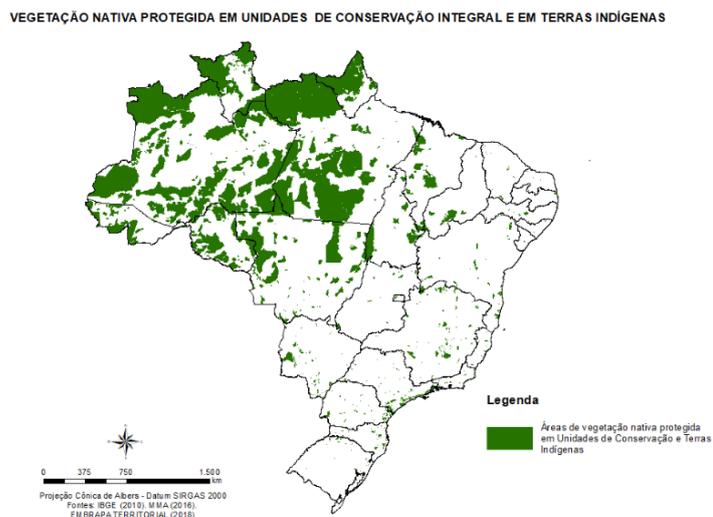
Portanto, a umidade pode não ser um fator relevante na localização das usinas, sendo que outros critérios podem ter maior peso na decisão, tornando a velocidade do vento menos determinante.

4.1.11 Área protegida

A área do local proposto deve evitar áreas cênicas e áreas protegidas tanto quanto possível para reduzir os danos ao ambiente natural e o impacto da biodiversidade. A instalação da usina pode ter um certo efeito destrutivo no ecossistema local, devendo ser mantido a uma certa distância de áreas cênicas e áreas protegidas no processo de planejamento do local (WANG, *et al.*, 2022).

Ao comparar o mapa de áreas protegidas no Brasil, indicado na figura 20, com os mapas das usinas de geração centralizada e distribuída, indicados nas figuras 9 e 11, fica evidente que embora muitas usinas estejam localizadas em proximidade dessas áreas, não há usinas instaladas dentro das próprias áreas protegidas. Isso ocorre porque as áreas protegidas são delimitadas e destinadas à conservação da biodiversidade e dos ecossistemas, sendo restritas para a instalação de usinas e outros empreendimentos devido às questões ambientais envolvidas. É importante ressaltar que mesmo nas áreas próximas às áreas protegidas, a instalação de usinas solares devem seguir diretrizes para minimizar os possíveis impactos e garantir a sustentabilidade do empreendimento. Sendo este critério um fator restritivo para a instalação das usinas.

Figura 20 – Mapa de áreas protegidas no Brasil



Fonte: Embrapa (2018)

Quando a área tem alguma restrição ambiental que restringe a instalação de empreendimentos ela não é uma alternativa possível para escolha, o que torna o critério restritivo para a escolha da localização da usina solar. Sendo assim este deve ser considerado como uma restrição ao invés de um critério de avaliação.

4.1.12 Distância de recursos hídricos

A presença de recurso hídrico é um critério técnico relevante em usinas de geração centralizada e distribuída. A limpeza regular dos painéis solares é fundamental para o bom desempenho dos equipamentos, e a água é um recurso essencial para essa manutenção (TAFULA *et al.*, 2023). Essa distância da usina até o recurso hídrico mais próximo pode ser medida em quilômetro (km).

É possível observar na figura 21, que o Brasil é um país com abundância de recursos hídricos. Possui uma extensa rede de rios, lagos e aquíferos. Essa riqueza hídrica desempenha um papel crucial tanto na oferta de água para consumo humano e uso industrial, quanto na geração de energia elétrica por meio de usinas hidrelétricas. O país é atravessado por grandes bacias hidrográficas, como a Bacia Amazônica, a Bacia do São Francisco, a Bacia do Paraná e a Bacia do Rio Tocantins, que abrangem uma vasta extensão territorial.

Ao comparar os mapas dos recursos hídricos no Brasil, indicado na figura 21, com os mapas das usinas, indicados nas figuras 9 e 11, é possível observar que a maioria das usinas está localizada próxima aos recursos hídricos. Isso se deve à abundância de recursos hídricos por todo o território brasileiro.

Figura 21 – Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil



Fonte: ANA (2006)

Para usinas de geração centralizada, a proximidade dos recursos necessários para a limpeza dos módulos fotovoltaicos pode desempenhar um papel relevante, facilitando o processo de manutenção e garantindo a eficiência do sistema. No entanto, para usinas de geração distribuída, esse critério pode ter menos relevância devido ao menor volume de módulos envolvidos. Em muitos casos, a limpeza dos módulos pode ser realizada de forma adequada com recursos disponíveis localmente, como a água da chuva.

4.1.13 Demanda potencial

A demanda potencial refere-se à quantidade de energia que os consumidores estão dispostos a adquirir em determinada área. Avaliar a demanda potencial permite identificar se existe um mercado viável e sustentável para o consumo de energia. Ao analisar a demanda potencial, é possível verificar se há um número suficiente de consumidores interessados, se há espaço para crescimento e se o mercado é lucrativo.

Para usinas de geração centralizada, a avaliação da demanda potencial é um critério relevante, uma vez que o objetivo principal é a comercialização da energia gerada. Nesse contexto, é fundamental analisar a demanda do mercado e identificar potenciais compradores para garantir a viabilidade e o sucesso do projeto. Compreender a demanda potencial permite dimensionar a capacidade de geração da usina de forma adequada e estabelecer contratos de venda de energia a longo prazo.

Por outro lado, para usinas de geração distribuída, em que a energia é destinada

ao consumo próprio, o critério da demanda potencial não é tão relevante. Nessas usinas, o foco está na geração de energia para suprir as necessidades da própria instalação, como residências, empresas, propriedades rurais, entre outros. Nesse caso, a avaliação da demanda é mais direcionada aos consumidores específicos que serão atendidos pela usina, levando em consideração suas necessidades energéticas e a viabilidade econômica dessa modalidade de geração.

4.1.14 Viabilidade econômica

A viabilidade econômica desempenha um papel crucial na implantação de uma usina solar. Ela se refere à capacidade de gerar receitas suficientes para cobrir os custos e gerar lucro a longo prazo. Para avaliar a viabilidade econômica de um projeto, é necessário realizar uma análise financeira que considere os investimentos necessários, os custos operacionais, as receitas esperadas e o tempo de retorno do investimento. A viabilidade econômica é geralmente expressa em termos financeiros, utilizando-se métricas e indicadores financeiros para avaliar a rentabilidade e o retorno de um projeto ou investimento.

A importância da viabilidade econômica está relacionada a vários fatores. Em primeiro lugar, um projeto viável economicamente é atraente para investidores, pois oferece a perspectiva de retornos financeiros sólidos e sustentáveis ao longo do tempo. Isso contribui para a atração de capital necessário para financiar o projeto.

Além disso, a viabilidade econômica é um aspecto fundamental para a sustentabilidade do empreendimento. Uma usina solar que seja economicamente viável tem maior probabilidade de ser bem-sucedida a longo prazo, pois poderá cobrir seus custos operacionais, manutenção e eventualmente recuperar o investimento inicial.

4.2 PROPOSIÇÃO DE MODELO

Propor uma metodologia multicritério de apoio à decisão na definição de localização de usinas solares é uma abordagem que busca criar um modelo que considere diversos critérios relevantes para a escolha do local mais adequado para a instalação de uma usina solar. O objetivo é fornecer um modelo que apoie os tomadores de decisão na definição da melhor localização para uma usina solar.

4.2.1 Estruturação hierárquica

A estruturação hierárquica no método AHP envolve o agrupamento de critérios em grupos, o que traz diversos benefícios para a análise e tomada de decisão. Um dos motivos para agrupar critérios é a organização e clareza proporcionadas por essa abordagem. Ao agrupar critérios relacionados, é possível criar uma estrutura hierárquica

que facilita a compreensão dos relacionamentos entre os critérios e sua importância relativa.

Além disso, agrupar critérios ajuda a simplificar e gerenciar a complexidade do problema. Em vez de lidar com uma grande quantidade de critérios individuais, é possível analisar os grupos como um todo, reduzindo a carga cognitiva e tornando a análise mais gerenciável. Outra vantagem é a identificação de relações e dependências entre os critérios. Agrupar critérios semelhantes permite uma análise mais abrangente e ajuda a capturar a interação entre eles, levando a uma avaliação mais precisa.

Ao realizar uma análise dos grupos de critérios mencionados nos estudos e seus respectivos critérios, indicados figura 24, podemos observar um padrão consistente de agrupamento. Esses grupos são formulados com o objetivo de maximizar a eficiência do sistema, otimizar o acesso à infraestrutura e aprimorar a eficiência operacional das usinas fotovoltaicas.

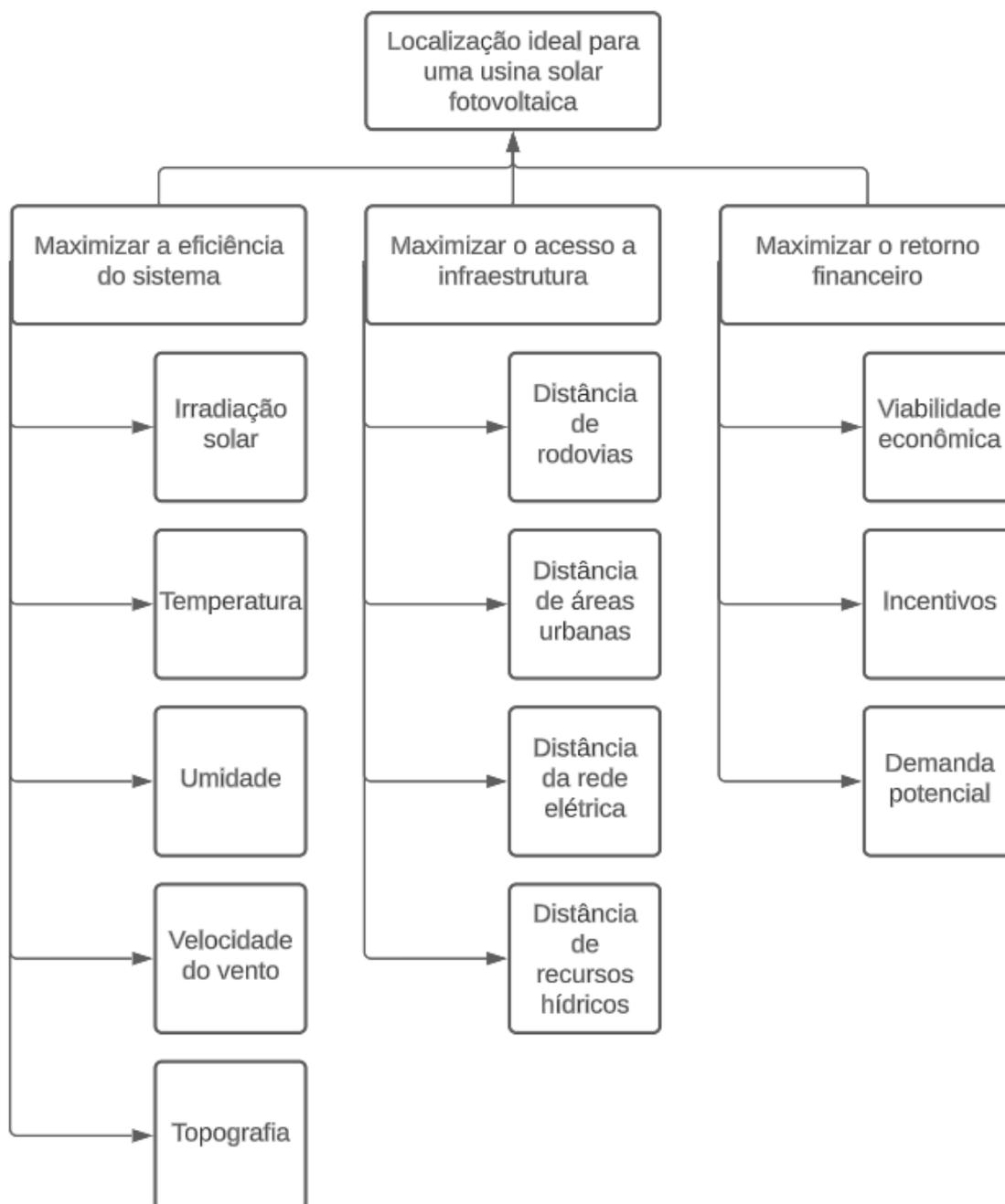
Quadro 24 – Grupos de critério

Critério	Autor						Objetivo
	Yongli Wang et al. (2022)	Rediske et al. (2020)	Chia-Nan Wang et al. (2018)	Azevedo (2016)	Tafala et al. (2023)	Marquesine et al. (2022)	
	Grupo de Critério	Grupo de Critério	Grupo de Critério	Grupo de Critério	Grupo de Critério	Grupo de Critério	
Radiação solar	Fatores naturais	Climático	Ambienta	Climático	Climático	Climático	Maximizar a eficiência do sistema
Temperatura							
Umidade	X	X	X	X	X		
Velocidade do vento	Fatores naturais	Geomorfológica	Características do local	Topográfico	Orográfico	Topográfico	
Topografia	Fatores econômicos	Localização	Tecnológico	Localização	Técnico e Localização	Infraestrutura	Maximizar o acesso a infraestrutura
Distância de rodovias							
Distância da rede elétrica							
Distância de áreas urbanas							
Distância de recursos hídricos	X	X	X	Topográfico			
Incentivos	Fatores sociais	X	Social	X	Institucional	X	Maximizar a retorno financeiro
Demanda potencial	X		Tecnológico				
Viabilidade econômica			X		X		

Fonte: Autor

Essa abordagem de agrupamento dos critérios em categorias distintas é adotada para melhor compreensão e análise dos fatores relevantes para a escolha adequada da localização. A figura 22 apresenta a estrutura hierárquica proposta.

Figura 22 – Estrutura hierárquica proposta.



Fonte: Autor

Para maximizar a eficiência do sistema, é fundamental analisar os critérios que têm um impacto direto em sua performance. A irradiação solar desempenha um papel fundamental como fonte de geração do sistema, e fatores como temperatura, umidade, velocidade do vento e topografia exercem influência direta na eficiência e no aproveitamento máximo da irradiação solar disponível para a geração de energia. Ao considerar e otimizar esses critérios, é possível maximizar a eficiência do sistema e potencializar a produção de energia solar.

Para maximizar o acesso a infraestrutura disponível, é necessário avaliar a pro-

ximidade do local da usina em relação aos recursos necessários, como distância de rodovias, áreas urbanas, rede elétrica e recursos hídricos. A localização estratégica da usina em relação a esses elementos contribui para uma melhor utilização da infraestrutura existente, garantindo eficiência operacional e reduzindo custos de implantação e operação.

Para maximizar o retorno financeiro, é essencial realizar uma avaliação detalhada da viabilidade econômica do sistema, levando em consideração não apenas os custos envolvidos, mas também os potenciais incentivos disponíveis. A análise cuidadosa dos diferentes incentivos pode contribuir significativamente para o retorno financeiro do projeto, aumentando sua atratividade e viabilidade econômica.

Ao dividir os critérios em grupos, é possível analisar cada categoria de forma mais focada, identificando suas particularidades e atribuindo pesos específicos a cada grupo. Essa abordagem contribui para uma avaliação mais completa e equilibrada da localização ideal para uma usina solar, considerando tanto os aspectos ambientais, técnicos e financeiros.

4.2.2 Relevância dos critérios

A definição de prioridades desempenha um papel crucial na tomada de decisões em diversos contextos, incluindo estudos de localização. No caso específico de escolher a localização ideal para um projeto, é essencial identificar e estabelecer as prioridades dos critérios considerados, a fim de direcionar a análise e a avaliação de forma adequada.

A importância da definição de prioridades reside no fato de que nem todos os critérios têm o mesmo peso ou relevância na tomada de decisão. Alguns fatores podem ter um impacto significativo no sucesso e no desempenho do projeto, enquanto outros podem ter uma influência menor ou serem considerados menos relevantes. Portanto, atribuir pesos adequados aos critérios permite uma avaliação mais precisa e equilibrada das opções disponíveis.

Será adotada uma abordagem diferente para a definição de prioridades, na qual não serão atribuídos valores numéricos. Em vez disso, será empregada uma escala de cores para destacar a importância relativa de cada critério. Essa abordagem proporciona uma representação visual e intuitiva dos critérios, permitindo uma compreensão imediata da sua relevância na tomada de decisão.

Nesse modelo, cada critério é associado a uma cor específica, e a intensidade da cor indica a sua importância relativa. Critérios mais relevantes são representados por cores mais intensas, enquanto critérios menos relevantes são representados por cores mais suaves. Dessa forma, é possível ter uma percepção imediata dos critérios que possuem maior peso na decisão, auxiliando na identificação das melhores alternativas de localização.

Serão propostos três modelos de definição de pesos, levando em consideração diferentes tipos de usinas solares. Cada modelo será adaptado às características específicas de cada tipo de usina, abrangendo desde usinas de geração centralizada de grande porte, com potência de 100 MW, até usinas de geração distribuída de menor escala, com potência de 10 kW. Além disso, será desenvolvido um modelo intermediário, com potência de 5 MW, que se situa entre os conceitos de geração centralizada e distribuída.

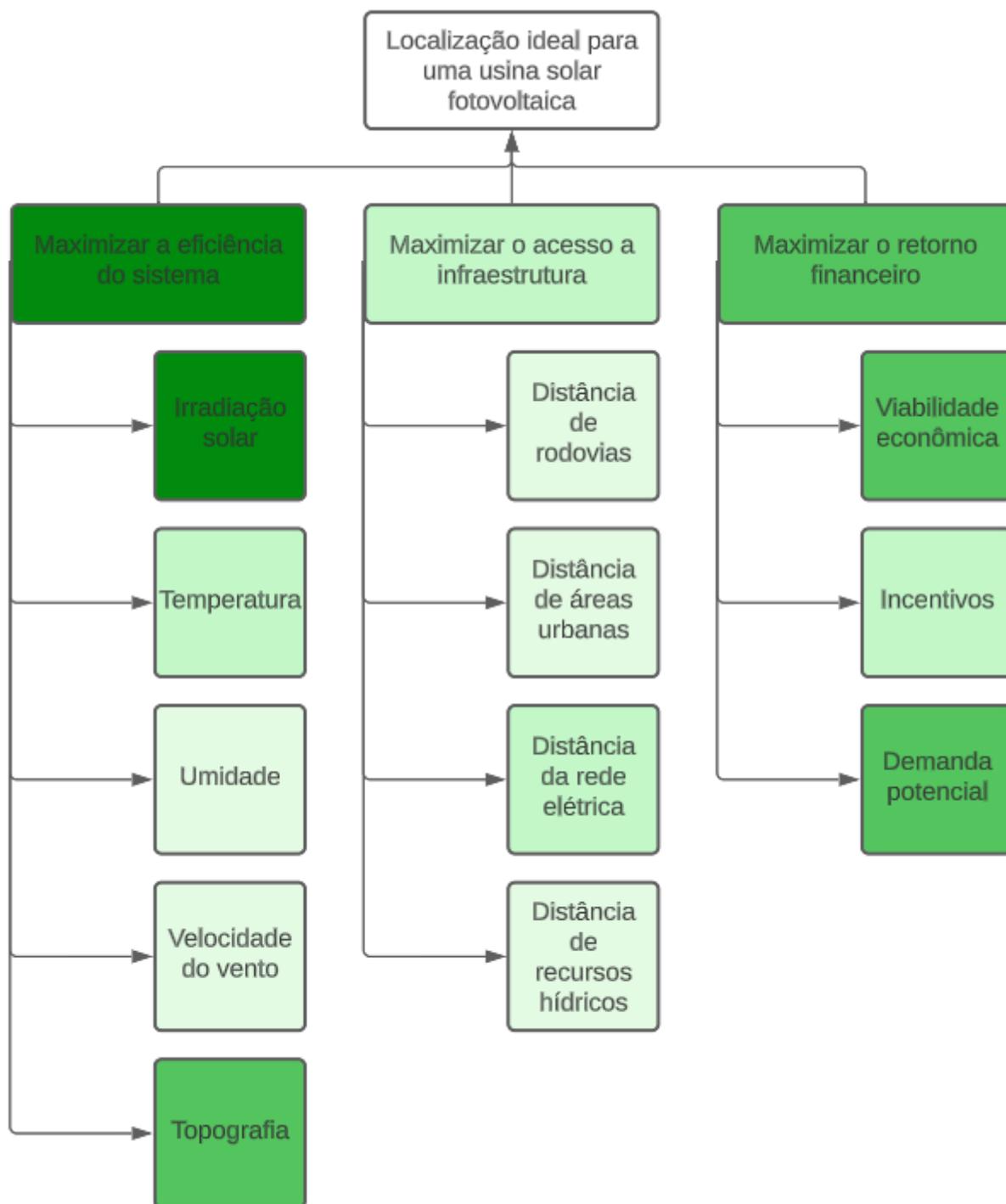
Essa abordagem visa contemplar uma ampla gama de usinas solares, desde empreendimentos de menor porte, como instalações residenciais ou comerciais de menor escala, até usinas de grande porte destinadas à geração em larga escala. Cada modelo de pesos será projetado especificamente para refletir as prioridades e características relevantes para cada tipo de usina.

Dessa forma, a proposta de três modelos de pesos permite uma análise mais abrangente e precisa, considerando as necessidades e particularidades de usinas geração distribuída, usinas médias e usinas de geração centralizada. Ao adaptar os pesos de acordo com a potência de cada tipo de usina, é possível obter resultados mais adequados e alinhados com as demandas específicas de cada empreendimento.

Essa abordagem contribui para uma tomada de decisão mais embasada e direcionada, considerando as particularidades de cada tipo de usina e garantindo uma análise mais precisa dos critérios relevantes para cada escala de geração solar. Assim, é possível atender de forma mais eficiente às demandas e necessidades dos diferentes tipos de projetos solares, tanto em termos de viabilidade econômica quanto de sustentabilidade e eficiência energética.

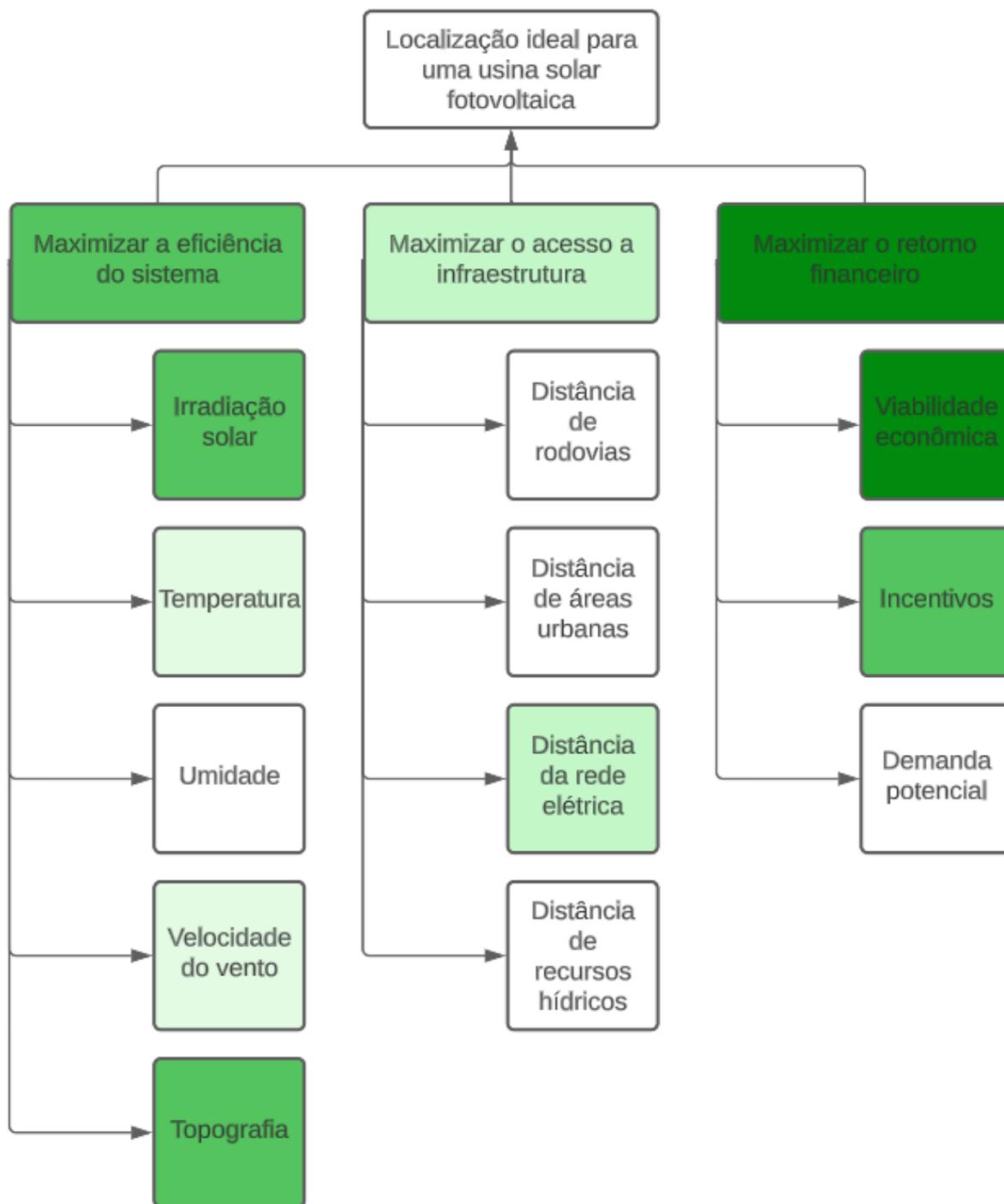
A importância de cada critério foi definida com base nas observações do que realmente ocorre na prática e nas discussões realizadas. Nas Figuras 23, 24 e 25 é apresentado o modelo proposto para usinas de geração centralizada, médias e geração distribuída respectivamente. Para facilitar a visualização, foi utilizado um sistema cores, onde quanto mais intensa a cor, maior é a relevância atribuída ao critério.

Figura 23 – Estrutura hierárquica proposta para usinas de geração centralizada



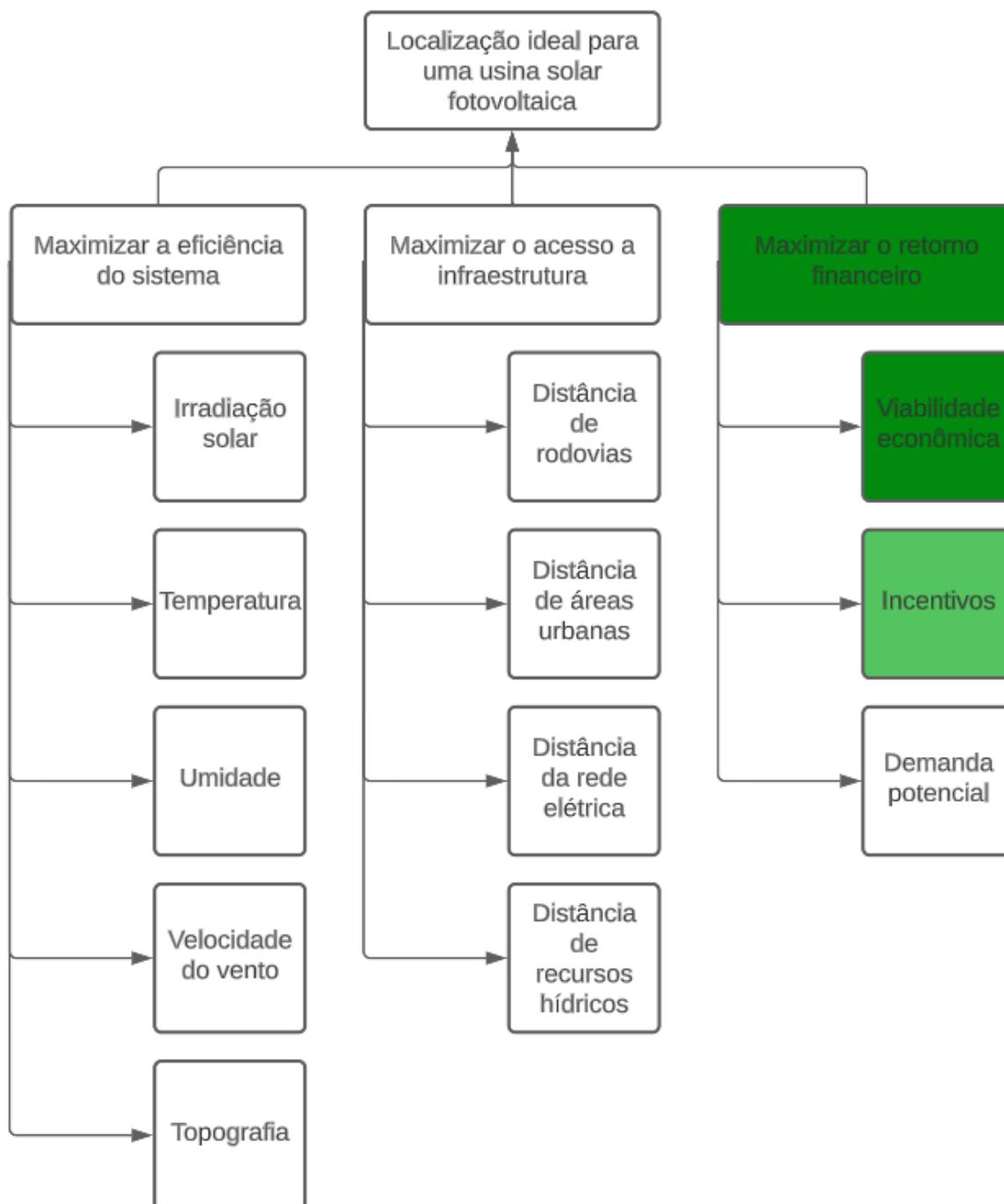
Fonte: Autor

Figura 24 – Estrutura hierárquica proposta para usinas médias



Fonte: Autor

Figura 25 – Estrutura hierárquica proposta para usinas de geração distribuída



Fonte: Autor

4.3 ANÁLISE DE RESULTADOS

O objetivo de uma usina de geração centralizada é gerar uma quantidade significativa de energia elétrica. Essas usinas são projetadas para ter uma capacidade de geração substancial, podendo atender a demanda de uma cidade, região industrial ou até mesmo suprir parte da demanda de um país. A maximização da eficiência da usina

é um critério fundamental, visando aproveitar ao máximo a irradiação solar disponível e otimizar a produção de energia. Além disso, busca-se a maximização do retorno financeiro, embora tenha uma relevância ligeiramente menor em comparação com a eficiência do sistema. Outro grupo de critérios importante mas com menor relevância é o acesso à infraestrutura necessária, como a proximidade de linhas de transmissão e subestações, que facilitam a conexão da usina à rede elétrica.

Usinas de geração distribuída são geralmente dimensionadas para atender a demanda de residências, pequenos comércios, propriedades rurais ou instalações de menor porte. No caso das usinas conectadas à rede elétrica, o principal objetivo é reduzir o valor da conta de luz, o que resulta em economia financeira para os consumidores. Já para as usinas não conectadas à rede, o objetivo é suprir a demanda energética local sem depender do fornecimento de energia da rede elétrica, evitando assim os custos associados ao uso dessa energia. Dessa forma, o grupo de critérios de maior relevância para essas usinas de geração distribuída é maximizar o retorno financeiro. No caso das usinas de geração distribuída, geralmente são realizados estudos para validar a viabilidade econômica da instalação do projeto em um local predefinido. Nessas situações, a conexão da usina à rede elétrica e a maximização da eficiência do sistema não são critérios relevantes.

O objetivo de uma usina solar de médio porte é fornecer energia elétrica para atender a demanda de uma região específica, como um parque industrial, um empreendimento comercial ou uma comunidade. Essas usinas são dimensionadas para produzir uma quantidade significativa de energia, porém em uma escala menor em comparação com as usinas de geração centralizada. A maximização do retorno financeiro é um critério de grande relevância, pois busca-se obter um equilíbrio entre o investimento realizado e os benefícios financeiros gerados pela usina. Além disso, a eficiência do sistema também é considerada, visando garantir um aproveitamento eficiente da irradiação solar disponível. Outros critérios relevantes podem incluir o acesso à infraestrutura necessária, como a proximidade de linhas de distribuição elétrica e a disponibilidade de espaço adequado para a instalação dos painéis solares.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo, realizamos uma análise dos critérios utilizados na escolha de localização de usinas solares, confrontando-os com dados reais de usinas já instaladas. Observamos que, nos estudos analisados, os critérios eram geralmente abordados de forma genérica, sem considerar a variabilidade que pode ocorrer de acordo com o tamanho da usina e outros fatores relevantes. No entanto, ao confrontar esses critérios com as usinas já em operação, foi possível constatar que sua aplicabilidade e importância podem variar significativamente.

Os objetivos estabelecidos para este estudo foram plenamente alcançados, uma vez que foi realizada uma análise minuciosa da relevância dos critérios utilizados na seleção da localização de instalações fotovoltaicas para geração de energia solar. O estudo permitiu uma compreensão aprofundada dos fatores que influenciam a escolha do local, considerando tanto os critérios amplamente utilizados na literatura especializada quanto os critérios específicos observados em usinas solares já instaladas.

É importante ressaltar que a abordagem predominante na literatura consiste no desenvolvimento de modelos voltados para casos particulares. Nesses estudos, os critérios adotados costumam seguir padrões estabelecidos, refletindo uma certa uniformidade na aplicação dos mesmos. No entanto, uma lacuna significativa é observada quando se trata de uma análise mais ampla e abrangente dos critérios em questão. São poucos os trabalhos que se propõem a investigar de forma geral e abrangente a relevância e o impacto dos critérios em diferentes contextos e aplicações. Portanto, há uma demanda evidente por pesquisas que ampliem o escopo e a compreensão dos critérios, contribuindo para uma visão mais completa e aprofundada nessa área de estudo.

Ao confrontar os dados dos estudos com os dados reais de usinas solares já instaladas, foi possível validar a variação de relevância dos critérios de acordo com as características específicas de cada usina. Essa análise comparativa evidenciou que os critérios utilizados na literatura de forma genérica nem sempre refletem completamente a realidade observada nas usinas solares já instaladas. Foi constatado que o tamanho da usina influencia significativamente a importância relativa dos critérios utilizados na escolha da localização. Essa descoberta reforça a necessidade de uma abordagem mais personalizada e adaptada às particularidades de cada projeto, levando em consideração não apenas os critérios amplamente aceitos, mas também os fatores específicos que podem ter um impacto significativo na seleção do local mais adequado.

Vale ressaltar que este estudo aborda especificamente a variação da relevância dos critérios de acordo com os diferentes tamanhos de usina solar analisados. No entanto, é importante mencionar que existem outros aspectos e fatores que também

podem influenciar a importância relativa dos critérios de escolha de localização. Aspectos como o ponto de vista dos atores, pode desempenhar um papel significativo na determinação dos critérios mais relevantes em cada situação. Esses fatores adicionais devem ser considerados em estudos futuros para uma compreensão mais abrangente e precisa da relevância dos critérios na escolha do local adequado para instalações de usinas solares.

A limitação do número de estudos analisados neste estudo destaca a necessidade de cautela ao interpretar os resultados. A análise de apenas dez artigos pode não capturar toda a diversidade e complexidade do campo de estudo, deixando lacunas potenciais na compreensão do tema em questão. Uma abordagem mais abrangente, como uma análise sistemática, que inclua um maior número de estudos, permitiria explorar uma gama mais ampla de perspectivas, abordagens e contextos.

Além disso, uma análise sistemática mais abrangente poderia fornecer insights adicionais sobre a aplicabilidade e a generalização dos resultados encontrados, considerando diferentes cenários, populações e contextos. Isso é especialmente importante para embasar decisões e recomendações em áreas que requerem uma visão mais holística e abrangente dos estudos disponíveis.

Outro ponto limitante deste estudo é a ausência de validação por especialistas da área. A validação com especialistas é um processo fundamental para garantir a confiabilidade e a precisão dos resultados obtidos. A participação de especialistas teria contribuído para a análise mais aprofundada dos critérios adotados e para a verificação da adequação das conclusões alcançadas.

Dessa forma, concluímos que a seleção adequada dos critérios, levando em consideração a variabilidade de acordo com o tamanho da usina e outros fatores, é crucial para uma escolha de localização mais precisa e eficaz. Essa abordagem permitirá uma análise mais aprofundada e embasada, contribuindo para a tomada de decisões informadas no planejamento e implantação de usinas solares.

REFERÊNCIAS

- ABINEE. **Propostas para Inserção da Energia Solar Fotovoltaica na Matriz Elétrica Brasileira**. [S.l.: s.n.], 2012. URL: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/profotov.pdf>. Acesso em: 14 abr. 2023.
- ABRADEE. **Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica. Visão Geral do Setor: A Indústria da Eletricidade**. [S.l.: s.n.], 2018. Disponível em: <https://www.abradee.org.br/setor-eletrico/visao-geral-do-setor/>. Acesso em: 03 de fevereiro 2023.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2006. URL: <http://pnqa.ana.gov.br/Publicacao/IQA.pdf>. Acesso em: 14 mai. 2023.
- ANEEL. **LEI Nº 14.300, DE 6 DE JANEIRO DE 2022**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://in.gov.br/en/web/dou/-/lei-n-14.300-de-6-de-janeiro-de-2022-372467821>. Acesso em: 22 abril 2023.
- ANEEL. **Parque solar São Gonçalo**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.enelgreenpower.com/pt/nossos-projetos/highlights/parque-solar-sao-goncalo>. Acesso em: 22 abril 2023.
- ANEEL. **Power BI geração distribuída**. [S.l.: s.n.], 2023. URL: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojY2VmMmUwN2QtYWFiOS00ZDE3LWI3NDMtZDk0NGI4MGU2NTkxliwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 14 mai. 2023.
- ANEEL. **Sistema de informações de geração da ANEEL SIGA**. [S.l.: s.n.], 2023. URL: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjojNjc4OGYyYjQtYWWM2ZC00YjllLWJlYmEtYzdkNTQ1MTc1NjM2liwidCI6IjQwZDZmOWI4LWVjYTctNDZhMi05MmQ0LWVhNGU5YzAxNzBIMSIsImMiOjR9>. Acesso em: 14 mai. 2023.
- ANTONIOLLI, Andriago Filippo; ZOMER, Clarissa Debiazi; DE ABREU, JOAO PEDRO FREDERICO; NASPOLINI, Helena Flávia; ABREU, Ana Ligia Papst de; ABREU, Samuel Luna; RÜTHER, Ricardo. PROJETO BÔNUS FOTOVOLTAICO: ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA DAS UNIDADES PROSSUMIDORAS CONTEMPLADAS. *In*: CONGRESSO Brasileiro de Energia Solar-CBENS. [S.l.: s.n.], 2020.
- ARNETTE, Andrew N; ZOBEL, Christopher W. Spatial analysis of renewable energy potential in the greater southern Appalachian mountains. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 36, n. 11, p. 2785–2798, 2011.

AZEVÊDO, Verônica Wilma Bezerra. Estudo de localização de usina solar termoelétrica no estado de Pernambuco. Universidade Federal de Pernambuco, 2016.

BANA E COSTA, Carlos A. Três convicções fundamentais na prática do apoio à decisão. **Pesquisa Operacional**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 9–20, 1993.

BARBOSA FILHO, Wilson Pereira; FERREIRA, Wemerson Rocha; AZEVÊDO, Abílio César Soares de; COSTA, Antonella Lombardi; PINHEIRO, Ricardo Brant. Expansão da energia solar fotovoltaica no Brasil: impactos ambientais e políticas públicas. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 4, p. 628–642, 2015.

BONKANEY, Abdoulatif; MADOUGOU, Saidou; ADAMOU, Rabani. Impacts of cloud cover and dust on the performance of photovoltaic module in Niamey. **Journal of Renewable Energy**, Hindawi, v. 2017, 2017.

BRASIL. **Associação Brasileira de Distribuição de Energia Elétrica. Visão Geral do Setor: A Indústria da Eletricidade**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/conheca-as-instituicoes-do-setor-eletrico-brasileiro-e-as-competencias-de-cada-uma>. Acesso em: 03 de janeiro 2023.

BRITO, Sérgio de Salvo. Centro de referência para energia solar e eólica. **CRESESB Informe-Rio de Janeiro**, v. 12, n. 13, p. 3, 2008.

CMA. **Comissão de Meio Ambiente**. [S.l.: s.n.], 2019. Disponível em: <https://cbic.org.br/sustentabilidade/2019/01/11/piaui-instala-a-maior-usina-de-energia-fotovoltaica-da-america-latina/>. Acesso em: 22 de janeiro 2023.

COELHO, Roberto Francisco *et al.* Estudo dos conversores buck e boost aplicados ao rastreamento de máxima potência de sistemas solares fotovoltaicos. Florianópolis, SC, 2008.

DETONI, Monica Maria Mendes Luna *et al.* Aplicação de metodologia multicritério de apoio à decisão na definição de características de projetos de construção, 1996.

DUFFIE, John A; BECKMAN, William A. **Solar engineering of thermal processes**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2013.

EINSTEIN, Albert. Concerning an heuristic point of view toward the emission and transformation of light. **American Journal of Physics**, v. 33, n. 5, p. 367, 1965.

ELETROBRAS. **Guia Técnico para Atendimento com Sistemas de Geração Fotovoltaica no âmbito dos Programas Luz para Todos e Mais Luz para a Amazônia**. [S.l.: s.n.], 2021. URL: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/energia-eletrica/copy2_of_programa-de-eletrificacao-rural/normativos/documentos/

GuiaTcnico para Atendimento com Sistemas de Geração Fotovoltaica em todos os LPT e MLA. .pdf. Acesso em: 14 abr. 2023.

ELETRONBRAS. **Mapas do Sistema Elétrico Brasileiro**. [S.l.: s.n.], 2018. URL: <https://eletronbras.com/pt/Paginas/Sistema-Eletrico-Brasileiro.aspx>. Acesso em: 14 mai. 2023.

EMBRAPA. **Síntese Ocupação e Uso das Terras no Brasil**. [S.l.: s.n.], 2018. URL: <https://www.embrapa.br/car/sintese>. Acesso em: 14 mai. 2023.

EPE. **Balço Energtico Nacional**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energtico-nacional-2022>. Acesso em: 22 abril 2023.

EPE. **Resenha Mensal: O consumo nacional de energia elétrica foi de 42.837 GWh em janeiro de 2023, crescimento de 0,6% em comparação com mesmo mês de 2022**. [S.l.: s.n.], 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/resenha-mensal-o-consumo-nacional-de-energia-eletrica-foi-de-42-837-gwh-em-janeiro-de-2023-crescimento-de-0-6-em-comparacao-com-mesmo-mes-de-2022#:~:text=Conte%C3%BA do%20da%20P%C3%A1gina->. Acesso em: 22 abril 2023.

FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. Novo dicionário da língua portuguesa. rev. e aum. **Rio de Janeiro: Nova Fronteira**, v. 2, 1986.

HAAN, de; HEER, de. **Solving Complex Problems**. [S.l.]: Eleven International Publishing The Hague, 2012.

IBGE. **Densidade demográfica**. [S.l.: s.n.], 2010. URL: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/sociedade-e-economia/15955-densidade-demografica.html>. Acesso em: 14 mai. 2023.

IBGE. **Potencialidade agrícola natural das terras**. [S.l.: s.n.], 2010. URL: https://geofpt.ibge.gov.br/informacoes_ambientais/estudos_ambientais/macrocaracterizacao/mapa/potencialidade_agricola_natural_das_terras.pdf. Acesso em: 14 mai. 2023.

IEA. **Global electricity demand rebounds in 2021**. [S.l.: s.n.], 2021. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2021>. Accessed on March 21, 2023.

INFRAESTRUTURA, Ministério da. **Mapa topográfico brasileiro**. [S.l.: s.n.], 2023. URL: https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transporte-terrestre_antigo/rodovias-federais/rodovias-federais-mapas. Acesso em: 14 mai. 2023.

KALDELLIS, John K; KOKALA, Alexandra; KAPSALI, Marina. Natural air pollution deposition impact on the efficiency of PV panels in urban environment. **Fresenius Environmental Bulletin**, Parlar Scientific Publications, Angerstr 12 Freising 85354 Germany, v. 19, n. 12, p. 2864–2872, 2010.

KALOGIROU, Soteris A. **Solar energy engineering: processes and systems**. [S.l.]: Academic press, 2013.

KILIKEVIČIUS, Artūras; ČEREŠKA, Audrius; KILIKEVIČIENĖ, Kristina. Analysis of external dynamic loads influence to photovoltaic module structural performance. **Engineering Failure Analysis**, Elsevier, v. 66, p. 445–454, 2016.

MAIA, Rian Sardinha. Energia solar: o desenvolvimento de um novo mercado. **Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro**, 2018.

MAPA, Sílvia Maria Santana; LIMA, Renato da Silva. Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 19, p. 119–136, 2012.

MAPA, Sílvia Maria Santana; LIMA, Renato da Silva. Uso combinado de sistemas de informações geográficas para transportes e programação linear inteira mista em problemas de localização de instalações. **Gestão & Produção**, SciELO Brasil, v. 19, p. 119–136, 2012.

MARQUESINE, Maria Isadora de Faveri; CHAMMA, Willian Douglas Sbitkowski; BATISTELLA, Danielli. ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO PARA INSTALAÇÃO DE USINA À BASE DE ENERGIA SOLAR CONCENTRADA. **Revista Brasileira de Energia| Vol**, v. 28, n. 2, 2022.

MOKARRAM, Marzieh; MOKARRAM, Mohammad J; KHOSRAVI, Mohammad R; SABER, Ali; RAHIDEH, Akbar. Determination of the optimal location for constructing solar photovoltaic farms based on multi-criteria decision system and Dempster–Shafer theory. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 10, n. 1, p. 8200, 2020.

MORAIS. **Célula fotovoltaica: Tudo que você precisa saber**. [S.l.: s.n.], 2020. Disponível em: <https://eletronicadepotencia.com/celula-fotovoltaica/>. Acesso em: 22 de janeiro 2023.

MOREIRA, Daniel Augusto. Administração da Produção e Operações. **São Paulo: Pioneira**, 1998.

MOTA, Lidiane Aparecida Lima; ARAUJO, Silvânia Moreira; CONCEIÇÃO RAMOS, Eliene da; ARAUJO, Kalliana Dantas;

OLIVEIRA ROSA, Paulo Roberto de. Problemas ocasionados pelo elevado índice pluviométrico em Araguaína–TO. **Geoambiente On-line**, n. 9, p. 01–18, 2007.

PEREIRA, Enio *et al.* **Atlas Brasileiro de Energia Solar – 2ª Edição**. [S.l.: s.n.], ago. 2017. ISBN 978-85-17-00089-8.

PORTAL SOLAR. **Energia Solar na Construção – Preparando a propriedade**. [S.l.: s.n.], 2022. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-solar-na-construcao-do-imovel.html>. Acesso em: 22 abril 2023.

QUEIROZ, Rosemar de; KOPPE, Ezequiel; GRASSI, Patricia; TARTAS, Bruna; LAZZARE, Kariane; BOZZETTO, Cristiane; CUNHA KEMERICH, Pedro Daniel da. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. **Revista eletrônica em gestão, educação e tecnologia ambiental**, p. 2774–2784, 2013.

REDISKE, Graciele; SILUK, Julio Cezar M; MICHELS, Leandro; RIGO, Paula D; ROSA, Carmen B; CUGLER, Gilberto. Multi-criteria decision-making model for assessment of large photovoltaic farms in Brazil. **Energy**, Elsevier, v. 197, p. 117167, 2020.

RIO, Del; BURGUILLO. An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 13, n. 6-7, p. 1314–1325, 2009.

SAID, Syed AM; HASSAN, Ghassan; WALWIL, Husam M; AL-AQEELI, N. The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 82, p. 743–760, 2018.

SAMUEL NETO, Antonio. **Análise e controle de centrais eólicas a velocidade variável utilizando ATPDraw**. 2005. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco.

SOLAR, Portal. **Maiores usinas solares fotovoltaicas do Brasil**. [S.l.: s.n.], 2023. URL: <https://www.portalsolar.com.br/maiores-usinas-de-energia-solar-do-brasil>. Acesso em: 14 mai. 2023.

TAFULA, José Eduardo; JUSTO, Constantino Dário; MOURA, Pedro; MENDES, Jérôme; SOARES, Ana. Multicriteria Decision-Making Approach for Optimum Site Selection for Off-Grid Solar Photovoltaic Microgrids in Mozambique. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 6, p. 2894, 2023.

TIBA, Chigueru; REIS, RJ dos R; COSTA, Júlio César Ezequiel da; AZEVEDO, Verônica Wilma Bezerra; ABREU, João Francisco;

ALVES, Melina Amoni Silveira; GUIMARÃES, Daniel Pereira; PORTO, Marco Aurélio Dumont. Siting study of solar thermoelectric plants in the State of Minas Gerais. *Journal of Geographic Information System*, v. 6, p. 423-439, 2014., 2014.

TOPOGRAPHIC. **Mapa topográfico brasileiro**. [S.l.: s.n.], 2023. URL: <https://pt-br.topographic-map.com/map-g825k/Brasil/?center=-5.52851%5C%2C-88.33008>. Acesso em: 14 mai. 2023.

TÜRK, Seda; KOÇ, Ahmet; ŞAHİN, Gökhan. Multi-criteria of PV solar site selection problem using GIS-intuitionistic fuzzy based approach in Erzurum province/Turkey. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 11, n. 1, p. 5034, 2021.

UPTON, John. Solar Farms Threaten Birds. **Scientific American**, v. 27, 2014.

VILLACRESES, Geovanna; JIJÓN, Diego; NICOLALDE, Juan Francisco; MARTINEZ-GÓMEZ, Javier; BETANCOURT, Franz. Multicriteria Decision Analysis of Suitable Location for Wind and Photovoltaic Power Plants on the Galápagos Islands. **Energies**, MDPI, v. 16, n. 1, p. 29, 2022.

WECKEND, Stephanie; WADE, Andreas; HEATH, Garvin A. **End of life management: solar photovoltaic panels**. [S.l.], 2016.