



Yiselis Rodríguez Vignon

**Barreiras e Estratégias de Mitigação para o
Desenvolvimento da Energia Solar em Regiões
Isoladas da Amazônia**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia de Produção do
Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira
Co-orientador: Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado

Rio de Janeiro
setembro de 2024



Yiselis Rodríguez Vignon

**Barreiras e Estratégias de Mitigação para o
Desenvolvimento da Energia Solar em Regiões
Isoladas da Amazônia**

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio.
Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Rodrigo Flora Calili

Programa de Pós-Graduação em Metrologia – PUC-Rio

Prof. Helder Gomes Costa

UFF

Rio de Janeiro, 11 de setembro de 2024

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial, do trabalho é proibida sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Yiselis Rodríguez Vignon

Engenharia Industrial pela Universidade de Guantánamo (UG) (2017),
Mestranda em Engenharia Industrial pela Pontifícia Universidade
Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio). Bolsista pela Coordenação de
Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Ficha Catalográfica

Rodríguez Vignon, Yiselis

Barreiras e estratégias de mitigação para o desenvolvimento da
energia solar em regiões isoladas da Amazônia / Yiselis Rodríguez
Vignon; orientador: Fernando Luiz Cyrino Oliveira; co-orientador:
Rodrigo Goyannes Gusmão Caiado. – 2024.

110 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio
de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2024.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Geração de energia solar
fotovoltaica. 3. Sistemas isolados. 4. Amazônia. 5. Barreiras. 6.
Estratégias de mitigação. I. Oliveira, Fernando Luiz Cyrino. II. Caiado,
Rodrigo Goyannes Gusmão. III. Pontifícia Universidade Católica do
Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Para meu esposo, Carlos Alejandro,
Pelo apoio e confiança.

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão; a Deus, por me conceder a oportunidade de estar aqui hoje.

Ao meu orientador, Fernando Cyrino, por depositar sua confiança em mim desde o início, aceitando-me como sua orientanda. Agradeço por ter abraçado minha pesquisa, mesmo não sendo sua área específica, e por me encorajar constantemente a perseverar.

Ao meu coorientador, Rodrigo Caiado, por me impulsionar a melhorar continuamente, pelo seu apoio incondicional tanto na esfera profissional quanto pessoal, por sua disponibilidade independentemente do horário, e por estar sempre presente para mim e para Carlos. Minha sincera gratidão.

Ao meu esposo e filho, pelo apoio inabalável em todos os momentos.

Aos professores Scavarda e Calili, por acreditarem em meu potencial, e a todos os docentes do Departamento de Engenharia Industrial, pelos valiosos ensinamentos transmitidos.

À Claudia e à Renata, pela paciência e prontidão em esclarecer minhas dúvidas, por mais numerosas que fossem.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta jornada, meu mais sincero agradecimento. Vocês foram fundamentais para a realização deste sonho.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001.

Resumo

Rodríguez Vignon, Yiselis; Cyrino Oliveira, Fernando Luiz; Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão. **Barreiras e Estratégias de Mitigação para o Desenvolvimento da Energia Solar em Regiões Isoladas da Amazônia.** Rio de Janeiro, 2024.110p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta pesquisa aborda os desafios no desenvolvimento da energia solar fotovoltaica em regiões isoladas da Amazônia, propondo estratégias de mitigação personalizadas. Através de uma abordagem multidimensional, combinando revisão sistemática da literatura, análise de dados e modelagem estatística, o estudo identificou 19 barreiras em 6 dimensões. A análise envolveu 134 localidades isoladas, utilizando dados do IBGE e EPE, considerando aspectos sociais, técnicos, econômicos e logísticos. O algoritmo K-Prototypes foi aplicado para agrupar as localidades, resultando em dois clusters distintos. Com base nessa segmentação, foram propostas estratégias específicas para cada grupo, visando superar os obstáculos identificados e promover um modelo energético mais inclusivo e sustentável. Este trabalho contribui significativamente para a compreensão dos desafios na implementação da energia solar em áreas isoladas da Amazônia, oferecendo soluções práticas e adaptadas às realidades locais.

Palavras-chave

Geração de energia solar fotovoltaica; sistemas isolados; Amazônia; barreiras; estratégias de mitigação.

Abstract

Rodríguez Vignon, Yiselis; Cyrino Oliveira, Fernando Luiz; Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão. **Barriers and Mitigation Strategies for the Development of Solar Energy in Isolated Regions of the Amazon**. Rio de Janeiro, 2024.110p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This research addresses the challenges in developing photovoltaic solar energy in isolated regions of the Amazon, proposing tailored mitigation strategies. Through a multidimensional approach, combining systematic literature review, data analysis, and statistical modeling, the study identified 19 barriers across 6 dimensions. The analysis involved 134 isolated localities, utilizing data from IBGE and EPE, considering social, technical, economic, and logistical aspects. The K-Prototypes algorithm was applied to cluster the localities, resulting in two distinct clusters. Based on this segmentation, specific strategies were proposed for each group to overcome the identified obstacles and promote a more inclusive and sustainable energy model. This work significantly contributes to understanding the challenges of implementing solar energy in isolated areas of the Amazon, offering practical solutions adapted to local realities.

Keywords

Photovoltaic solar power generation; isolated systems; Amazon; barriers; mitigation strategies.

Sumário

1. Introdução	13
1.1.Motivação	13
1.2.Definição do problema de pesquisa	15
1.3.Objetivos: geral e específicos	16
1.4.Organização do trabalho	17
2. Revisão sistemática da literatura	18
2.1. Fase exploratória e descritiva	18
2.1.1 Relação entre as barreiras e estratégias de mitigação	30
2.2. Análise bibliométrica	32
2.3. Análise de conteúdo	35
2.3.1 Identificação de barreiras de GSFb em SIs	37
2.3.3. Resultados da relação entre as barreiras e estratégias	50
3. Contextualização da aplicação	54
3.1 Sistemas Isolados	54
3.2. Variáveis associadas a localidades isoladas	56
3.3. Coleta dos dados	58
3.3.1. Dimensão econômica	58
3.3.2. Dimensão logística	60
3.3.3. Dimensão técnica	62
3.3.4. Dimensão social	63
4. Modelagem Proposta	66
4.1 Modelos de clustering	66
4.1.1. Dados mistos	66
4.1.2. Centroide Difuso	68
4.2. Modelagem proposta para agrupação dos SIs	68
4.2.1. Descrição do procedimento de clustering de dados mistos	70
4.3. Resultados da modelagem proposta	72
5. Resultados e discussões	77
5.1. Resultados do Clustering	77
5.1.1 Variáveis que mais contribuíram para a formação dos clusters	77
5.1.2 Análise dos clusters	79

5.2. Discussão	84
5.2.1 Estratégias específicas por cluster	88
6. Conclusões	95
Referências bibliográficas	98

Lista de tabelas

Tabela 1: Termos de pesquisa	19
Tabela 2: Critérios iniciais de inclusão/exclusão	20
Tabela 3: Estudos de literatura sobre identificação de barreiras e estratégias para o desenvolvimento de GSFb	26
Tabela 4: Dimensões, barreiras e indicadores da GSFb em SIs	40
Tabela 5: Estratégias de mitigação das barreiras de GSFb	48
Tabela 6: Matriz de contingência	50
Tabela 7: Percentual de ocupação e a distribuição da renda nominal mensal per capita	59
Tabela 8: Meios de transporte disponíveis	60
Tabela 9: Fontes geradoras de energia elétrica disponíveis	63
Tabela 10: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal	64
Tabela 11: Características e Comparação dos Clusters de Localidades na Região Amazônica	80
Tabela 12: Estratégias de mitigação personalizadas para o cluster 0	90
Tabela 13: Estratégias de mitigação personalizadas para o cluster 1	91

Lista de figuras

Figura 1: Estrutura da Revisão Sistemática da Literatura.	24
Figura 2: Palavras que possuem maior uso e conectividade na literatura.	33
Figura 3: Citações de pesquisa por ano.	35
Figura 4: Matriz de distâncias qui-quadrado.	51
Figura 5: Gráfico de dispersão resultante da ACS.	52
Figura 6: Sistemas Isolados.	55
Figura 7: Variáveis e indicadores associados a localidades isoladas.	57
Figura 8: Diagrama de Venn do acesso que cada localidade.	61
Figura 9: Procedimento de clustering de dados mistos.	69
Figura 10: FMAD Clustering do K-Prototypes.	73
Figura 11: Centróides difusos do K-Prototypes.	75
Figura 12: Gráfico SHAP de importância das variáveis para a formação de clusters.	78
Figura 13: Localidades isoladas do cluster 0.	82
Figura 14: Localidades isoladas do cluster 1.	83
Figura 15: Relação existente entre barreiras, indicadores e variáveis.	87

Lista de siglas e acrônimos:

ACS - Análise de Correspondência Simples

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

CCC - Conta de Consumo de Combustíveis

EPE - Empresa de Pesquisa Energética

FAMD - Análise Fatorial de Dados Mistos

GSFb - Geração Solar Fotovoltaica com Baterias

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

SHAP - SHapley Additive exPlanations

SIN - Sistema Interligado Nacional

SIs - Sistemas Isolados

SVD - Decomposição em Valores Singulares

TGE - Tipo de Geração de Energia Elétrica

UFV - Usina Fotovoltaica

UHE - Usina Hidrelétrica

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

UTE - Usina Termelétrica

IDHM - Índice de Desenvolvimento Humano Municipal

N_HBT- Número de habitantes

C_IND - Comunidades indígenas

C_QUIL - Comunidades Quilombolas

N_RP - Nível de renda da população

TGE - Tipo de geração de energia elétrica

AL - Acesso as localidades

1.

Introdução

A economia mundial baseia-se na utilização intensiva de combustíveis fósseis, conhecidos pelo seu impacto negativo não só no ambiente e no clima, mas também na saúde (DINCER, 2000; TIETENBERG; LEWIS, 2019). 2,7 bilhões da população mundial dependem de fontes tradicionais de energia, como biomassa orgânica, lenha, etc., para atender às suas necessidades energéticas (ALLOUI; DINCER, 2018). Mais importante ainda, 95% dessa população vem de áreas rurais que carecem de recursos energéticos modernos (WU *et al.*, 2022).

Em cidades distantes das redes de serviços públicos em muitos países, a energia elétrica geralmente é fornecida por geradores a diesel. No setor de energia elétrica, denominam-se Sistemas Isolados (SIs) os sistemas elétricos de serviço público de distribuição de energia elétrica que, em sua configuração normal, não estejam eletricamente conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) por razões técnicas ou econômicas, conforme define o Decreto n. 7.246/2010 (EPE, 2022).

1.1.

Motivação

Historicamente, os grupos geradores a diesel têm sido uma solução fácil para os sistemas isolados, devido à facilidade de construção, operação e manutenção. Além disso, essas usinas não requerem projetos complexos e grandes áreas e têm um custo de investimento relativamente baixo associado a elas (DA PONTE *et al.*, 2021). Com o esforço global para reduzir a dependência de combustíveis fósseis, as energias limpas e renováveis já ocupam um lugar consolidado no portfólio energético de muitos países, que as veem como um ativo estratégico para alcançar o desenvolvimento sustentável (MOSTAFAEIPOUR *et al.*, 2019).

No Brasil, existe atualmente cerca de 212 SIs (EPE, 2022), concentrados na região Norte, que somam apenas 1% do consumo total de energia elétrica do país, mas representam cerca de 40% do território nacional (EPE, 2022). Tais sistemas podem ser desde pequenas localidades, com algumas dezenas de habitantes, como cidades

de porte como Parintins-AM, com mais de 100.000 habitantes (IBGE, 2023). Assim, a maioria desses sistemas é suprida eletricamente por geração local, normalmente baseada em geradores a óleo diesel. Apesar **dos** impactos ambientais e da complexa logística de fornecimento de combustível, geralmente por via fluvial, a geração de energia nesses sistemas tem funcionado razoavelmente bem nas últimas décadas. Embora existam alguns poucos exemplos de geração a partir de fontes alternativas em SIs, como pequenas centrais hidrelétricas (PCH) (DA PONTE *et al.*, 2021). Além disso não em todas as localidades isoladas existe a possibilidade de PCH ou uma central geradora eólica (EOL) devido à sua localização geográfica.

Entre as várias fontes de energia renovável, a solar é a fonte de energia mais ampla e abundantemente disponível em todo o mundo (MOSTAFAEIPOUR *et al.*, 2021). A energia solar pode ser utilizada como fonte alternativa de energia, o que é essencial para a segurança energética, e o fato de o setor de energia solar poder se tornar um grande empregador e estimular o crescimento econômico (TAVANA *et al.*, 2019). O potencial da radiação solar local pode ser aproveitado por Sistemas de geração solar fotovoltaica (SGSF) para produzir eletricidade para localidades isoladas da Amazônia Legal.

Entretanto os SIs da Amazônia precisam da geração solar fotovoltaica com bateria (GSFb), pois essa é uma forma de garantir o acesso à energia elétrica de forma limpa, renovável e econômica para as comunidades que vivem nessas regiões. Existem vários benefícios da energia solar fotovoltaica com bateria para os sistemas isolados da Amazônia, tais como:

- Redução dos custos de geração e distribuição de energia elétrica, que atualmente dependem de usinas termelétricas movidas a diesel, que são caras e poluentes (DA PONTE *et al.*, 2021a).
- Melhoria da qualidade e da confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, que atualmente sofre com frequentes interrupções e falhas na rede (DA SILVA PEREIRA *et al.*, 2023a).
- Estímulo ao desenvolvimento socioeconômico das comunidades, que podem ter acesso a serviços básicos como saúde, educação, comunicação e lazer, além de oportunidades de geração de renda e emprego (ANDRADE *et al.*, 2011).

- Preservação do meio ambiente, pois a energia solar fotovoltaica com bateria não emite gases de efeito estufa nem gera resíduos nocivos, contribuindo para a redução do desmatamento e da emissão de carbono na Amazônia (SILVA *et al.*, 2010).

1.2.

Definição do problema de pesquisa

Nos últimos anos, a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), agência oficial de planejamento energético do Brasil, publicou estudos sobre geração isolada de eletricidade no Acre e Amazonas (EPE, 2022). De acordo com esses relatórios, se o custo futuro dos combustíveis fósseis aumentar e os preços dos equipamentos fotovoltaicos caírem, a diferença poderá ser ainda maior (DA PONTE *et al.*, 2021). No entanto, ainda existem barreiras que afetam o desenvolvimento da GSFb em SIs, o que indica a necessidade da criação de um ambiente colaborativo, com a participação de empresas do setor fotovoltaico, governo, instituições financeiras, pesquisadores e comunidade (GARLET *et al.*, 2019), bem como identificar outras possíveis estratégias para enfrentar as barreiras avaliadas (DA PONTE *et al.*, 2021). Contudo, para enfrentar as barreiras específicas da Amazônia brasileira, devem ser considerados fatores geográficos, climáticos, culturais e socioeconômicos exclusivos de cada localidade (ANDRADE *et al.*, 2011; DA SILVA PEREIRA *et al.*, 2023a). Neste contexto, é fundamental a realização de estudos detalhados a nível local que envolvam as comunidades locais, identifiquem as suas necessidades e desafios específicos e desenvolvam soluções adaptadas a cada localidade (DA SILVA PEREIRA *et al.*, 2023). A recolha de dados socioeconômicos específicos de cada local, bem como a consideração das condições ambientais e geográficas, pode ajudar a conceber estratégias de implantação de energia solar adaptadas às circunstâncias únicas de cada comunidade isolada (KHALID *et al.*, 2023).

Dessa forma, os achados são resumidos da seguinte forma:

- A pesquisa sobre energia solar em SIs ainda apresenta lacunas significativas na literatura (KHALID *et al.*, 2023; RAZMJOO *et al.*, 2023). As barreiras específicas enfrentadas por regiões isoladas da Amazônia não foram adequadamente exploradas (DA PONTE *et al.*, 2021a; DA SILVA PEREIRA *et al.*, 2023a), e estratégias de mitigação adaptadas a essas realidades são escassas (ARCA *et al.*, 2023). Portanto, é fundamental

preencher essa lacuna de conhecimento para promover o desenvolvimento sustentável da energia solar nesta região isolada.

Depois de delimitar a necessidade de promover a GSFb em sistemas isolados, estabeleceu-se as seguintes questões de pesquisa (QPs) a serem respondidas ao longo desta dissertação:

- QP1) Quais são as principais barreiras e estratégias de mitigação para o desenvolvimento da energia solar em regiões isoladas?
- QP2) Como é possível agrupar as localidades da Amazônia em relação a indicadores relacionados a essas barreiras de SIs?
- QP3) Quais estratégias de mitigação podem ser propostas de acordo com o perfil de cada localidade na Amazônia?

1.3.

Objetivos: geral e específicos

Diante da discussão acima, fica evidente a grande necessidade de estudos que investiguem as barreiras e estratégias que possam auxiliar no desenvolvimento da GSFb na Amazônia. Portanto, o objetivo geral desta pesquisa é: Investigar as barreiras para o desenvolvimento da energia solar em regiões isoladas da Amazônia e propor estratégias de mitigação adaptadas às características específicas de cada localidade. Para isso foram considerados três objetivos específicos (OEs):

- OE1: Identificar e analisar as principais barreiras enfrentadas no desenvolvimento da energia solar em regiões isoladas.
- OE2: Identificar e analisar as principais estratégias de mitigação para o desenvolvimento da energia solar em regiões isoladas.
- OE3: Agrupar localidades da Amazônia com base em indicadores relacionados às barreiras identificadas.
- OE4: Propor estratégias de mitigação personalizadas para cada grupo de localidades, considerando seu contexto geográfico, socioeconômico e ambiental.

Com esta pesquisa, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre o desenvolvimento da energia solar na Amazônia, uma região que possui um enorme potencial para a geração de eletricidade a partir dessa fonte renovável e limpa. Além disso, pretende-se fornecer insights práticos que possam orientar políticas públicas

e iniciativas privadas na promoção de fontes sustentáveis de energia na região, que enfrenta diversos desafios socioambientais e econômicos relacionados ao seu modelo energético atual. Assim, busca-se contribuir para o debate sobre a transição energética no Brasil e no mundo, tendo em vista os objetivos de desenvolvimento sustentável e as metas de redução de emissões de gases de efeito estufa.

1.4.

Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado em seis capítulos. Ao final de cada um deles são apresentadas considerações finais.

Inicialmente, na introdução são definidos o problema de pesquisa, levando em conta as pesquisas mais influentes sobre o desenvolvimento de GSFb em áreas rurais, regiões remotas, o objetivo geral e os específicos, além de apontar as contribuições teóricas e práticas da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta uma revisão da literatura onde são compiladas as barreiras que afetam o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica nos SIs da região amazônica e potenciais estratégias de mitigação para essas barreiras.

O terceiro capítulo apresenta os SIs da região Amazônica: A caracterização das variáveis associadas, considerando múltiplas dimensões (e.g. social, técnico, econômico, político, logístico e ambiental).

O quarto capítulo apresenta-se a caracterização e modelagem estatística dos dados dos SIs apresentados anteriormente.

No quinto capítulo são apresentadas as discussões e implicações, tendo em conta o agrupamento das localidades isoladas que apresentam semelhanças e as mesmas barreiras.

Finalmente, o sexto capítulo apresenta as conclusões do trabalho, bem como limitações e sugestões para possíveis pesquisas.

2.

Revisão sistemática da literatura

Nesta pesquisa, foi realizada uma revisão da literatura sobre o tema abordado, determinando as barreiras que afetam o desenvolvimento do GSFb em SIs, assim como foram definidas as estratégias de mitigação para superar essas barreiras.

2.1.

Fase exploratória e descritiva

Esta revisão foi realizada de acordo com o processo de Revisão Sistemática apresentado por Thomé et al. (2016) e adaptado das cinco etapas apresentadas por Caiado et al. (2024). A pesquisa foi conduzida conforme mostrado na Figura 4, seguindo as etapas: (1) formulação das questões de pesquisa, (2) localização dos estudos, (3) seleção e avaliação dos estudos, (4) análise e síntese dos artigos selecionados e (5) apresentação dos resultados.

Para conduzir uma investigação abrangente sobre as barreiras e estratégias relacionadas ao desenvolvimento da GSFb em sistemas isolados a pesquisa seguiu os seguintes passos:

Identificação das Barreiras:

- Localizar e reunir fontes de informação confiáveis que ofereçam insights sobre as barreiras em questão.
- Identificar e categorizar os diversos tipos de barreiras que atualmente existem no cenário da GSFb em sistemas isolados.

Exploração das Estratégias:

- Recolher informações relevantes provenientes de fontes confiáveis sobre as estratégias empregadas para a mitigação de barreiras.
- Identificar e examinar as diferentes estratégias que têm sido implementadas para superar as barreiras associadas à adoção da energia solar em sistemas isolados.

Na primeira etapa, formulou-se a questão de pesquisa Principais (QP1) e o objetivo desta revisão (OE1), conforme descrito na seção 1.3. A segunda etapa incluiu a busca bibliográfica por meio da seleção de bases de dados e a identificação de palavras-chave, o que é essencial para uma revisão abrangente e imparcial.

As bases de dados utilizadas foram Scopus e Web of Science (WoS) devido à sua complementaridade (MONGEON; PAUL-HUS, 2016). A busca no campo de busca retornou resultados que continham a palavra (chave selecionada no título, resumo e palavras-chave do autor. Seguindo a sintaxe das plataformas de busca, foram utilizados os operadores booleanos (OR) e (AND), a única diferença é que a string de pesquisa do Scopus usa o operador PRE/3 para encontrar resultados onde os termos de pesquisa não estão a mais de 3 palavras de distância um do outro. Além disso é usado o termo "NOT" na string de pesquisa significa "não". É um operador de pesquisa do Web of Science usado para excluir resultados que correspondam a um termo de pesquisa específico.

Para refinar a busca por artigos relevantes sobre sistemas fotovoltaicos solares em áreas rurais e ilhas, a string de pesquisa incluiu o termo de exclusão "NOT TS=("grid-connected")". Essa expressão remove da pesquisa artigos que contenham o termo "grid-connected" (conectado à rede) no título, resumo ou palavras-chave. Essa exclusão é necessária porque a revisão sistemática se concentra em aplicações de energia solar fotovoltaica em locais isolados, não conectados à rede elétrica convencional, como explicado na Tabela 1. Portanto, artigos que abordam sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica principal são considerados fora do escopo desta revisão e, por meio desse termo de negação.

Tabela 1: Termos de pesquisa

Banco de dados		Palavras-chave
		Barreiras
Scopus		(TITLE-ABS-KEY ("isolated system" OR amazon OR island) AND TITLE-ABS-KEY (electricity OR energy) AND TITLE-ABS-KEY (solar OR renewable OR wind OR battery OR biomass) AND TITLE-ABS-KEY (polic*)) AND (low-income)
WoS		TS=("barrier*" OR "challenge*") AND TS=("renewable energy" OR "solar photovoltaic energy" OR "solar energy") AND TS=("isolated systems" OR "rural areas")
		Estratégias
Scopus		(TITLE-ABS-KEY (("strategy*" OR "planning" OR "policy" OR "renewable energy")) AND TITLE-ABS-KEY (("solar photovoltaic energy" OR "solar energy" OR "clean energy")) AND TITLE-ABS-KEY (("isolated systems" OR "rural areas" OR "off-grid systems")) OR TITLE-ABS-KEY (("rural areas" PRE/3 "solar photovoltaic energy")) OR TITLE-ABS-KEY (("remote areas" PRE/3 "solar photovoltaic energy")) AND NOT TITLE-ABS-KEY (("grid-connected")))
WoS		TS=("strategy*" OR "planning" OR "policy" OR "renewable energy") AND TS=("solar photovoltaic energy" OR "solar energy" OR "clean energy") AND TS=("isolated systems" OR "rural areas" OR "remote areas" OR "off-grid systems") NOT TS=("grid-connected")

Fonte: Elaboração própria

A pesquisa foi realizada combinando os termos de busca nos títulos, resumos e palavras-chave. Na terceira etapa, de seleção e avaliação dos artigos, levou-se em consideração a leitura do título, resumo e trabalho completo para a seleção final. O procedimento foi complementado com o uso da técnica de snowball (BIERNACKI; WALDORF, 1981) para frente e para trás, para complementar o processo de seleção e identificar artigos que poderiam ter sido perdidos na primeira etapa. O processo de snowball permite que a revisão sistemática identifique estudos adicionais que podem ter sido perdidos na busca inicial, seja por limitações nas strings de busca ou por não terem sido indexados adequadamente nas bases de dados (WOHLIN, 2014). No contexto da revisão sistemática de literatura, a técnica de snowball foi aplicada da seguinte maneira:

1. Snowball para frente (forward snowballing):

Após a seleção inicial de artigos relevantes, as referências bibliográficas citadas são examinadas (JALALI; WOHLIN, 2012). Artigos citados que parecem relevantes para a pesquisa são adicionados à lista de artigos a serem analisados.

2. Snowball para trás (backward snowballing):

Os artigos que citam os artigos inicialmente selecionados são identificados, geralmente por meio de uma busca de citações (WEBSTER; WATSON, 2002). Esses artigos que citam os artigos iniciais e são relevantes para a pesquisa são adicionados à lista de artigos a serem analisados.

Essa técnica é iterativa e pode ser repetida várias vezes, examinando as referências dos artigos recém-identificados até que não sejam encontrados novos artigos relevantes (BADAMPUDI *et al.*, 2015). Isso permitiu identificar artigos que não haviam sido indexados nas bases de dados de pesquisa utilizadas. A técnica snowball é recomendada nesta etapa de busca pelo método de Thomé et al. (2016). Na quarta etapa, de análise e síntese, realizou-se a leitura completa dos artigos selecionados, tendo em conta os critérios de inclusão/exclusão da tabela 2.

Tabela 2: Critérios iniciais de inclusão/exclusão

Barreiras	
Critérios de Exclusão	Foram excluídos estudos (1) com ausência de resumo, (2) artigos que não pudessem ajudar os autores a atingir os objetivos da pesquisa, (3) que não estivessem escritos na língua inglesa e (4) artigos inválidos (artigos que não pudessem fornecer a versão online do conteúdo completo do texto).
Critérios de Inclusão	Foram incluídos estudos revisados por pares, publicados em inglês entre 2010 e 2023 que (1) descreveram a avaliação de barreiras que afetam o desenvolvimento da geração solar fotovoltaica, (2) foram revisados estudos mais recentes, (3) que apresentaram disponibilidade

	de resumos e (4) artigos que descrevem sistemas isolados e áreas rurais.
Estratégias	
Critérios de Exclusão	Foram excluídos estudos que (1) relatassem apenas estratégias gerais, (2) estudos de acompanhamento após a implementação do GSFb, (3) que não estivessem escritos na língua inglesa e (4) artigos inválidos (artigos que não puderam ser fornecido) a versão online do conteúdo do texto completo).
Critérios de Inclusão	Foram incluídos estudos revisados por pares (1) publicados em inglês entre 2010 e 2023 que (2) descrevem estratégias para o desenvolvimento da GSFb, (3) que descrevem programas baseados em evidências ou informados por evidências de desenvolvimento da GSFb em sistemas isolados e áreas rurais e (4) artigos que descrevem sistemas isolados.

Fonte: Elaboração própria

A análise de conteúdo foi conduzida em duas etapas e de acordo com a estratégia apresentada por Seuring e Gold (2012):

1. Análise dos artigos selecionados para identificar as principais barreiras e estratégias para o desenvolvimento de GSFb em SIs, codificando os temas centrais de cada artigo e os agruparam em categorias temáticas.
2. Análise dos resultados da revisão para identificar tendências e padrões com a síntese dos resultados da análise de conteúdo em uma resposta ao problema de pesquisa.

A partir da análise anterior, selecionou-se os artigos que atendiam aos critérios de exclusão e inclusão. O objetivo foi escolher os artigos que abordassem as barreiras e as estratégias de mitigação para o desenvolvimento do GSFb. Para os artigos sobre as barreiras da GSFb em SIs, foram combinados os resultados dos dois bancos de dados: Scopus (n = 490) e Web of Science (n = 402). Depois de remover 188 itens duplicados, obteve-se um total de 704 documentos. Para os artigos sobre as estratégias de mitigação da GSFb em SIs, também se combinou os resultados dos dois bancos de dados: Scopus (n = 327) e Web of Science (n = 229). Depois de remover 130 itens duplicados, obteve-se um total de 426 documentos. Os documentos foram exportados nos formatos Bibtex e CSV.

Para abordar as questões de pesquisa (1.1 e 1.2), foi implementada uma estratégia de busca sistemática, empregando a combinação de duas ou mais palavras-chave relevantes, nomeadamente "energia solar fotovoltaica", "barreiras", "estratégias" e "sistemas isolados". A categorização dos mesmos foi realizada de acordo com seus objetivos específicos:

- Artigos sobre barreiras: Estes documentos identificam e analisam as principais barreiras que afetam o desenvolvimento da GSFb em SIs.

- Artigos sobre estratégias: Estes documentos apresentam e discutem as principais estratégias de mitigação destinadas a promover o desenvolvimento da GSFb em SIs.

Para cada uma dessas categorias, seguiu-se os seguintes passos metodológicos:

1. Inicialmente, foram selecionados os artigos com base em seus títulos e resumos, excluindo aqueles que não estavam diretamente relacionados ao campo de pesquisa ou não cumpriram os critérios de qualidade e relevância.
2. Após a primeira triagem, procedeu-se à leitura integral dos artigos remanescentes, excluindo aqueles que não continham informações suficientes ou confiáveis sobre as barreiras ou estratégias relacionadas à GSFb em SIs.
3. Logo foram analisados criteriosamente os artigos finais e foram extraídos os dados pertinentes que permitiram responder às subquestões de pesquisa correspondentes.

As barreiras identificadas foram codificadas e agrupadas em seis dimensões (Ds): econômica e financeira, social e cultural, tecnológica, política e regulatória, logística, e ecológica e geográfica. Para cada barreira (Bs), foi elaborada uma descrição detalhada e foram derivados indicadores específicos (Is), com base nas informações fornecidas pelos estudos analisados. Esses indicadores foram então classificados de acordo com sua gravidade, impacto e viabilidade, utilizando critérios definidos a priori (JONES, 2017; KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Essa classificação permitiu uma análise mais aprofundada da relevância e do potencial de cada barreira para o desenvolvimento da GSFb em SIs.

De forma similar, as estratégias de mitigação (Es) identificadas nos artigos foram codificadas e agrupadas em categorias, considerando as dimensões abordadas e os objetivos específicos de cada estratégia. A descrição de cada estratégia foi elaborada com base nas informações fornecidas pelos estudos, buscando detalhar sua aplicação e potencial para superar as barreiras identificadas.

O resultado desse processo metodológico pode ser resumido da seguinte forma:

Para a categoria de barreiras, inicialmente foram selecionados 704 artigos com base em seus títulos e resumos. Destes, 264 foram excluídos por não estarem diretamente relacionados à energia solar fotovoltaica. Dos 440 artigos restantes, após a leitura completa, foram excluídos 426 devido à falta de dados suficientes ou confiáveis sobre as barreiras da GSFb em SIs, resultando em uma amostra final de 14 artigos selecionados.

No que diz respeito à categoria de estratégias, inicialmente foram selecionados 426 artigos com base em títulos e resumos. Desses, 145 foram excluídos por não estarem diretamente relacionados à energia solar fotovoltaica. Dos 281 artigos restantes, selecionou-se 11 após a leitura completa, mas foram excluídos 270 deles devido à falta de dados suficientes ou confiáveis sobre as estratégias da GSFb em SIs. Portanto, a amostra final consistiu em um total de 25 artigos, sendo 14 deles abordando as barreiras e os outros 11 abordando as estratégias relacionadas ao desenvolvimento da GSFb em SIs, como mostra-se na Figura 1.

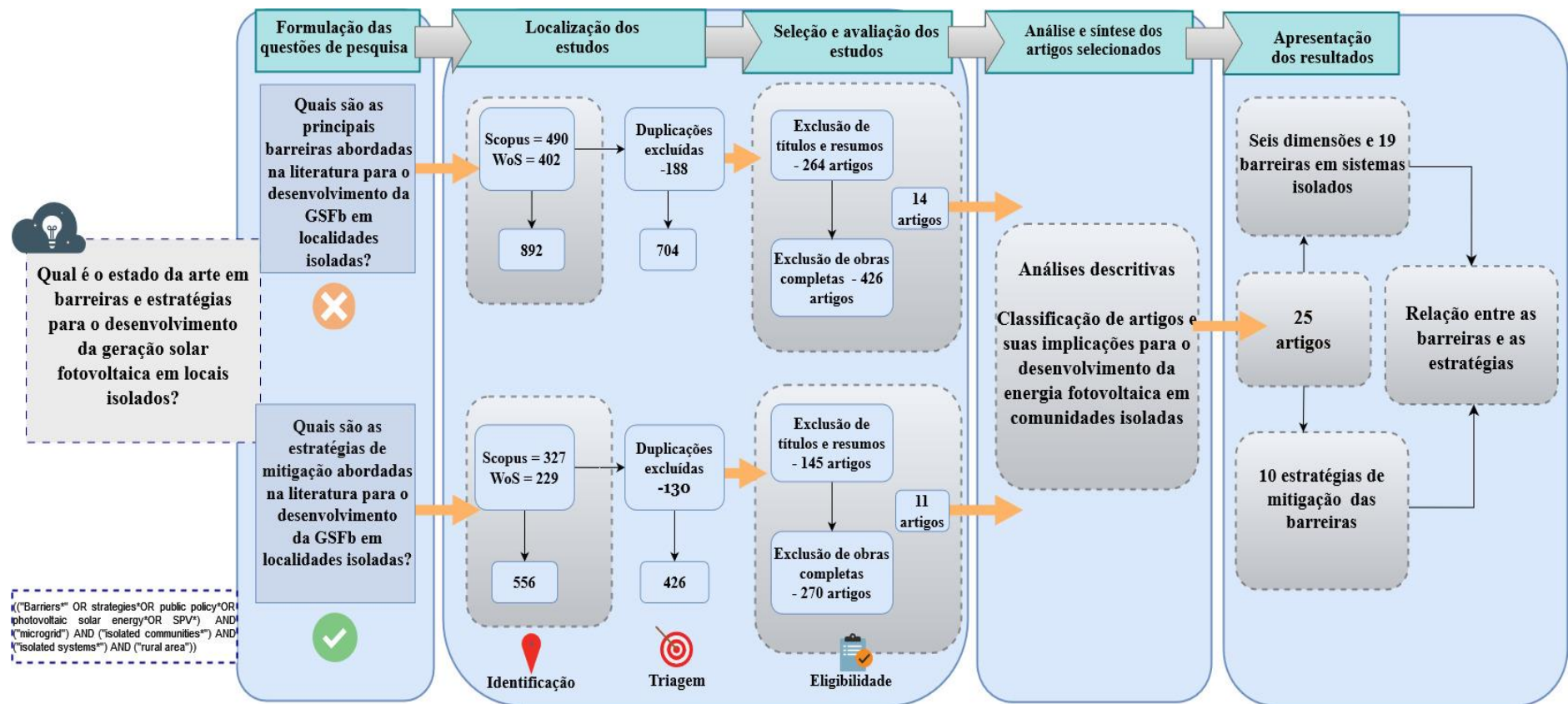


Figura 1: Estrutura da Revisão Sistemática da Literatura. **Fonte:** Adaptado de (CAIADO *et al.*, 2024; THOMÉ *et al.*, 2016)

Logo, na Tabela 3, foi realizada uma descrição dos objetivos e dimensões abordados em cada estudo selecionado para esta revisão sistemática de literatura. Ao analisar cuidadosamente as lacunas existentes nesse campo de pesquisa, especificamente em relação à identificação e caracterização das barreiras que impactam o GSFb em SIs, ficou evidente que, apesar dos esforços anteriores, ainda prevalecem atualmente inúmeros obstáculos significativos que dificultam e limitam o investimento, a adoção e a disseminação em larga escala da GSFb em comunidades e regiões não conectadas às redes convencionais de distribuição de eletricidade. Essa constatação reforça a necessidade de investigações mais profundas e abrangentes que identifiquem, categorizem e proponham estratégias para superar essas barreiras, a fim de viabilizar o aproveitamento do potencial da energia solar fotovoltaica em sistemas isolados.

Tabela 3: Estudos de literatura sobre identificação de barreiras e estratégias para o desenvolvimento de GSfb

Referência	Região	Objetivo específico	Dimensões	Barreiras Identificadas	Autores que consideram as barreiras
Luthra (2010)	Índia	Habilitadores de Energia Solar	Econômico e Social	B1, B2, B4, B7, B9, B12, B13	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021; ASANTE <i>et al.</i> , 2020; MISHRA; BEHERA, 2016; MOSTAFAEIPOUR <i>et al.</i> , 2021; ROBY, 2021; SHAH <i>et al.</i> , 2019; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022a)
Silva et al. (2010)	Brasil (Região Amazônica)	Descreve algumas políticas para promover o uso de fontes de energia renováveis em áreas isoladas	Econômico, Social, Técnico, Ambiental	B5, B6, B8, B14, B15, B17	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; GARLET <i>et al.</i> , 2019a; LIMA <i>et al.</i> , 2022; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
Clifton e Boruff (2010)	Austrália Ocidental	Identifica o potencial da energia solar para gerar eletricidade em uma região rural	Econômico, Social, Técnico, Ambiental e Político	B1, B3, B7, B9, B12, B13, B14, B16	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021; ASANTE <i>et al.</i> , 2020; GARLET <i>et al.</i> , 2019a; MOSTAFAEIPOUR <i>et al.</i> , 2021; SILVA <i>et al.</i> , 2010; SINDHU <i>et al.</i> , 2016)
Andrade et al.(2011)	Brasil (Região Amazônica)	Iniciativas e um panorama dos SIs na Amazônia	Econômico, Social, Logístico, Ambiental e Político	B1, B3, B6, B10, B13	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021; LUTHRA <i>et al.</i> , 2015; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022; MOSTAFAEIPOUR <i>et al.</i> , 2021; PALM, 2018a)
Ohunakin et al. (2014)	Nigéria	Examinam e discutem as perspectivas atuais para o uso da energia solar	Econômico, Social, Técnico e Político	B1, B3, B5, B10, B11, B13, B14, B15	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; GARLET <i>et al.</i> , 2019a)
Zhang et al. (2015)	China	Revê as alterações na política de geração fotovoltaica (DG PV) e analisa o seu efeito no mercado nacional	Econômico, Político e Técnico	B1, B3, B9, B10, B13	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; DE FARIA <i>et al.</i> , 2017)
Sindhu et al. (2016)	Índia	Identifica estratégias para o desenvolvimento da energia solar	Institucional; técnicas; social; cultural e comportamental;	B1, B3, B7, B12, B13, B15, B16	(ASANTE <i>et al.</i> , 2020, 2022a; DOORGA <i>et al.</i> , 2019)

Manju e Sagar (2017)	Índia	Resume uma revisão abrangente do potencial, status atual de desenvolvimento e perspectivas da energia solar	políticas e regulamentos; mercado; financeiro e alto custo de capital Mercado, Política, Financeira, Tecnológica, Informacional e Institucional	B1, B3, B13, B16	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; FRANCO; FRANCO, 2021; MOSTAFAEIPOUR <i>et al.</i> , 2021)
De Faria et al (2017)	Brasil	Descrevem as principais barreiras ao uso generalizado da geração solar e algumas recomendações de políticas	Técnico, Financeiro e Político	B1, B2, B7, B9, B10, B13, B16	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; GARLET <i>et al.</i> , 2019a; QUEIROZ <i>et al.</i> , 2020)
Wyllie et al. (2018b)	Barbados	Barreiras e desafios para a implementação da implantação de energia solar	Econômico, Social, Técnico e Político	B5, B11, B18	(ARCA <i>et al.</i> , 2023; HSUEH <i>et al.</i> , 2021; QUEIROZ <i>et al.</i> , 2020)
Palm (2018b)	Suécia	Analisaram mudanças ao longo do tempo em barreiras e motivos	Econômico e Técnico	B1, B2, B4, B7	(LUTHRA <i>et al.</i> , 2015; MANJU; SAGAR, 2017; PALM, 2018a; XUE <i>et al.</i> , 2021)
Doorga et al (2019)	Índia (ilha das Maurícias)	Perspectivas para instalações de fazendas solares	Político, Social, Técnico, Econômico, Ambiental e Cultural	B1, B2, B4, B7, B9, B10, B13	(MANJU; SAGAR, 2017; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022a; WYLLIE <i>et al.</i> , 2018a)
Garlet et al.(2019)	Brasil	Entender a difusão de energia fotovoltaica em países de economia emergente	Técnico, Econômico, Social, Gerencial e Político	B1, B6, B7	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022)
Raina (2019)	Índia	Define políticas associadas à geração de eletricidade através da energia solar	Técnico, Econômico, Social, Ambiental e Auxiliares	B1, B2, B7, B9, B13	(ARCA <i>et al.</i> , 2023; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a)
Queiroz et al. (2020)	Brasil	Identificam barreiras à expansão da energia solar fotovoltaica e medir seu impacto	Econômico, Social, Técnico, Ambiental e Político	B1, B4, B9, B11	(MOSTAFAEIPOUR <i>et al.</i> , 2021; PALM, 2018b; XUE <i>et al.</i> , 2021)

Ali Sadat et al. (2021)	Irã	Barreiras existentes no caminho do desenvolvimento da energia solar fotovoltaica	Sociais, Legislativas, Técnicas, Econômicas e Organizacionais	B1, B2, B3, B7, B9, B12, B13, B18	(PUNIA SINDHU et al., 2016; QUEIROZ et al., 2020; RAZMJOO et al., 2023)
Franco e Franco (2021)	Brasil	Investigam os impactos ambientais no setor industrial da energia solar fotovoltaica	Econômico, Ambiental e Político	B1, B2, B3, B7, B9, B10, B13, B16	(QUEIROZ et al., 2020; RAINA; SINHA, 2019; SILVA et al., 2010)
Hsueh et al. (2021)	China (Distrito de Congo, Província de Guangdong)	CrITÉrios para incluir a conservação da água da chuva e a geração de energia solar	Situação de participação, Capacidade de geração e Instalações de armazenamento	B1, B3, B7, B9, B12, B13, B15	(ARCA et al., 2023; RAINA; SINHA, 2019; RAZMJOO et al., 2023)
Xue et al. (2021)	Noruega	Desenhar uma solução de co-investimento, fornecer plataformas para compartilhar informações e criar novos incentivos	Econômico e Técnico	B1, B3, B8, B12, B14, B15	(FRANCO; FRANCO, 2021; RAZMJOO et al., 2023; SILVA et al., 2010)
Da Ponte et al. (2021)	Brasil (Região Amazônica)	Sugestões de políticas públicas para estimular o uso de fontes renováveis de energia	Econômico, Social, Técnico, Ambiental e Político	B1, B3, B7, B9, B13	(DA PONTE et al., 2021a; SALIMI et al., 2022)
Matsumoto e Matsumura (2022)	Japão (Ilha de Tsushima)	Quantificar os efeitos indiretos da promoção de energia renovável	Econômico, Social e Cultural	B5, B7, B9, B14, B15, B16	(ANDRADE et al., 2011; ASANTE et al., 2022a; DA PONTE et al., 2021a)
Salimi et al. (2022)	Estados Árabes Unidos	Propõe estratégias baseadas na produção e consumo de energia solar	Econômico, Social, Técnico e Político	B1, B2, B3, B7, B10, B11, B13, B18, B19	(ARCA et al., 2023; RAINA; SINHA, 2019; WU, Y. et al., 2022a)
Wu et al. (2022)	China	Propõe sugestões de melhoria que sejam benéficas para o desenvolvimento da energia fotovoltaica distribuída rural	Político, Econômico, Social e Tecnológico	B1, B2, B7, B9, B12, B13	(ASANTE et al., 2022a; RAZMJOO et al., 2023; WYLLIE et al., 2018a)
Razmjoo et al. (2023)	Turquia	Determinar áreas adequadas onde as usinas de energia solar podem ser estabelecidas em um distrito remoto	Político, Econômico, Social e Tecnológico	B1, B2, B4, B11	(DOORGA et al., 2019; WU, Y. et al., 2022a; XUE et al., 2021)

Arca et al.(2023)	Safranbolu, Turquia	Foram examinados quadros políticos nacionais e internacionais relevantes e identificadas limitações legais, bem como produzidas soluções sustentáveis.	Econômico, Ambiental, Social, Técnico e Político	B1, B3, B11, B13	(BEZERRA <i>et al.</i> , 2017; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; RAINA; SINHA, 2019)
-------------------	---------------------	--	--	------------------	--

Fonte: Elaboração própria

A tabela 3 mostra que os artigos selecionados abordam o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas de diferentes regiões do mundo, mas que há uma predominância de estudos sobre a Índia e o Brasil, especialmente a região amazônica. Esses países são considerados como potenciais mercados para a energia solar fotovoltaica, devido à sua alta radiação solar, à sua extensa área territorial e à sua grande população rural e isolada.

Os artigos selecionados têm diferentes objetivos específicos, que vão desde a identificação das barreiras e dos habilitadores para o desenvolvimento da GSFb até a proposição de políticas públicas e de critérios para a implantação de sistemas fotovoltaicos. Esses objetivos refletem as diferentes fases e desafios do processo de difusão e adoção da energia solar fotovoltaica em localidades isoladas, que envolve aspectos técnicos, econômicos, sociais, ambientais e políticos. A figura 2 mostra que esses aspectos são representados pelas palavras-chave mais usadas e conectadas na literatura sobre o tema.

Nos artigos selecionados consideram diferentes dimensões para analisar o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas, mas que nem todos os artigos contemplam todas essas dimensões. As dimensões mais frequentes são as econômicas, sociais, técnicas e políticas, enquanto as dimensões menos frequentes são as ambientais, culturais, jurídicas e gerenciais. Isso pode indicar uma lacuna na literatura sobre o tema, que pode não estar considerando todos os fatores relevantes para o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas. Por exemplo, a dimensão ambiental é importante para avaliar os impactos da energia solar fotovoltaica na biodiversidade e nos recursos naturais das regiões isoladas. A dimensão cultural é importante para compreender as percepções e as preferências das comunidades locais em relação à energia solar fotovoltaica. A dimensão jurídica é importante para definir os direitos e as responsabilidades dos agentes envolvidos na geração e no consumo da energia solar fotovoltaica. Por fim, na quinta etapa, é apresentada a resposta ao problema de pesquisa juntamente com a Qp formulada na primeira etapa.

2.1.1 Relação entre as barreiras e estratégias de mitigação

Para investigar a relação entre as barreiras e as estratégias propostas para mitigá-las, foi aplicada a técnica de Análise de Correspondência Simples (ACS) (BEH, 1997). Esta técnica multivariada permite a visualização das associações entre as variáveis categóricas em um espaço bidimensional, facilitando a interpretação dos

resultados (SOURIAL et al., 2010). Para validar os resultados da ACS, foram utilizadas as seguintes técnicas:

Teste Chi-square de independência: Antes de conduzir a ACS, foi verificada a existência de uma associação estatisticamente significativa entre as barreiras e as estratégias. O teste Chi-square de independência foi aplicado para avaliar se as frequências observadas na tabela de contingência diferem significativamente das frequências esperadas sob a hipótese nula de independência entre as variáveis. A estatística do teste Chi-square é calculada pela seguinte fórmula:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (1)$$

Onde:

χ^2 é o valor da estatística do teste qui-quadrado;

O_{ij} é a frequência observada na célula (i, j) da tabela de contingência;

E_{ij} é a frequência esperada na célula (i, j) , calculada como $(n_i \times n_j) / n$, onde n_i e n_j são os totais marginais da linha i e coluna j , respectivamente, e n é o total geral da tabela.

Análise de resíduos padronizados: Após a realização da ACS, os resíduos padronizados foram examinados para identificar as associações mais fortes entre as barreiras e as estratégias. Os resíduos padronizados foram calculados pela seguinte fórmula:

$$r_{ij} = \frac{O_{ij} - E_{ij}}{\sqrt{E_{ij}}} \quad (2)$$

Onde:

r_{ij} é o resíduo padronizado na célula (i, j) da tabela de contingência;

O_{ij} e E_{ij} são as frequências observadas e esperadas, respectivamente, na célula (i, j) .

Resíduos padronizados maiores que 1,96 (ou 2,58 para um nível de significância de 0,01) indicam associações significativas.

Interpretação dos resultados: Por fim, os resultados da ACS foram interpretados à luz do conhecimento teórico sobre as barreiras e estratégias. As associações encontradas foram verificadas quanto à sua coerência conceitual e alinhamento com a literatura existente. A aplicação dessas técnicas de validação permitiu uma análise mais robusta dos resultados obtidos pela ACS, garantindo a confiabilidade das

associações identificadas entre as barreiras e estratégias para o desenvolvimento da geração solar fotovoltaica com baterias em sistemas isolados da Amazônia.

Para complementar os resultados da análise de conteúdo foi utilizada a ferramenta UCINET para identificar padrões e tendências nas relações entre as palavras-chave por meio de co-ocorrências. Ademais, para complementar a análise bibliométrica, foi utilizada a ferramenta Bibliometrix (RODRÍGUEZ-SOLER *et al.*, 2020), um pacote de código aberto desenvolvido na linguagem de programação R (ARIA; CUCCURULLO, 2017). Essa ferramenta possibilitou a identificação de padrões e tendências nas citações dos artigos selecionados, permitindo visualizar os anos com maior número de publicações e citações dentro do escopo da revisão sistemática. A aplicação do Bibliometrix forneceu insights valiosos sobre a evolução temporal e o impacto das pesquisas relacionadas ao tema, auxiliando na compreensão do estado atual do conhecimento e das lacunas a serem exploradas em trabalhos futuros.

2.2.

Análise bibliométrica

Durante a primeira etapa, a QP1 da dissertação foi definida e derivada em duas questões específicas: QP1.1 “Quais são as principais barreiras abordadas na literatura para o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas?” e QP1.2 “Quais são as estratégias de mitigação abordadas na literatura para o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas?”. A partir dessa definição, partiu-se para a segunda etapa, que consistiu na busca dos artigos nas bases de dados Scopus e WoS. Foi utilizado o software UCINET (SABOT *et al.*, 2017) (Figura 2) para detectar as palavras que possuem maior uso e conectividade na literatura.

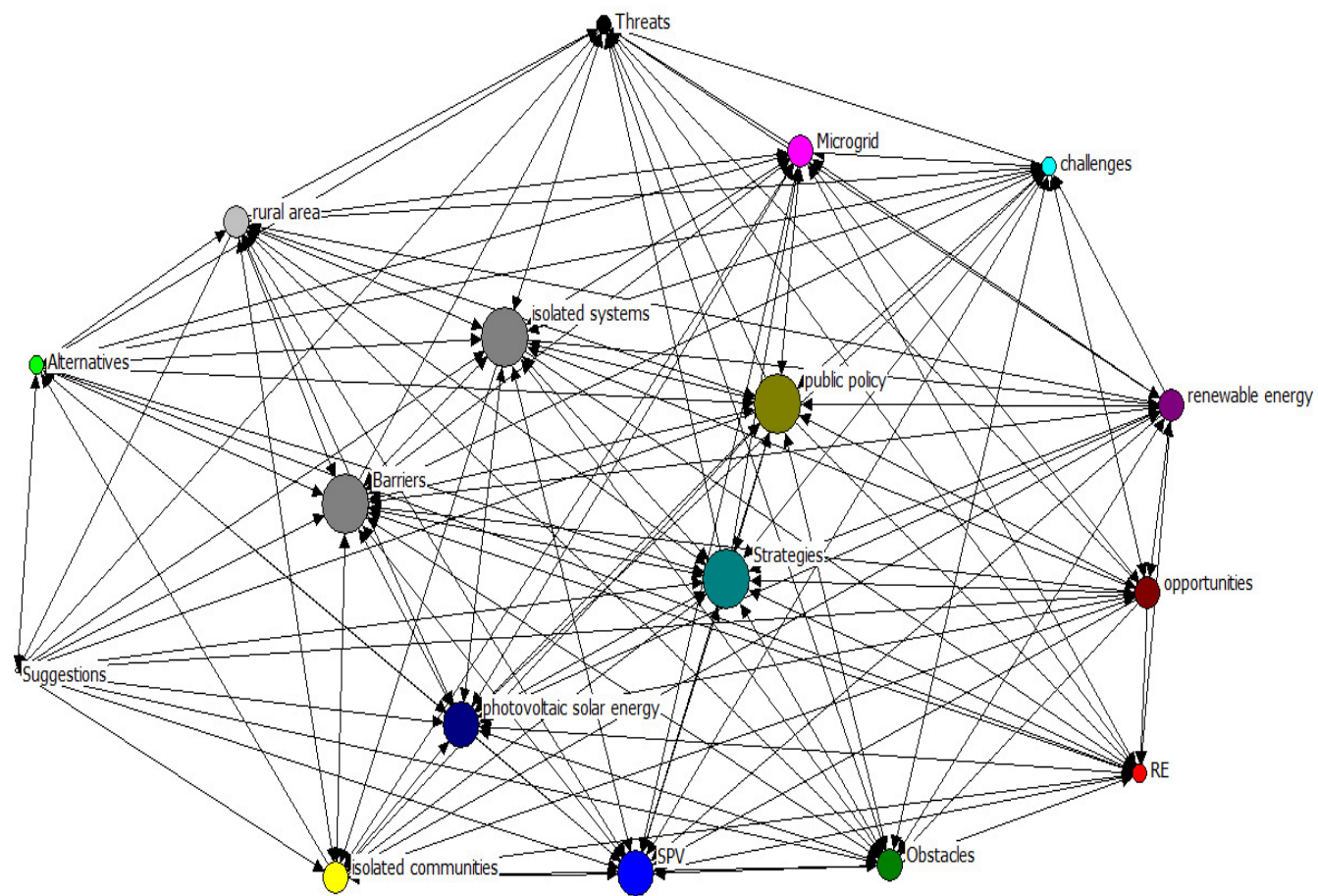


Figura 2: Palavras que possuem maior uso e conectividade na literatura. **Fonte:** Elaboração própria

A figura mostra que os nós com maior número de conectividade são as palavras que têm maior representatividade em pesquisas que identificam barreiras ao desenvolvimento da GSFb, estabelecendo como palavras-chave: "Barriers", "strategies", "photovoltaic solar energy", "SPV", "isolated communities", "isolated systems" and "rural area". Isso sugere que a literatura sobre o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas enfoca principalmente os desafios e as soluções relacionados à tecnologia, à infraestrutura e ao contexto geográfico dessas regiões. As palavras-chave identificadas pelo UCINET indicam que as barreiras mais abordadas são as limitações técnicas e econômicas dos sistemas fotovoltaicos, as dificuldades de integração e as características específicas das comunidades isoladas e das áreas rurais, que demandam estratégias adaptadas às suas necessidades e potencialidades. Essas palavras-chave também revelam que a GSFb é a principal fonte de energia renovável considerada para as localidades isoladas, o que reflete a sua viabilidade técnica e ambiental nesses cenários. Portanto, a análise mostra que a literatura sobre o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas tem um enfoque predominantemente tecnológico e geográfico, mas que também reconhece a importância de considerar os aspectos sociais, culturais e institucionais que influenciam a implantação e o funcionamento desses sistemas.

A investigação do estudo incluiu a leitura de 25 artigos, os quais foram publicados em um intervalo de tempo entre 2010 e 2023. O ano com maior número de publicações foi 2017 com 45 citações, em segundo lugar foi 2019 com 36 citações como mostra a Figura 3.



Figura 3: Citações de pesquisa por ano. **Fonte:** Elaboração própria

A análise bibliométrica revelou padrões significativos nas publicações sobre GSFb em localidades isoladas. O gráfico da Figura 3 mostra a evolução das citações ao longo do tempo, com um pico notável em 2017, possivelmente relacionado ao lançamento do programa "Mais Luz para a Amazônia". Esta observação levou a um exame mais detalhado das políticas e estratégias desenvolvidas neste período crítico, enriquecendo a compreensão do contexto regulatório para implementação de sistemas solares em áreas isoladas.

Entre as 25 publicações analisadas, destacam-se as revistas "*Renewable and Sustainable Energy Reviews*" e "*Energy Policy*", que juntas representam mais da metade dos artigos. A predominância destas publicações direcionou a atenção para fontes influentes e atualizadas, oferecendo discussões valiosas sobre barreiras técnicas, econômicas e sociais, bem como estratégias inovadoras.

Geograficamente, observou-se uma concentração de estudos no Brasil (7 publicações), Índia (4), China (3) e Turquia (2), com contribuições adicionais de outros países. Esta distribuição proporcionou insights sobre barreiras específicas enfrentadas em países em desenvolvimento com vastas áreas rurais, permitindo identificar desafios comuns e estratégias potencialmente aplicáveis ao contexto amazônico.

2.3.

Análise de conteúdo

A pesquisa sobre GSFb em SIs da Amazônia é um desafio multidimensional que exige uma abordagem holística. Diversos estudos têm contribuído para a compreensão das complexas barreiras e estratégias para o desenvolvimento da energia solar, levando em consideração diferentes dimensões: econômica e financeira, social e cultural, tecnológica, política e regulatória, logística, ecológica e geográfica.

No âmbito da dimensão econômica e financeira, Clifton e Boruff (2010) oferecem perspectivas inovadoras ao propor políticas que incluem incentivos financeiros eficazes. Essas políticas podem ser cruciais para superar as barreiras institucionais e econômicas que frequentemente impedem o avanço da energia solar.

No que diz respeito à dimensão social e cultural, estudos como os (FRANCO; FRANCO, 2021; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022) aprofundam a análise

dos impactos ambientais e econômicos da energia solar. Ao considerar oportunidades e desafios, essas pesquisas destacam a necessidade de adaptações que respeitem as particularidades culturais e sociais das comunidades amazônicas. No campo tecnológico, as barreiras identificadas por (SILVA *et al.*, 2010; WU, Y. *et al.*, 2022a) na energia fotovoltaica rural chamam a atenção para desafios específicos que exigem soluções inovadoras. Enquanto isso, Da Ponte *et al.* (2021) avançam na direção das soluções políticas, sugerindo medidas para promover fontes de energia sustentáveis em sistemas isolados no Brasil, abordando assim questões tanto tecnológicas quanto políticas.

A dimensão política e regulatória é abordada por vários estudos, como o de Raina (2019) que examina políticas vigentes como estratégias para eliminar as barreiras associadas à geração de eletricidade por meio de energia solar, e Xue *et al.* (2021) que aprofundam a investigação das principais barreiras à difusão da Energia Solar Fotovoltaica (ESF) e analisam políticas e modelos solares em diferentes contextos. Na dimensão logística, a pesquisa de Arca *et al.* (2023) destaca a importância da identificação de áreas adequadas para usinas de energia solar, levando em consideração aspectos logísticos e ecológicos. Isso ressalta a necessidade de uma abordagem holística que integre considerações logísticas e ambientais.

Por fim, a dimensão geográfica e ecológica é crucial para a pesquisa na Amazônia. Silva *et al.* (2010) e Andrade *et al.* (2011) abordam a gestão da energia solar em localidades remotas da Amazônia, destacando a complexidade de adaptar tecnologias solares aos desafios geográficos e ecológicos únicos da região. Isso ressalta a importância crítica de considerar a geografia única da Amazônia em qualquer esforço de desenvolvimento da energia solar, desde a seleção de locais de implantação até a logística de abastecimento e manutenção.

Em síntese, as investigações abordando diferentes dimensões oferecem um entendimento mais amplo e integrado das complexas barreiras e oportunidades relacionadas ao desenvolvimento da energia solar na Amazônia. Integrar esses conhecimentos em uma abordagem multidisciplinar é essencial para o sucesso das estratégias de mitigação adaptadas às características específicas de cada localidade amazônica.

2.3.1.

Identificação de barreiras de GSFb em SIs

A partir da revisão observa-se que a literatura sobre barreiras para o desenvolvimento de GSFb em SIs ainda é limitada. Para a presente análise do contexto das SIs da Amazônia, as barreiras foram agrupadas nas seis dimensões a seguir:

- **Econômica e financeira:** Esta é a dimensão que analisa os custos de investimento e operação dos sistemas fotovoltaicos isolados, bem como os benefícios econômicos e sociais que eles podem gerar para as comunidades atendidas.
- **Social e cultural:** Esta é a dimensão que avalia como os sistemas fotovoltaicos isolados podem influenciar a qualidade de vida, o comportamento, a participação e a identidade cultural das comunidades beneficiadas.
- **Tecnológica:** Esta é a dimensão que verifica a disponibilidade, a qualidade, o desempenho, a eficiência e a inovação das tecnologias empregadas nos sistemas fotovoltaicos isolados, bem como sua compatibilidade e integração com outras fontes de energia.
- **Política e regulatória:** Esta é a dimensão que examina o conjunto de leis, normas, políticas públicas e instituições que regulam, orientam e apoiam o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica em sistemas isolados.
- **Ecológica e geográfica:** Esta é a dimensão que observa os aspectos ambientais e territoriais que condicionam ou são impactados pelos sistemas fotovoltaicos isolados, tais como a radiação solar, o clima, o relevo, a vegetação, a biodiversidade, o uso do solo e as emissões de gases.
- **Logística:** Esta é a dimensão que considera os desafios operacionais envolvidos no transporte, na instalação, na manutenção e na gestão dos sistemas fotovoltaicos isolados, levando em conta as condições de infraestrutura, acesso, mão-de-obra e segurança das áreas atendidas.

A identificação de indicadores para seleção de barreiras é um passo importante para promover o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica (KARAKAYA; SRIWANNAWIT, 2015). Estes indicadores podem ser usados para classificar as barreiras com base na sua importância, impacto e viabilidade (JONES, 2017). Esta

informação pode ajudar os investigadores e as partes interessadas a desenvolver estratégias mais eficazes para superar barreiras e promover a implantação desta tecnologia (WU *et al.*, 2022a). Os indicadores que são levados em consideração para avaliar as barreiras que afetam o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica em sistemas isolados são os seguintes:

Gravidade: ou “As barreiras mais sérias são aquelas que têm um impacto significativo no custo, na viabilidade ou na adoção da tecnologia”(JONES, 2017).

Impacto: o “As barreiras com maior impacto são aquelas que impedem que a tecnologia seja implantada em escala ou chegue aos usuários que mais precisam dela”(JONES, 2017).

Viabilidade: o “As barreiras mais viáveis são aquelas que podem ser superadas com ações específicas ou políticas públicas”(JONES, 2017).

Seguem-se alguns exemplos de indicadores que podem ser utilizados para avaliar barreiras:

Gravidade

- Custo dos sistemas fotovoltaicos
- Disponibilidade de recursos humanos qualificados
- Percentagem do IDH comunitário
- Percentagem de população isolada sem acesso à electricidade
- Condições climáticas extremas
- Densidade populacional

Impacto

- Disponibilidade de financiamento
- Percentual do PIB dedicado à energia solar fotovoltaica
- Barreiras logísticas e de transporte
- Infraestrutura da rede elétrica
- Existência de políticas públicas de apoio à energia solar fotovoltaica
- Participação da comunidade
- Condições sociais e culturais
- Impacto ambiental
- Percentagem de subsídio do custo total de um sistema isolado

Viabilidade

- Disponibilidade de recursos solares

- Tecnologias emergentes
- Modelos de negócios inovadores

Considerando a classificação dos indicadores relacionados às barreiras identificadas nos artigos analisados e o nível de importância atribuído a cada barreira, realizou-se uma categorização das barreiras que afetam o desenvolvimento da Geração Solar Fotovoltaica com Baterias (GSFb) com base aos três critérios principais. Esta abordagem multidimensional permitiu uma análise mais nuançada e contextualizada das barreiras, fornecendo insights valiosos para a formulação de estratégias de mitigação mais eficazes e direcionadas. Ao considerar não apenas a importância isolada de cada barreira, mas também seu impacto prático e a viabilidade de sua superação, foi possível priorizar as barreiras mais críticas e identificar aquelas que oferecem oportunidades mais imediatas de intervenção. Após análise das dimensões referentes aos SIs da Amazônia e os indicadores que podem ser utilizados para avaliar barreiras para , foram obtidas 19 barreiras na pesquisa, estas estão descritas (conforme Tabela 4).

Tabela 4: Dimensões, barreiras e indicadores da GSFb em SIs

Dimensões	Barreiras	Descrição	Indicadores	Classificação	Referência
D1 Econômico e financeiro	B1 Alto custo de capital para consumidores de baixa renda	A Energia Solar Fotovoltaica nos últimos anos baixou seu preço de mercado, mas ainda é de difícil acesso para pessoas de baixa renda. Além disso o custo das baterias é um dos principais fatores que encarecem os SIs, pois elas são responsáveis por armazenar a energia gerada pelos painéis solares para ser usada quando não há sol.	I1 Custo dos sistemas fotovoltaicos	Gravidade	(ADHIKARI <i>et al.</i> , 2008; GALDINO, 2012; MIRZA <i>et al.</i> , 2009; PALM, 2018; PUNIA SINDHU <i>et al.</i> , 2016; WU <i>et al.</i> , 2022; YONG <i>et al.</i> , 2019)
	B2 Falta de mecanismo de financiamento	A falta de acesso fácil a opções de financiamento é uma grande barreira para as localidades isoladas devido à insuficiência de instituições de financiamento.	I2 Disponibilidade de financiamento	Viabilidade	(MISHRA; BEHERA, 2016; SHEIKH, 2010)
	B3 Subsídios inadequados	Isso ocorre quando não são consideradas as especificidades e necessidades dessas localidades; não garantem equidade e justiça social na distribuição dos benefícios e custos da energia solar fotovoltaica, evitando que consumidores de baixa renda ou de regiões isoladas sejam prejudicados ou excluídos.	I3 Percentual de subsídio sobre o custo total de um sistema isolado	Viabilidade	(ASANTE <i>et al.</i> , 2020; DUKU <i>et al.</i> , 2011; GBONEY, 2009; LUTHRA <i>et al.</i> , 2015; SHAH <i>et al.</i> , 2019)
	B4 Longo período de recuperação	A principal explicação para esse fenômeno é o alto custo em relação às fontes de energia tradicionais. Além disso, o período de recuperação do investimento depende de vários fatores, tais como: O custo inicial do equipamento (painéis solares, baterias, inversores, etc.); a capacidade e eficiência da equipe; a radiação solar disponível na região; consumo comunitário de eletricidade; a tarifa de energia elétrica praticada pela distribuidora ou concessionária local, bem como os incentivos fiscais e econômicos existentes para energia solar fotovoltaica em localidades isoladas. Pode-se dizer que no caso da energia solar fotovoltaica, o uso de baterias aumenta o custo e o tempo de recuperação do investimento em energia solar fotovoltaica, pois as baterias são caras, ocupam espaço, requerem manutenção e possuem vida útil limitada.	I4 Período de recuperação	Gravidade	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021a; BAZILIAN <i>et al.</i> , 2013; JAHANGOSHAI REZAEI <i>et al.</i> , 2019; MAH <i>et al.</i> , 2018; PAINULY, 2001)

D2 Social e Cultural	B5	Baixo consumo de energia pelas localidades	Moradores isolados de baixa renda têm um padrão de baixo consumo de energia que oferece pouco retorno sobre o investimento neste setor. O consumo médio de energia elétrica por habitante nos SIs é de cerca de 100 kWh/mês, o que é inferior à média nacional, que é de cerca de 160 kWh/mês. O consumo de energia em localidades isoladas depende de vários fatores, como: disponibilidade e qualidade do serviço elétrico da região; a capacidade de pagamento e o nível de renda das famílias; o grau de desenvolvimento e diversificação das atividades produtivas e sociais; acesso e uso de equipamentos domésticos e eletrônicos; bem como a cultura e os hábitos de consumo de energia das localidades.	I5	Consumo de energia por localização	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; EPE, 2022; GARLET <i>et al.</i> , 2019; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
	B6	Falta de condições de emprego	A economia das comunidades dos SIs tem um forte componente extrativista e um baixo índice de industrialização aliado à falta de infraestrutura básica. O emprego e a renda em localidades isoladas dependem de vários fatores, tais como: a disponibilidade e a qualidade do serviço de energia elétrica na região; a capacidade de pagamento e o nível de renda das famílias; o grau de desenvolvimento e diversificação das atividades produtivas e sociais; o acesso e o uso de tecnologias e equipamentos produtivos; a cultura e os hábitos de trabalho e consumo das localidades. Com o acesso à energia elétrica de qualidade, renovável e sustentável, essas localidades podem aumentar seu emprego e renda e melhorar sua qualidade de vida, sem comprometer o meio ambiente ou a sua cultura.	I6	Taxa de desemprego	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; FERREIRA <i>et al.</i> , 2018; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022; PORTALDOAMAZONAS, 2023)
	B7	Falta de conhecimento específico sobre a tecnologia solar fotovoltaica	A falta de conhecimento da operação e gestão da tecnologia, bem como a disponibilidade limitada de peças sobressalentes e experiência em manutenção são os poucos obstáculos à adoção de tecnologias de energia renovável/sustentável.	I7	Nível de conhecimento sobre energia solar fotovoltaica	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; ASANTE <i>et al.</i> , 2020; DOUKAS <i>et al.</i> , 2009; SILVA <i>et al.</i> , 2010)

D3 Técnicas	B8 Falta de capacidade de pagamento do consumidor	Muitas famílias não conseguem pagar suas contas de energia, nem mesmo os valores nominais cobrados daqueles classificados como Baixa Renda. A renda das famílias é baixa e irregular, dependendo da atividade econômica que exercem, como agricultura, extrativismo ou pesca. O custo da energia solar fotovoltaica com baterias é alto, pois envolve a compra e instalação dos painéis solares, dos inversores, dos controladores de carga e das baterias, além da manutenção periódica dos equipamentos. A disponibilidade de crédito ou financiamento é limitada ou inexistente, pois as localidades isoladas não têm acesso aos bancos ou às instituições financeiras que oferecem linhas de crédito para energia solar.	I8 Nível de renda da população	Gravidade	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; ARAÚJO, 2015; ASANTE <i>et al.</i> , 2020; FRONDEL <i>et al.</i> , 2010; INCE <i>et al.</i> , 2016; VIARDOT, 2013)
	B9 Falta de mão de obra técnica especializada	A falta de uma estrutura regulatória forte dificulta o investimento em energia renovável e impede o desenvolvimento da tecnologia. A oferta de profissionais qualificados é escassa ou inacessível, pois há poucas instituições de ensino ou capacitação que ofereçam cursos ou treinamentos sobre energia solar fotovoltaica com baterias nas localidades isoladas. A mobilidade dos profissionais é limitada ou difícil, pois há barreiras geográficas, logísticas e de infraestrutura que dificultam o acesso e o transporte dos técnicos e dos equipamentos até as localidades isoladas. A atualização dos profissionais é deficiente ou insuficiente, pois há poucas fontes de informação ou de atualização técnica sobre as novidades e as tendências do setor de energia solar fotovoltaica com baterias.	I9 Disponibilidade de recursos humanos qualificados	Viabilidade	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021a; ASANTE <i>et al.</i> , 2020; KAHRAMAN <i>et al.</i> , 2009; ROBY, 2021; SHAH <i>et al.</i> , 2019)
	B10 Disponibilidade limitada de infraestrutura de conexão à rede elétrica	Infraestrutura aqui refere-se às instalações físicas das redes de transmissão e distribuição, mas também aos equipamentos e serviços necessários às companhias elétricas: A distância entre as localidades e os centros urbanos, que torna inviável ou muito caro o transporte e a instalação de cabos, postes, transformadores e outros	I10 Disponibilidade de infraestrutura de ligação à rede elétrica	Impacto	(ACKAH; ASOMANI, 2015; ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021; DUKU <i>et al.</i> , 2011; GARLET <i>et al.</i> , 2019; LUTHRA <i>et al.</i> , 2015; MARAFÃO <i>et al.</i> , 2018;

		equipamentos necessários para a distribuição de energia. A dificuldade de acesso às localidades, que muitas vezes estão localizadas em áreas de difícil acesso, como florestas, montanhas, ilhas ou desertos, que exigem meios de transporte especiais ou adaptações técnicas para a conexão à rede. A baixa demanda por energia elétrica nas localidades, que não justifica o investimento das empresas distribuidoras ou do poder público para levar a infraestrutura de conexão até elas, pois o retorno financeiro seria muito baixo ou nulo.		PAINULY, 2001; WU <i>et al.</i> , 2022)
	B11 Falta de sistemas de armazenamento	A principal desvantagem da geração intermitente em áreas isoladas, onde não há outra fonte de energia, é a necessidade de sistemas de armazenamento para garantir o fornecimento de energia elétrica o tempo todo. A energia solar fotovoltaica só pode ser gerada durante o dia e quando há incidência de luz solar. Se não houver um sistema de armazenamento, como baterias, a energia gerada durante o dia não poderá ser usada à noite ou em dias nublados. Isso pode comprometer a qualidade e a confiabilidade do serviço de energia elétrica nas áreas isoladas, que não podem contar com a rede elétrica para suprir as eventuais falhas ou insuficiências da geração intermitente.	I11 Disponibilidade de sistemas de armazenamento	(ALI SADAT <i>et al.</i> , 2021; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021; DAI <i>et al.</i> , 2018; HORVÁTH; SZABÓ, 2018; PAINULY, 2001; WU <i>et al.</i> , 2022)
			Viabilidade	
D4 Político e Regulatório	B12 Procedimentos burocráticos de permissão dos direitos da terra e da água	O processo de aprovação do governo para adquirir terras, garantir água e estabelecer instalações ambientais é demorado, aumentando o período de gestação de projetos de Energia Renovável. Segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), os serviços oferecidos pela ANEEL, associados às Centrais Geradoras Fotovoltaicas, são regulados pela Resolução Normativa nº 876, de 10 de março de 2020, e subsidiariamente, por outros normativos. A página da ANEEL contém os documentos que devem ser enviados para a ANEEL, junto com a carta de encaminhamento, para solicitação de cada serviço relacionado à Central Geradora Fotovoltaica.	I12 Complexidade dos procedimentos burocráticos	(ASANTE <i>et al.</i> , 2022; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2020; MIRZA <i>et al.</i> , 2009; SHAH <i>et al.</i> , 2019; SINDHU <i>et al.</i> , 2016; TIMILSINA; SHAH, 2016)
			Viabilidade	

D5 Ecológico e Geográfico	B13 Falta de política de geração renovável voltadas para a Amazônia	A política de desenvolvimento voltada para essas localidades deve se basear em soluções viáveis e sustentáveis baseadas no profundo conhecimento e entendimento da Amazônia, sua vegetação, potencialidades, características e vocação de cada comunidade, além das lições aprendidas em projetos anteriores. Apesar de a Amazônia produzir 26% da energia elétrica do país, por meio de usinas hidrelétricas, cerca de 1 milhão de pessoas ainda vivem sem acesso à luz ou dependem de geradores a diesel. Essa situação gera impactos sociais, econômicos e ambientais negativos, como a vulnerabilidade das populações, a emissão de gases poluentes e o desmatamento da floresta.	I13 Existência de políticas públicas de apoio à energia solar fotovoltaica	Viabilidade	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; LUTHRA <i>et al.</i> , 2015; MOSTAFAEIPOUR <i>et al.</i> , 2021; PAINULY, 2001; SINDHU <i>et al.</i> , 2016)
	B14 Localidade distantes e com acesso limitado	Tendo em vista que a região amazônica abriga um grande número de localidades isoladas, com diferentes características socioculturais e geográficas, o acesso aos serviços de energia deve ser implementado de forma diferente da geração e distribuição. As concessionárias são as empresas responsáveis por fornecer energia elétrica aos consumidores finais. Elas enfrentam vários desafios para atender as localidades isoladas, como os altos custos de instalação e manutenção dos sistemas de geração e distribuição, agravados pelas longas distâncias a serem percorridas. Além disso, as concessionárias também têm que lidar com questões ambientais, sociais e regulatórias, como o licenciamento ambiental, a consulta prévia às localidades afetadas e o cumprimento das normas da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL).	I14 Localização das cidades	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
	B15 Condições climáticas	Para a energia solar, as horas do dia são limitadas, levando em consideração as condições úmidas da região amazônica, a energia solar é intermitente junto com uma distribuição geográfica desigual dos recursos solares. As condições climáticas podem impactar na performance de geração da energia solar, pois no período úmido o volume de chuvas é	I15 Condições climáticas extremas	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; SILVA <i>et al.</i> , 2010)

D6 Logística	B16	Impacto no meio ambiente	elevado. Isso pode reduzir a incidência de radiação solar sobre os painéis fotovoltaicos, diminuindo a eficiência e a produtividade dos sistemas de geração solar. Além disso, as chuvas também podem causar danos aos equipamentos, como corrosão, curto-circuito ou deslocamento dos painéis. As baterias e módulos são componentes essenciais para o funcionamento dos sistemas de geração de energia solar, que é uma fonte renovável, limpa e abundante. No entanto, quando esses componentes se tornam obsoletos ou danificados, eles podem gerar resíduos perigosos que contêm metais pesados, como chumbo, mercúrio, cádmio e níquel. Esses metais podem causar danos à saúde humana e ao meio ambiente, se não forem descartados de forma adequada. O descarte incorreto de baterias e módulos pode contaminar o solo, a água e o ar, afetando a fauna, a flora e a qualidade de vida das pessoas. Além disso, o descarte incorreto de baterias e módulos também implica em desperdício de recursos naturais e energéticos que poderiam ser reaproveitados ou reciclados.	I16	Impacto ambiental	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; CALDAS <i>et al.</i> , 2017; COELHO; VALDÉS SERRA, 2018; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021; GARLET <i>et al.</i> , 2019; RAMACHANDRA <i>et al.</i> , 2011; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
	B17	Dificuldade de acesso às localidades	As localidades isoladas da Amazônia legal são, em sua maioria, de difícil acesso, longe das redes de distribuição de energia elétrica, água, saneamento, saúde, educação e outros serviços essenciais. Essas localidades podem ser rurais, indígenas, quilombolas, ribeirinhas ou outras. A dificuldade de acesso envolve grandes distâncias, tempos, custos, precárias condições de vias e transportes, com variação sazonal diferenciada, conforme fluxos fluviais ou rodovias precárias. Essa situação afeta negativamente a qualidade de vida, o desenvolvimento e o bem-estar dessas populações. Nestas viagens, podem ser causados danos a equipamentos frágeis como painéis fotovoltaicos.	I17	Disponibilidade de infraestrutura logística	Impacto	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021; LIMA <i>et al.</i> , 2022; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
	B18	Falta de infraestrutura	Em algumas localidades da Amazônia legal são de baixíssimas condições econômicas e outras têm uma cultura	I18	Disponibilidade de infraestrutura	Viabilidade	(PUNIA SINDHU <i>et al.</i> , 2016; SHAH <i>et al.</i> , 2019;

para armazenamento de baterias		indígena fortemente marcada, por isso as casas são construídas com materiais naturais, o que dificulta o armazenamento de baterias para captação de energia solar.	para armazenamento de baterias		SINDHU <i>et al.</i> , 2016; WU <i>et al.</i> , 2022)
B19 Área de instalação	de	A Amazônia Legal apresenta uma vasta paisagem altamente preservada para evitar o desmatamento, por isso existem intrincadas localidades que não possuem extensas terras para a instalação de painéis fotovoltaicas.	I19 Disponibilidade de terreno	Viabilidade	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; SILVA <i>et al.</i> , 2010; WU <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Elaboração própria

A tabela 4 mostra as barreiras para a energia solar fotovoltaica com baterias em localidades isoladas da Amazônia, em seis dimensões: econômica, social, técnica, política, ecológica e logística. Essas barreiras dificultam o uso dessa tecnologia, que é complexa e multidimensional, envolvendo vários indicadores próprio dos SIs. A literatura consultada mostra que há uma grande diversidade de estudos que abordam esses aspectos, tanto em nível nacional quanto internacional, mas também há lacunas e limitações que precisam ser superadas. Alguns deles são: a falta de dados sobre as localidades isoladas; a necessidade de adaptar a tecnologia à realidade dessas regiões; o difícil acesso e transporte dos equipamentos e profissionais; o alto custo e o tempo de retorno do investimento; a falta de financiamento, subsídios, conhecimento, capacitação e política para a energia solar; o impacto ambiental do descarte das baterias e módulos; entre outros.

A tabela 4 pode ser usada como um instrumento de diagnóstico, planejamento, monitoramento e avaliação dos projetos de GSFb em localidades isoladas. Também pode contribuir para o desenvolvimento de estratégias que possam superar ou minimizar as barreiras existentes e maximizar os benefícios esperados.

2.3.2.

Identificação de estratégias de mitigação das barreiras

Além disso, neste trabalho também buscou-se identificar as principais estratégias para a mitigação de barreiras para o desenvolvimento da GSFb em SIs. A partir dessa revisão, também se analisaram propostas de estratégias para mitigação das barreiras. Desse modo, considerando os aspectos técnicos, financeiros, regulatórios e participativos envolvidos, as principais estratégias para o desenvolvimento da GSFb em SIs (tabela 5):

Tabela 5: Estratégias de mitigação das barreiras de GSFb

Estratégias	Descrição	Dimensões abordadas	Referências
E1	Viabilizar a aquisição de equipamentos de energia solar fotovoltaica é buscar parcerias com organizações públicas ou privadas que possam oferecer subsídios, doações ou descontos, além de criar e fortalecer mecanismos de cooperação financeira entre os moradores das localidades isoladas, como cooperativas, associações ou fundos comunitários, que possam facilitar o acesso ao crédito e à poupança	Econômica e Financeira, Social e Cultural	(PUNIA SINDHU <i>et al.</i> , 2016; RAINA; SINHA, 2019; SILVA <i>et al.</i> , 2010; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022b).
E2	Aumentar a confiabilidade e a eficiência dos sistemas de energia solar fotovoltaica é criar ou fortalecer redes de apoio técnico e social entre as localidades isoladas que utilizam essa fonte de energia. Essas redes podem interligar vários sistemas de geração e consumo de energia elétrica em uma mesma localidade isolada ou em localidades vizinhas, facilitando a troca de experiências, informações e soluções	Social e Tecnológica, Cultural,	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; RAINA; SINHA, 2019; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022b).
E3	Garantir a qualidade e a sustentabilidade dos sistemas de energia solar fotovoltaica é investir na formação e na capacitação de mão de obra técnica local, por meio de parcerias com instituições de ensino, organizações não governamentais, empresas do setor ou entidades públicas	Social e Tecnológica, Cultural,	(RAINA; SINHA, 2019; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
E4	Reduzir o custo e aumentar a vida útil dos sistemas de armazenamento de energia solar fotovoltaica é buscar soluções tecnológicas que possam melhorar o desempenho desses sistemas, como por exemplo, o uso de baterias de íons de lítio, que são mais leves, compactas e duráveis do que as baterias convencionais de chumbo-ácido	Tecnológica	(SILVA <i>et al.</i> , 2010; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022b)
E5	Facilitar a implantação dos projetos de energia solar fotovoltaica nas localidades isoladas é buscar a orientação e o apoio de órgãos públicos ou entidades privadas que possam auxiliar na obtenção dos documentos e licenças necessários para a execução dos projetos	Política e Regulatória, Logística	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021b; REBUCAS <i>et al.</i> , 2024; SHYU, 2023)
E6	Estimular e orientar o desenvolvimento e a expansão da energia solar fotovoltaica nas localidades isoladas da Amazônia é estabelecer metas, incentivos, normas e regulamentos que possam favorecer essa fonte de energia, considerando os aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais envolvidos	Política e Regulatória	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; PUNIA SINDHU <i>et al.</i> , 2016; SILVA <i>et al.</i> , 2010; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022b)
E7	Gerar emprego e renda local com a energia solar fotovoltaica é melhorar as condições de emprego e capacitar e qualificar os moradores das localidades isoladas para atuarem na instalação, operação, manutenção e gestão dos sistemas de energia solar fotovoltaica	Social e Cultural	(PUNIA SINDHU <i>et al.</i> , 2016; SILVA <i>et al.</i> , 2010)
E8	Proteger os equipamentos de energia solar fotovoltaica dos danos causados pelas chuvas ou outras intempéries é utilizar sistemas de proteção e de manutenção que possam prevenir ou corrigir esses danos	Ecológica e Geográfica, Tecnológica	(RAINA; SINHA, 2019; RAZMJOO <i>et al.</i> , 2023; WU, Y. <i>et al.</i> , 2022b)

E9	Aproveitar as estruturas existentes nas localidades isoladas para fixar os painéis fotovoltaicos é utilizar sistemas de geração integrada ou adaptada, que possam utilizar telhados, paredes, postes, árvores ou outras superfícies como base ou suporte para os painéis, evitando a necessidade de construir novas estruturas	Logística, Ecológica e Geográfica	(ARCA <i>et al.</i> , 2023; RAINA; SINHA, 2019; RAZMJOO <i>et al.</i> , 2023)
E10	Facilitar o transporte e a instalação dos sistemas de geração de energia solar fotovoltaica nas localidades isoladas é utilizar sistemas de geração modular ou compacta, que possam ser facilmente transportados e instalados nas localidades isoladas, utilizando meios de transporte adequados à realidade local, como barcos, aviões, helicópteros ou veículos terrestres	Logística	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2011; RAZMJOO <i>et al.</i> , 2023)

Fonte: Elaboração própria

A implementação bem-sucedida da GSFb em SIs da Amazônia requer a adoção de estratégias de mitigação de barreiras específicas para superar os desafios únicos enfrentados nesse contexto. No entanto, é importante destacar que essas estratégias são diretrizes gerais e que sua implementação eficaz requer adaptação às condições específicas de cada localidade na Amazônia. Pesquisas adicionais são essenciais para identificar as abordagens mais adequadas e personalizadas para cada comunidade, levando em consideração não apenas as dimensões econômicas e tecnológicas, mas também as sociais, culturais, políticas, ecológicas e geográficas que caracterizam a região. Portanto, é imperativo que os esforços de pesquisa continuem a se concentrar na Amazônia, a fim de desenvolver estratégias precisas e sustentáveis para a promoção da energia solar nessa área única e desafiadora.

2.3.3. Resultados da relação entre as barreiras e estratégias

A matriz de contingência, representada na Tabela 6, serviu como base para a análise. A Tabela 6 mostra a frequência com que cada estratégia (E1 a E10) é citada como forma de mitigar cada barreira (B1 a B19), com base nas referências fornecidas.

Tabela 6: Matriz de contingência

Barreiras	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
B1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B2	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B4	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B5	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
B6	0	5	3	0	0	0	2	0	0	0
B7	0	5	3	0	0	0	0	0	0	0
B8	4	0	0	0	0	0	2	0	0	0
B9	0	0	4	0	0	0	2	0	0	0
B10	0	3	0	0	0	4	0	0	0	0
B11	0	0	0	2	0	4	0	0	0	0
B12	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0
B13	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
B14	0	3	0	0	1	0	0	3	3	3
B15	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0

B16	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0
B17	0	0	0	0	1	0	0	0	0	3
B18	0	0	0	2	0	4	0	0	0	0
B19	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0

Fonte: Elaboração própria

A estatística qui-quadrado calculada (456,41) indica uma forte evidência contra a hipótese de independência entre as barreiras e as estratégias (TALLARIDA; MURRAY, 1987). Valores mais baixos indicam maior similaridade, enquanto valores mais altos sugerem diferenças nos perfis de estratégia (IRFAN *et al.*, 2021). Essas informações ajudam a identificar grupos de barreiras que compartilham estratégias comuns. A matriz de distância qui-quadrado na Figura 4 revela padrões de similaridade e diferença entre as barreiras. Valores mais baixos indicam perfis de estratégia similares, enquanto valores mais altos sugerem diferenças notáveis. Essas informações são cruciais para identificar grupos de barreiras que compartilham abordagens estratégicas comuns.



	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15
0	0	0	0	0	322	287	296	160	346	277	319	309	312	293	479
1	0	0	0	0	322	287	296	160	346	277	319	309	312	293	479
2	0	0	0	0	322	287	296	160	346	277	319	309	312	293	479
3	0	0	0	0	322	287	296	160	346	277	319	309	312	293	479
4	322	322	322	322	0	171	148	306	342	176	316	305	308	245	477
5	287	287	287	287	171	0	92	221	173	177	280	268	271	225	454
6	296	296	296	296	148	92	0	279	220	177	289	278	281	230	460
7	160	160	160	160	306	221	279	0	266	259	304	293	296	276	469
8	346	346	346	346	342	173	220	266	0	301	340	330	333	316	493
9	277	277	277	277	176	177	177	259	301	0	198	160	132	216	448
10	319	319	319	319	316	280	289	304	340	198	0	211	185	286	475
11	309	309	309	309	305	268	278	293	330	160	211	0	126	254	468
12	312	312	312	312	308	271	281	296	333	132	185	126	0	278	470
13	293	293	293	293	245	225	230	276	316	216	286	254	278	0	358
14	479	479	479	479	477	454	460	469	493	448	475	468	470	358	0
15	312	312	312	312	308	271	281	296	333	132	185	126	0	278	470
16	418	418	418	418	415	388	395	406	434	381	413	359	407	282	546
17	319	319	319	319	316	280	289	304	340	198	0	211	185	286	475
18	479	479	479	479	477	454	460	469	493	448	475	468	470	358	594

Figura 4: Matriz de distâncias qui-quadrado. Fonte: Elaboração própria

A Decomposição em Valores Singulares foi aplicada aos resíduos padronizados para obter as coordenadas das barreiras nos componentes principais (WEISS *et al.*, 2024). Os resíduos considerados são os resíduos padronizados da análise de correspondência. Esses resíduos padronizados medem a diferença entre as frequências observadas (correspondenceMatrix) e as frequências esperadas sob a hipótese de independência (independenceModel), escalados pela raiz quadrada das

frequências esperadas. Esta análise calcula as frequências esperadas assumindo independência entre barreiras e estratégias, multiplicando os totais marginais das linhas e colunas e dividindo-os pelo total geral. Comparar essas frequências esperadas com as frequências observadas é crucial para identificar associações significativas.

A análise decompõe a variação nos dados em componentes principais. O gráfico de dispersão resultante da SCA (Figura 5) mostra a posição de cada barreira no espaço bidimensional definido pelos dois primeiros componentes principais. É importante observar que esta análise não é uma regressão no sentido tradicional. Em vez disso, trata-se de uma técnica de redução de dimensionalidade que visa representar as relações entre categorias (barreiras e estratégias) em um espaço de menor dimensão, preservando o máximo possível de informações sobre suas associações. A análise revela padrões de associação entre barreiras e estratégias, onde a proximidade no gráfico sugere uma associação mais forte.

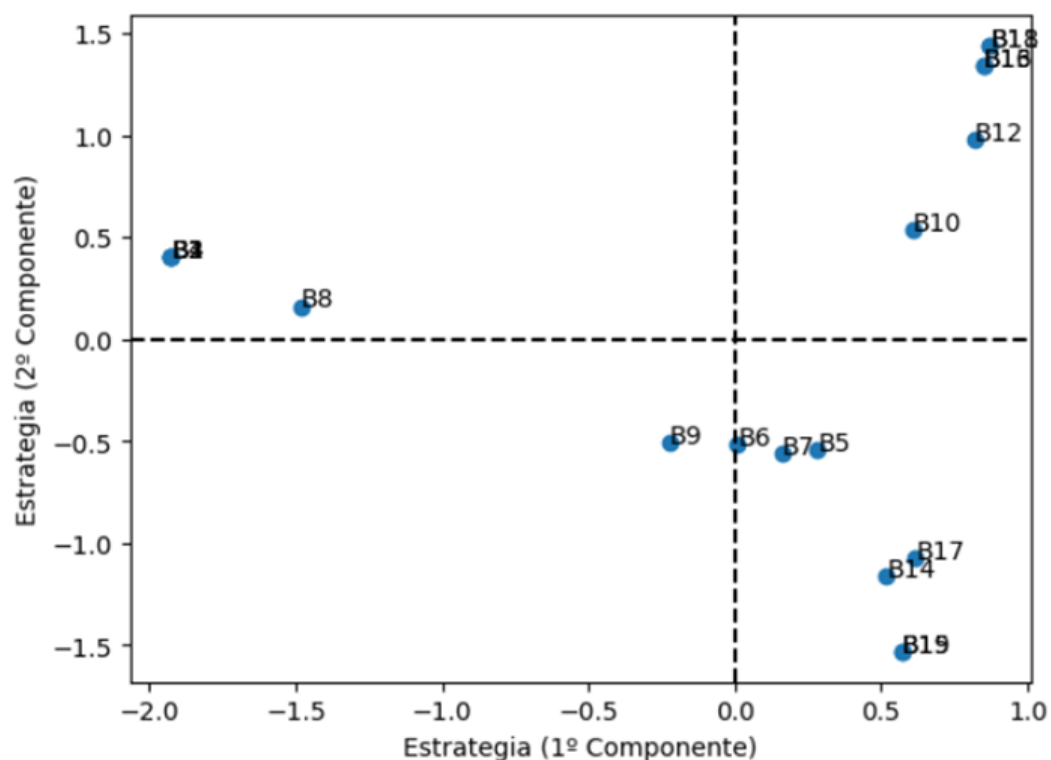


Figura 5: Gráfico de dispersão resultante da ACS. Fonte: Elaboração própria

O gráfico da Figura 5 mostra as barreiras B1, B2, B3 e B4, agrupadas no quadrante inferior direito, apresentando perfis similares de estratégias associadas, com destaque para a estratégia E1. Esse agrupamento sugere que essas barreiras, possivelmente relacionadas a aspectos econômicos e financeiros, podem ser abordadas de maneira

semelhante, com foco na implementação da estratégia E1. Por outro lado, as barreiras B11, B12, B13, B16 e B18, localizadas no quadrante superior direito, compartilham estratégias similares, potencialmente ligadas a E6 e E7. Esse grupo de barreiras está associado a questões técnicas e de infraestrutura, requerendo estratégias específicas para sua mitigação. As barreiras B14, B15, B17 e B19, situadas no quadrante inferior esquerdo, apresentam perfis de estratégias distintos das demais barreiras, possivelmente associadas a E8, E9 e E10. Essas barreiras estão relacionadas a aspectos sociais, culturais e ambientais, demandando abordagens diferenciadas para sua superação. Por fim, as barreiras B5, B6, B7, B9 e B10, dispersas no quadrante superior esquerdo, exibem perfis mistos de estratégias associadas, incluindo E2, E3 e E5. Essa dispersão sugere que essas barreiras podem requerer uma combinação de estratégias adaptadas ao seu contexto específico.

Os resultados obtidos por meio da ACS fornecem insights valiosos sobre como as diferentes barreiras estão relacionadas em termos das estratégias utilizadas para mitigá-las. Esses achados podem orientar o desenvolvimento de políticas e ações direcionadas, considerando as similaridades e diferenças entre os grupos de barreiras identificados. Ao compreender essas relações, é possível propor estratégias personalizadas e eficazes para superar os desafios enfrentados no desenvolvimento da energia solar em regiões isoladas da Amazônia.

3.

Contextualização da aplicação

Este capítulo descreve os SIs que são abordados na pesquisa, considerando as dimensões sociais, técnicas, econômicas, políticas, logísticas e ambientais nos SIs, com base nas investigações relacionadas a cada uma delas. Também apresentamos as variáveis que compõem o banco de dados relacionadas aos SIs.

3.1

Sistemas Isolados

A maioria dos SIs está localizada na região Norte. Atualmente, nove estados compõem a Amazônia Legal. Para a análise desta pesquisa, foram consideradas as localidades isoladas nos estados de Acre (4), Amapá (1), Amazonas (90), Pará (11), Rondônia (12) e Roraima (17). A ilha de Fernando de Noronha, em Pernambuco, também faz parte dos SIs, mas não foi considerada nesta investigação devido à sua localização geográfica. Entre as capitais, Boa Vista (RR) é a única que ainda é atendida por um sistema isolado. A Figura 6 feita no software QGIS Desktop 3.34.0, apresenta a localização geográfica das localidades isoladas tratadas na investigação. O consumo nessas localidades é baixo e representa menos de 1% da carga total do país. A demanda por energia nessas regiões é suprida principalmente por usinas termelétricas a óleo diesel (ONS, 2017).

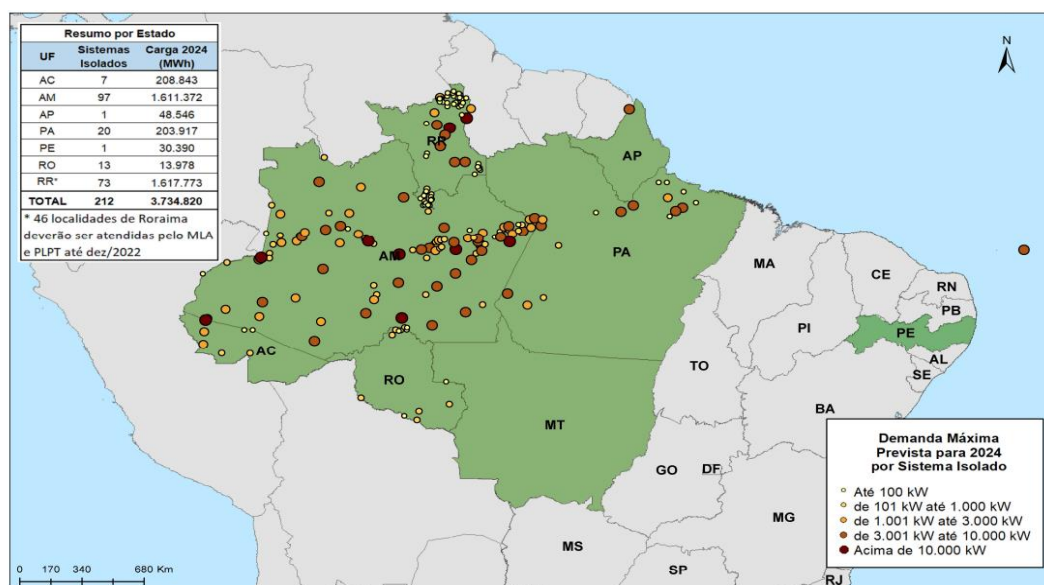


Figura 6: Sistemas Isolados. Fonte: (EPE, 2022)

A geração de energia nos SIs é mais custosa do que no SIN, devido ao custo do combustível e à logística complexa de transporte e abastecimento. Dessa forma, para evitar que os habitantes dos SIs paguem uma conta de luz com valor superior à média nacional, o custo adicional de geração nos SIs em relação ao SIN é repassado para todos os consumidores de energia elétrica por meio de encargos na conta de luz. O estado do Amazonas responde por 77% do orçamento anual da Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) de 2022, e o estado de Roraima por 10% (SCHUTZE; HOLZ, 2023). Quase 1 milhão de pessoas vivem sem acesso contínuo à energia elétrica, dependendo apenas de algumas horas de energia por dia, fornecida por geradores a diesel ou gasolina (IEMA, 2021).

Historicamente, o atendimento aos SIs brasileiros foi objeto de diversas políticas públicas, as quais refletiam as transformações econômicas e institucionais de cada época (DA PONTE et al., 2021). No caso dos SIs em que questões logísticas e ambientais não são impeditivas para a conexão ao SIN, o governo deve conectá-los. Isso reduziria os custos locais e nacionais de fornecimento de energia, além de garantir maior qualidade e confiabilidade no abastecimento elétrico, estimulando as atividades industriais, comerciais e de serviços. Já para os SIs localizados em áreas remotas, onde a conexão ao SIN não é viável, devem ser criadas condições favoráveis para que iniciativas renováveis de suprimento (mais econômicas a longo

prazo) possam vencer os leilões realizados para o abastecimento dessas regiões. Isso é possível mediante a modificação das regras desses leilões¹.

3.2.

Variáveis associadas a localidades isoladas

Através da análise de vários estudos, foram delineados uma série de indicadores (ver Tabela 4) que são considerados essenciais para compreender a infraestrutura de GSFb. Esses indicadores abrangem a caracterização de localidades isoladas e dados técnicos relevantes de GSFb que foram objeto de estudo para o desenvolvimento da energia solar (NEVES *et al.*, 2014). Ao empregar esses indicadores, o objetivo é avaliar a relação existente entre essas localidades, levando em consideração variáveis logísticas, sociais e econômicas (PANDYASWARGO *et al.*, 2022). Agrupar localidades de acordo com variáveis específicas proporciona uma base sólida para desenvolver estratégias mais eficazes e sustentáveis no âmbito da GSFb.

As variáveis, os dados e os resultados esperados da análise das quatro dimensões analisadas (1) social, (2) técnica, (3) econômica e (4) logística para o desenvolvimento da GSFb em localidades isoladas neste estudo são apresentados na Figura 6. Os dados são obtidos através da base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e da Empresa de Pesquisa Energética no Brasil (EPE). Essas são instituições governamentais respeitadas e reconhecidas responsáveis por coletar dados estatísticos e energéticos, respectivamente. Essas organizações têm a responsabilidade de fornecer informações precisas e confiáveis para apoiar a tomada de decisões nos níveis governamental, empresarial e acadêmico.

¹ Nexo Políticas Públicas. (2022, set). Os Sistemas Isolados na Amazônia Legal. <https://pp.nexojornal.com.br/oriente/2022/Os-Sistemas-Isolados-na-Amaz%C3%B4nia-Legal>

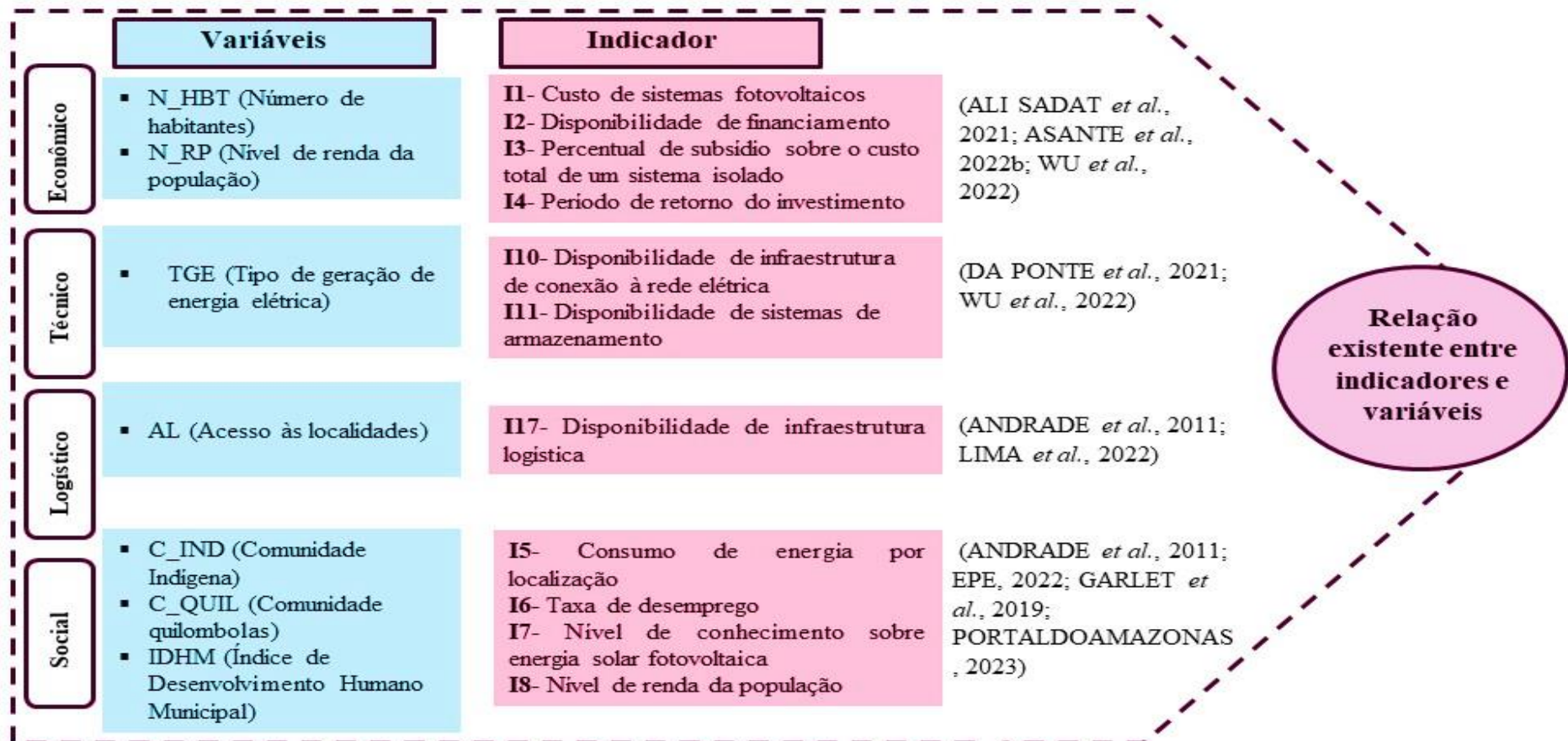


Figura 7: Variáveis e indicadores associadas a localidades isoladas. **Fonte:** Elaboração própria

O objetivo é mostrar como esses indicadores e variáveis podem ajudar a compreender a situação e as oportunidades para promover o uso da energia solar fotovoltaica em localidades isoladas da Amazônia. Vincular os indicadores com as variáveis neste caso é importante porque:

- Permite comparar e analisar as diferenças e as semelhanças entre as localidades, considerando aspectos como a renda, o desenvolvimento humano, o acesso, a infraestrutura, o clima e o meio ambiente (ARCA *et al.*, 2023).
- Pode-se elaborar e implementar planos de ação mais eficientes, eficazes e sustentáveis para promover o uso da energia solar fotovoltaica em localidades isoladas da Amazônia (DA PONTE *et al.*, 2021).

3.3.

Coleta dos dados

3.3.1.

Dimensão econômica

A população é um indicador importante para compreender como a demanda per capita difere de uma região para outra, por isso conhecer o número de habitantes pode influenciar na escala de implementação e na capacidade da comunidade para financiar ou participar economicamente de projetos de GSFb. O nível de renda da população é outra variável econômica importante que pode influenciar na viabilidade econômica de projetos de GSFb (BLECHINGER *et al.*, 2016). Essas variáveis foram coletadas a partir da base de dados do IBGE. No caso do N_RP, foi considerado por município, já que algumas localidades são distritos pertencentes a esses municípios.

O percentual da população com rendimento nominal mensal per capita de até 1/2 salário mínimo é um indicador que mede a proporção de pessoas que vivem com uma renda mensal por pessoa de até metade do valor do salário mínimo vigente no país. Esse indicador é usado para avaliar o nível de pobreza e desigualdade social de uma região ou localidade. Para avaliar a renda da população das localidades isoladas, foram considerados o percentual de ocupação e a proporção de pessoas que residem em domicílios particulares permanentes, por classe, com base nos dados do IBGE. A tabela 7 mostra o percentual de ocupação e a distribuição da renda nominal mensal per capita em cada localidade isolada da Amazônia.

Tabela 7: Percentual de ocupação e a distribuição da renda nominal mensal per capita

Estado	Percentual de ocupação	Renda de R\$ 70,00	Renda de 1/4 salário mínimo	Renda de 1/2 salário mínimo
Amazônia	40% - 50%	25,3%	48,3%	75,2%
Acre	48% - 50,6%	26,2%	49,2%	75,5%
Amapá	42,5%	10,7%	27,7%	51,9%
Pará	39% - 53,7%	25,7%	48,6%	74,7%
Rondônia	34% - 41%	22,5%	43,3%	68,8%
Roraima	35% - 53%	22,9%	43,4%	68,9%

Fonte: Adaptado do IBGE

A tabela 7 permite fazer algumas análises sobre a situação socioeconômica das localidades isoladas. Por exemplo, pode-se observar que:

- A Amazona tem o maior percentual de ocupação e a maior proporção de população com renda de 1/2 salário mínimo ou mais (75,2%), indicando que essa região tem uma maior atividade econômica e um maior padrão de vida do que as outras.
- Acre tem um percentual de ocupação semelhante ao da Amazônia, mas uma proporção menor de população com renda de R\$ 70,00 ou menos (26,2%), mostrando que essa região tem uma menor desigualdade de renda do que a Amazônia.
- Amapá tem o menor percentual de ocupação e a menor proporção de população com renda de R\$ 70,00 ou menos (10,7%), revelando que essa região tem uma menor atividade econômica e uma menor pobreza do que as outras.
- Pará tem um percentual de ocupação variável e uma proporção semelhante à da Amazônia de população com renda de R\$ 70,00 ou menos (25,7%), sugerindo que essa região tem uma atividade econômica heterogênea e uma pobreza moderada.
- Rondônia tem o menor percentual de ocupação e a menor proporção de população com renda de 1/2 salário mínimo ou mais (68,8%), demonstrando que essa região tem uma menor atividade econômica e um menor padrão de vida do que as outras.
- Roraima tem um percentual de ocupação variável e uma proporção semelhante à de Rondônia de população com renda de R\$ 70,00 ou menos

(22,9%), indicando que essa região tem uma atividade econômica heterogênea e uma pobreza moderada.

De acordo com o Banco Mundial, a linha de pobreza é de US\$ 5,50 por dia por pessoa, e a linha de extrema pobreza é de US\$ 1,90 por dia por pessoa. Em reais, isso equivaleria a cerca de R\$ 302,50 e R\$ 104,50 por mês por pessoa, respectivamente. Portanto, usando esses critérios, podemos afirmar que a população das localidades isoladas tem baixa renda, já que a renda mensal média por pessoa na região está abaixo da linha de pobreza estabelecida pelo Banco Mundial.

3.3.2.

Dimensão logística

O acesso às localidades foi utilizado como indicador para levar em consideração os custos de transporte (BLECHINGER *et al.*, 2016), além do transporte seguro dos painéis solares (DA SILVA PEREIRA *et al.*, 2023b).

De acordo com IBGE (2023), o acesso a esses sistemas pode ser feito por diversos meios, incluindo hidrovias com navios de pequeno e grande porte, dependendo da localização, aeroportos (aviões), preferencialmente em municípios com alta densidade populacional, rodovias (terrestres) e outros. Uma vez que os meios de transporte mais comuns para chegar a esses locais são barcos, rodovias e aviões, eles foram considerados como os modos de entrada em nossa base de dados.

Para a coleta de dados, foi atribuída uma categoria binária para cada meio de transporte e, para o acesso por mais de uma fonte de transporte: Número de entradas (N_E): Aeroportos (A) = sim = 1 e não = 0, Rodovias (R) = sim = 1 e não = 0, Hidrovias (H) = sim = 1 e não = 0.

A tabela 8 mostra o número de localidades isoladas em cada estado, e os meios de transporte disponíveis para cada uma delas. A última coluna mostra o número de localidades que têm apenas uma via de entrada, seja rodoviária ou hidroviária, e que são consideradas de difícil acesso.

Tabela 8: Meios de transporte disponíveis

Estado	Localidades isoladas	Aeroportos	Rodovias	Hidrovias	Dificuldade de acesso
Amazonas	90	14	22	44	38
Acre	4	0	3	4	0
Amapá	1	0	1	1	0
Pará	10	0	5	9	1
Rondônia	12	0	8	7	4
Roraima	17	1	15	2	1
Total	134	15	54	67	44

Fonte: Adaptado do IBGE

A tabela 8 permite fazer algumas análises sobre a situação das localidades isoladas.

Por exemplo, pode-se observar que:

- O estado do Amazonas tem o maior número de localidades isoladas (90), e também o maior número de localidades com dificuldade de acesso (38).
- O estado do Acre tem o menor número de localidades isoladas (4), e nenhuma delas tem dificuldade de acesso.
- O estado de Roraima tem a única localidade isolada que possui entrada pelo aeroporto (Boa Vista), mas também tem uma localidade que possui apenas entrada por hidrovia.
- O estado do Pará tem a maior proporção de localidades com acesso por hidrovias (90%), mas também tem uma localidade que possui apenas entrada por rodovia.
- O estado de Rondônia tem a maior proporção de localidades com acesso por rodovias (66,7%), mas também tem quatro localidades que possuem apenas entrada por hidrovia.

A Figura 7 apresenta um diagrama de Venn (HEBERLE *et al.*, 2015), que é uma representação gráfica que utiliza círculos ou outras figuras para ilustrar relações lógicas entre dois ou mais conjuntos de elementos. Esses diagramas mostram conjuntos de elementos e suas interações por meio de linhas fechadas (círculos), sendo que a externa (quadrado) representa o conjunto universal (U). A figura 8 representa a combinação de tipos de acesso que cada localidade apresenta.

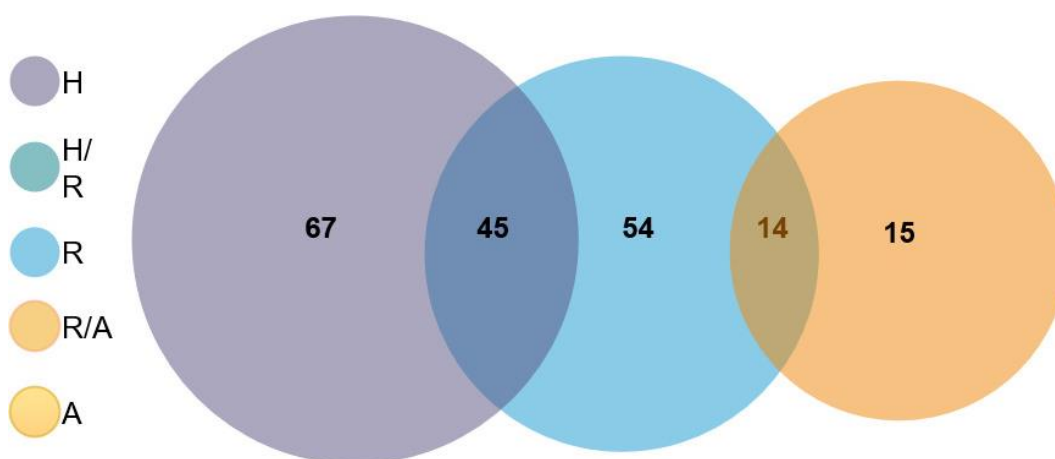


Figura 8: Diagrama de Venn do acesso que cada localidade. **Fonte:** Elaboração própria

- Há 91 localidades com acesso a hidrovias.

- 45 localidades têm acesso tanto a hidrovias quanto a rodovias, indicando uma sobreposição significativa entre essas duas formas de acesso.
- Há 89 localidades com acesso a rodovias.
- Apenas 14 localidades têm acesso tanto a rodovias quanto a aeroportos, sugerindo que a sobreposição entre essas duas formas de acesso é menor.
- Há 14 localidades com acesso a aeroportos.

Isso sugere que a maioria das localidades tem acesso a hidrovias e rodovias, enquanto o acesso aos aeroportos é menos comum. Além disso, parece que rodovias e hidrovias costumam coexistir nas mesmas localidades, enquanto os aeroportos geralmente não compartilham localidades com rodovias. Isso poderia indicar que as localidades com aeroportos podem ser mais isoladas ou mais urbanizadas, enquanto as localidades com hidrovias e rodovias podem estar mais conectadas a outras localidades por meio de múltiplos modos de transporte.

3.3.3.

Dimensão técnica

De acordo com a EPE (2022), os Sistemas Isolados (SIs) na Amazônia, em sua maioria, são abastecidos por usina termelétrica a diesel (UTE), e algumas estão conectadas de forma conjunta com outras fontes de eletricidade renovável, como Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), de forma híbrida. O sistema termelétrico a diesel funciona como backup para a geração de energia das PCHs e da usina fotovoltaica. A variável tipo de geração de energia elétrica (TGE), de acordo com a EPE (2022), é essencial para uma abordagem informada e eficaz no desenvolvimento de fontes renováveis, como a solar, além de ajudar a entender as condições específicas de cada localidade e maximizar os benefícios da transição para energias renováveis. Para a coleta de dados, foi atribuída uma categoria binária para cada tipo de geração de eletricidade: Número de entradas TGE: UTE = sim = 1 e não = 0, UFV = sim = 1 e não = 0, PCH = sim = 1 e não = 0.

A variável TGE foi coletada do (EPE, 2022).

A tabela 9 mostra o número de localidades isoladas em cada estado, e as fontes geradoras de energia elétrica disponíveis para cada uma delas. A última coluna mostra o número de localidades que têm fontes renováveis de energia, seja usinas fotovoltaicas ou Pequenas Centrais Hidrelétricas.

Tabela 9: Fontes geradoras de energia elétrica disponíveis

Estado	Localidades isoladas	Usinas termelétricas	Usinas fotovoltaicas	Pequenas Centrais Hidrelétricas	Fontes renováveis
Amazonas	90	90	0	1	1
Acre	4	4	0	0	0
Amapá	1	1	1	1	1
Pará	10	10	0	0	0
Rondônia	12	12	1	0	1
Roraima	18	18	0	2	2
Total	135	135	2	4	5

Fonte: Adaptado do IBGE

A tabela 9 permite fazer algumas análises sobre a situação energética das localidades isoladas. Por exemplo, pode-se observar que:

- O estado do Amazonas tem o maior número de localidades isoladas (90), mas apenas uma delas tem uma fonte renovável de energia (Belo Monte).
- O estado do Acre tem o menor número de localidades isoladas (4), e todas elas são abastecidas por usinas termelétricas.
- O estado do Amapá tem a única localidade isolada que é abastecida por três fontes geradoras de energia elétrica (Oiapoque), sendo duas delas renováveis.
- O estado do Pará tem dez localidades isoladas, e nenhuma delas tem fontes renováveis de energia.
- estado de Rondônia tem uma localidade isolada que é abastecida por usinas termelétricas e fotovoltaicas (Calama), sendo a única do estado com uma fonte renovável de energia.
- O estado de Roraima tem duas localidades isoladas que geram eletricidade por meio de Pequenas Centrais Hidrelétricas, além das usinas termelétricas.

3.3.4.

Dimensão social

De acordo com Sheikh et al.(2016) a perspectiva social deve ser analisada em relação à sua conexão com a sociedade para obter aceitação e apoio a longo prazo. Na região amazônica brasileira, existem diversas comunidades indígenas e quilombolas (BASE DE INFORMAÇÕES SOBRE OS POVOS INDÍGENAS E QUILOMBOLAS | IBGE, 2022). Para o desenvolvimento de GSFb, é necessário considerar uma abordagem que leve em conta os benefícios para as comunidades locais e para a sociedade como um todo (CUESTA *et al.*, 2020). Para a seleção do número de comunidades indígenas e quilombolas, foi atribuída uma categoria

binária para cada localidade: tipo de comunidade (T_C): C_IND = sim = 1 e não = 0, C_QUIL = sim = 1 e não = 0.

Das 134 localidades isoladas 77 localidades que possuem comunidades indígenas, 11 localidades que possuem comunidades quilombolas, 9 localidades que possuem tanto comunidades indígenas quanto quilombolas e 37 localidades que não possuem nem comunidades indígenas nem quilombolas.

Outra variável social a ser considerada é o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) para o desenvolvimento da GSFb (BEZERRA *et al.*, 2017). Esta variável mede o índice de desenvolvimento humano e abrange dimensões sociais, econômicas e de saúde, proporcionando uma visão geral do bem-estar da população local.

Os dados divulgados pela IBGE em sua última atualização foram utilizados para identificar o IDHM das localidades isoladas analisadas. Como essas localidades podem ser municípios, distritos ou bairros, os dados de distritos e vilas foram considerados iguais aos dos municípios aos quais pertencem. O IDHM é calculado pela média geométrica dos três subíndices classificados em quatro categorias: muito alto (0,800 – 1), alto (0,700 – 0,799), médio (0,600 – 0,699), baixo (0,500 – 0,599) e muito baixo (0 – 0,499) (GOV.BR, 2020). O IDHM das localidades isoladas varia de 0,3 a 0,7 e depende da densidade demográfica de cada uma.

Para a coleta dessa variável, considerou-se a categoria de IDHM, indo de alto a muito baixo, uma vez que as localidades isoladas na Amazônia não apresentam um IDHM muito elevado. A cada categoria foi atribuída a seguinte classificação: alto (1), médio (2), baixo (3) e muito baixo (4). A tabela 10 mostra o número de localidades isoladas em cada estado da região Norte do Brasil, e o IDHM de cada uma delas. O IDHM é um indicador que mede o nível de desenvolvimento humano de uma região, considerando as dimensões de educação, saúde e renda.

Tabela 10: Índice de Desenvolvimento Humano Municipal

Estado	Localidades isoladas	IDHM muito baixo	IDHM baixo	IDHM médio	IDHM alto
Amazonas	90	10	54	20	3
Acre	4	2	2	0	0
Amapá	1	0	0	1	0
Pará	10	4	5	1	1
Rondônia	12	0	0	4	8
Roraima	17	4	4	8	1
Total	134	20	65	35	13

Fonte: Adaptado do IBGE

A tabela 10 permite fazer algumas análises sobre o desenvolvimento humano das localidades isoladas. Por exemplo, pode-se observar que:

- Amazonas tem o maior número de localidades isoladas (90), mas também tem o maior número de localidades com IDHM muito baixo (10) e IDHM baixo (54), indicando que essas regiões têm baixo padrão de vida e oportunidades.
- Acre tem o menor número de localidades isoladas (4), e todas elas têm IDHM muito baixo ou baixo, mostrando que essas regiões também sofrem com a falta de desenvolvimento humano.
- Amapá tem a única localidade isolada que tem IDHM médio (Oiapoque), mas também é a única que tem três fontes geradoras de energia elétrica, sendo duas delas renováveis, sugerindo que há uma relação entre o acesso à energia e o desenvolvimento humano.
- Pará tem dez localidades isoladas, e apenas duas delas têm IDHM médio ou alto, revelando que a maioria dessas regiões tem baixo desenvolvimento humano.
- Rondônia é o que tem melhor IDHM, pois das doze localidades isoladas, oito têm IDHM alto e quatro têm IDHM médio, demonstrando que essas regiões têm um padrão de vida e oportunidades mais elevados do que as outras.
- Roraima tem um IDHM predominantemente médio, pois das 17 localidades isoladas, oito têm IDHM médio, mas também tem quatro localidades com IDHM muito baixo e quatro com IDHM baixo, indicando que há uma grande desigualdade entre essas regiões.

4.

Modelagem Proposta

Após a análise dos dados referentes às variáveis das localidades isoladas, neste documento, considera-se o agrupamento dos dados.

4.1

Modelos de clustering

Várias abordagens foram desenvolvidas para encontrar grupos em um banco de dados (CAO et al., 2023; FUKUNAGA, 2013; LLETÍ et al., 2004; PEÑA et al., 1999). No entanto, a maioria dos algoritmos de agrupamento existentes assume que todos os atributos são numéricos ou categóricos (JI et al., 2013), exemplos dos quais incluem k-means (LLOYD, 1982), k-modes (HUANG, 1998), fuzzy k-modes (HUANG; NG, 1999), TGCA (HE; TAN, 2012) e algoritmos G-ANMI (DENG et al., 2010). Noorbehbahani et al.(2015) afirma que o principal problema ao agrupar dados categóricos (e, portanto, dados mistos) é a falta de ordem natural nos valores dos atributos individuais e que os algoritmos de agrupamento de dados numéricos não são aplicáveis diretamente a dados mistos.

4.1.1.

Dados mistos

A base de dados final é composta por dados mistos (numéricos e categóricos). Os domínios de atributos associados a dados mistos são domínios numéricos e categóricos, respectivamente (JI et al., 2013). Cada atributo A_j descreve um domínio de valores denotado por $Dom(A_j)$ (HUANG; NG, 1999). O domínio numérico é representado por valores contínuos, e o domínio categórico é representado por um conjunto finito sem qualquer ordem natural (como gênero, cor), geralmente denotado por $Dom(A_j) = \{a_j^1, a_j^2, \dots, a_j^t\}$, onde t é o número de valores de categoria do atributo categórico A_j . Um objeto de dados X_j é logicamente representado como uma conjunção de pares atributo-valor.

Os dados mistos são comuns em muitas aplicações do mundo real. Nesse contexto, o algoritmo de k-protótipos, introduzido por Huang (1997), destaca-se como uma

solução eficiente para o tratamento de dados mistos. Este algoritmo combina os métodos de k-médias e k-modos para particionar dados mistos, permitindo uma representação e agrupamento eficientes dos dados.

Além disso, o algoritmo de K-Prototypes pode lidar com a natureza difusa dos objetos de dados, como proposto por Bezdek et al.(1999). Isso é particularmente útil quando os dados não se encaixam claramente em uma categoria ou outra, uma ocorrência comum em muitos conjuntos de dados do mundo real. Mais recentemente, Zheng et al. (2010) apresentaram um algoritmo de K-Prototypes evolutivos (EKP) que aprimora ainda mais a capacidade de lidar com dados mistos. Esse enfoque inovador permite que os protótipos se adaptem e evoluam com o tempo, refletindo a natureza dinâmica dos dados do mundo real. Portanto, o algoritmo de K-Prototypes e suas variantes representam uma solução robusta e adaptável para o tratamento de dados mistos, justificando seu uso frequente na literatura.

4.1.2.

Algoritmo K-Prototypes

O objetivo do algoritmo de K-Prototypes é agrupar o conjunto de dados X em k grupos minimizando a função de custo, conforme indicado a seguir:

$$E(U, Q) = \sum_{l=1}^k \sum_{i=1}^n u_{il} d(x_i, Q_l) \quad (3)$$

Aquí Q_l é o protótipo do cluster l ; $u_{il} (0 \leq u_{il} \leq 1)$ é um elemento da matriz de partição U_{nk} , y $d(x_i, Q_l)$ é a medida de dissimilaridade dada por:

$$d(x_i, Q_l) = \sum_{j=1}^m d(x_{ij}, q_{lj}) \quad (4)$$

$$d(x_{ij}, q_{lj}) = \begin{cases} (x_{ij}, q_{lj})^2 \\ \mu_l^\delta(x_{ij}, q_{lj}) \end{cases} \quad (5)$$

Onde $\delta = (p, q) = 0$ para $p = q$, e $\delta = (p, q) = 1$ para $p \neq q$; μ_l é um peso para atributos categóricos no grupo l . Quando x_{ij} é um valor do atributo numérico, q_{lj} é a média do j -ésimo atributo numérico no grupo l ; quando x_{ij} é o valor do atributo categórico, q_{lj} é a moda do j -ésimo atributo categórico no grupo l .

Além disso, Ji et al. (2013) apresenta um algoritmo aprimorado de K-Prototypes. O algoritmo leva em consideração a importância dos diferentes atributos para o processo de agrupamento, introduzindo o conceito de centroide de distribuição.

Também utiliza a estratégia de Hsu et al. (2011) para considerar a importância de cada atributo e avaliar a dissimilaridade entre os objetos de dados e os protótipos.

4.1.2.

Centroide Difuso

O centroide difuso foi proposto por Kim et al. (2004). Em um centroide estrito, cada atributo do centroide tem um único valor de categoria estrita. Em contraste, cada atributo de um centroide difuso possui um valor de categoria difusa para descrever a informação distribuída no grupo. Para $Dom(A_i) = \{a_i^{(1)}, a_i^{(2)}, \dots, a_i^{(n_i)}\}$, o centroide difuso proposto, denotado por V , é definido como:

$$V = [\tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_1, \dots, \tilde{v}_p] \quad (6)$$

Onde

$$\tilde{v}_1 = a_1^{(1)}/w_1^{(1)} + a_1^{(2)}/w_1^{(2)} + \dots + a_1^{(n_1)}/w_1^{(n_1)} \quad (7)$$

$$\text{subject to } 0 \leq w_1^{(t)} \leq 1, 1 \leq t \leq n_1 \quad (8)$$

$$\sum_{t=1}^{n_1} w_1^{(t)} = 1, 1 \leq 1 \leq p \quad (9)$$

Cada atributo $\tilde{v}_1 \in V$ é um valor de categoria difusa representado como um conjunto difuso $\{(a_l^{(t)}, w_l^{(t)})\}$, que é uma notação conveniente para um conjunto difuso proposto por (ZADEH, 1972), para $1 \leq t \leq n_1$. Isso é determinado pela distribuição de categorias do atributo A_1 nos dados que pertencem ao grupo. $w_l^{(t)}$ indica o grau de confiança com o qual l_t contribui para $\tilde{v}_1$.

4.2.

Modelagem proposta para agrupação dos SIs

Nesta pesquisa, propõe-se uma adaptação ao algoritmo apresentado por Ji et al. (2013), considerando o pré-processamento dos dados, além de determinar a redução de dimensionalidade com a Análise Fatorial de Variáveis Mistas (FAMD). Também, realiza-se o cálculo dos centroides difusos com o objetivo de minimizar a soma das distâncias entre cada ponto e seu respectivo centroide. Além disso, avalia-se a qualidade do algoritmo com o índice de Silhouette. O procedimento de clustering de dados mistos é descrito na Figura 9.

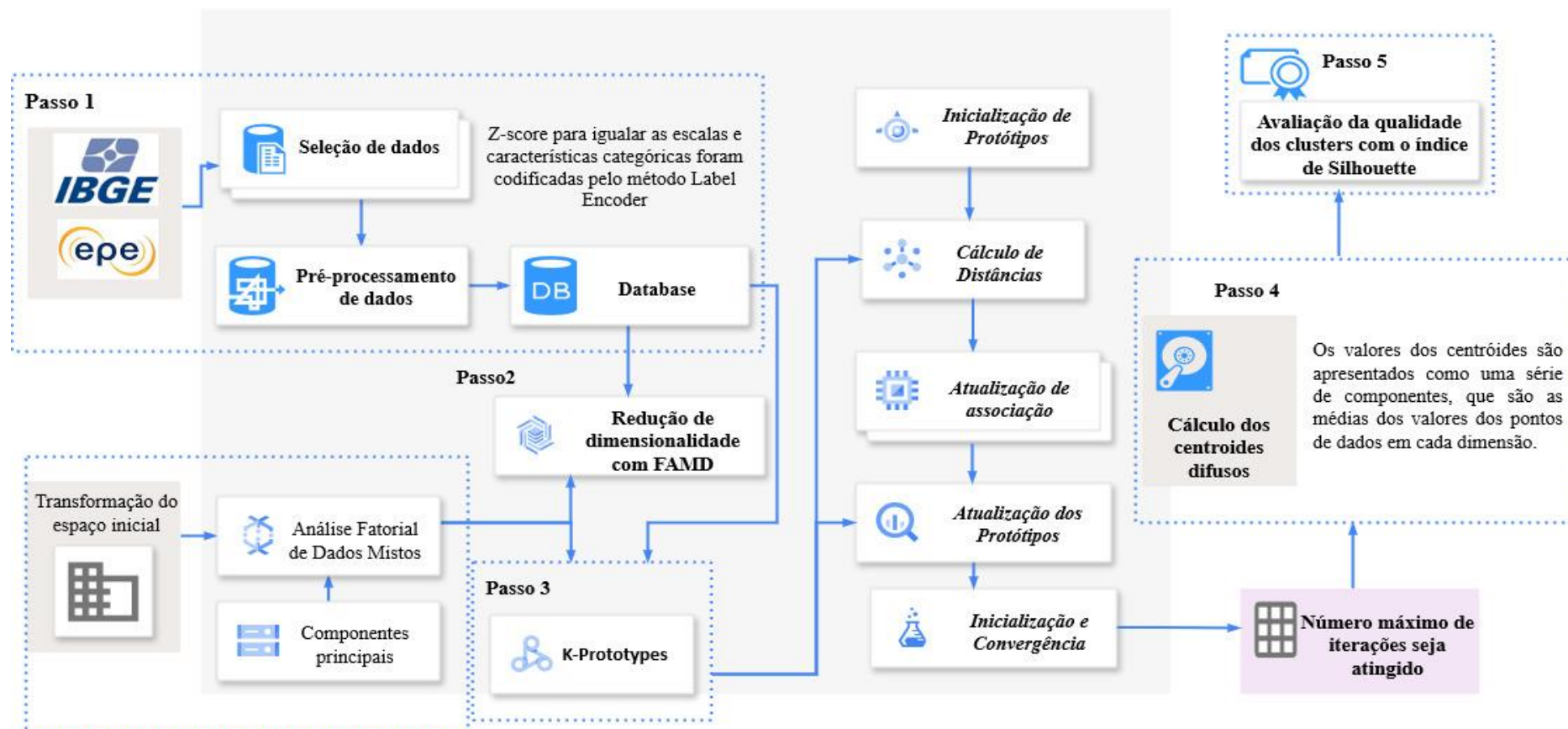


Figura 9: Procedimento de clustering de dados mistos. **Fonte:** Elaboração própria

4.2.1.

Descrição do procedimento de clustering de dados mistos

Passo 1: Pré-processamento de dados: Este passo envolve a padronização das características numéricas e a codificação das características categóricas.

Passo 2: Redução de dimensionalidade com FAMD: FAMD é uma extensão de Principal Component Analysis (PCA) e Multiple Correspondence Analysis (MCA) utilizada quando se tem uma mistura de dados numéricos e categóricos. Transforma as variáveis originais em um novo conjunto de variáveis, chamadas componentes, que são combinações lineares das variáveis originais. Os componentes são ordenados de modo que o primeiro retém a maior quantidade de variação nos dados.

Passo 3: K-Prototypes: Este algoritmo atribui cada ponto de dados ao protótipo mais próximo e atualiza os protótipos com base nos membros atuais dos clusters. A distância entre um ponto de dados e um protótipo é calculada como a soma das distâncias numéricas e categóricas.

1) Inicialização de protótipos: O algoritmo começa selecionando aleatoriamente k pontos de dados como protótipos iniciais. Esses protótipos são usados como referência inicial para calcular a distância entre os pontos de dados e os protótipos, tanto em termos numéricos quanto categóricos.

$$Q = \{p_1, p_2, \dots, p_k\} \quad (10)$$

2) Cálculo de distâncias: Para cada ponto de dados x_i e cada protótipo p_1 , calcula a distância $d(x_i, p_1)$ como a soma das distâncias numéricas e categóricas.

$$D(x_i, p_j) = \sum_{m \in M} (x_{i,m} - p_{j,m})^2 + \gamma \sum_{c \in C} \delta(x_{i,c}, p_{j,c}) \quad (11)$$

Onde:

- M é o conjunto de atributos numéricos
- C é o conjunto de atributos categóricos
- $x_{i,m}$ é o valor do atributo m para o ponto de dados x_i
- $p_{j,m}$ é o valor do atributo m para o protótipo p_j
- $\delta(x_{i,c}, p_{j,c})$ é a função indicadora para atributos categóricos que retorna 0 se $x_{i,c} = p_{j,c}$ e 1 caso contrário.
- γ é um parâmetro de ponderação que ajusta a importância relativa das distâncias numéricas e categóricas.

3) Atualização de associação: Atribui cada ponto de dados ao protótipo mais próximo.

$$u_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } d(x_i, p_j) = \min_j d(x_i, p_j) \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (12)$$

- u_{ij} é a associação do ponto i ao cluster j
- $d(x_i, p_j)$ é a distância entre o ponto i e o protótipo j

4) Atualização dos protótipos: Atualiza cada protótipo q_1 como a média (para atributos numéricos) ou a moda (para atributos categóricos) dos pontos de dados atribuídos a q_1 .

Para atributos numéricos: O novo valor de cada atributo é a média dos valores dos pontos de dados atribuídos ao protótipo.

$$p_{j,m} = \frac{1}{N_j} \sum_{x_i \in \text{Cluster } j} x_{i,m} \quad (13)$$

Onde:

- N_j é o número de pontos no cluster j
- $x_{i,m}$ é o valor do atributo m para o ponto de dados x_i

Para atributos categóricos: O novo valor de cada atributo é a moda (valor mais frequente) dos pontos de dados atribuídos ao protótipo.

$$p_{j,c} = \text{Moda}(x_{i,c} | x_i \in \text{Cluster } j) \quad (14)$$

Onde:

- Moda retorna o valor mais comum do atributo categórico c no cluster j .

5) Convergência: O algoritmo repete os passos de cálculo de distâncias (Passo 2)), atualização de associação (Passo 3)) e atualização dos protótipos (Passo 4)) até que uma das seguintes condições seja atendida:

- A associação dos pontos de dados aos protótipos não muda.
- Um número máximo de iterações é atingido.

Passo 4: Cálculo dos centroides difusos: Os centroides difusos são calculados como a média dos pontos de dados atribuídos a cada cluster.

$$v_j = \frac{1}{N_j} \sum_{x_i \in \text{Cluster } j} x_i \quad (15)$$

Onde:

- v_j é o centroide difuso do cluster j , N_j é o número de pontos de dados no cluster j , e x_i é um ponto de dados atribuído ao cluster j .

Passo 5: Avaliação da qualidade dos clusters com o índice de Silhouette: O índice de Silhouette mede quão próximos estão os pontos nos mesmos cluster e quão distantes estão os pontos em clusters diferentes. Um valor mais alto do índice de Silhouette indica uma melhor qualidade dos clusters.

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}} \quad (16)$$

Onde:

- $s(i)$, é o valor do índice de Silhouette para o ponto i . Varia de -1 a 1, onde valores próximos a 1 indicam boa separação entre clusters e valores próximos a -1 indicam má separação.
- $a(i)$, é a distância média entre o ponto i e todos os outros pontos do mesmo cluster (medida de coesão).
- $b(i)$, é a distância média entre o ponto i e os pontos do cluster mais próximo (medida de separação).

O índice de Silhouette é particularmente útil em contextos nos quais se utiliza o algoritmo K-Prototypes, projetado especificamente para lidar com dados mistos (NIDHEESH *et al.*, 2020). Ele oferece uma maneira eficaz de interpretar a qualidade dos clusters formados (GUERRA *et al.*, 2012). Além disso, o índice de Silhouette demonstra ser robusto à presença de outliers nos dados. Isso é uma vantagem significativa, uma vez que é comum encontrar outliers em conjuntos de dados heterogêneos como os mistos (HOSSEININASAB; ERSHADI, 2013). A capacidade de lidar adequadamente com esses pontos discrepantes aumenta a confiabilidade das análises feitas com base nos clusters formados.

4.3.

Resultados da modelagem proposta

Nesta seção, os resultados da modelagem proposta na seção 4.2 serão apresentados. Abordaremos de forma detalhada os resultados específicos de cada um dos cinco passos a seguir:

Passo 1 - Pré-processamento dos dados: O K-protótipos adotou uma abordagem distinta aos outros algoritmos. Foi realizada a padronização das variáveis numéricas pela técnica de escalonamento Z-score para igualar as escalas. As características categóricas foram codificadas pelo método Label Encoder, transformando os valores originais em numéricos.

Passo 2 - Redução de dimensionalidade pela FAMD, (Figura 10): Utilizou-se a Análise Fatorial de Dados Mistos para sintetizar as principais relações entre variáveis de natureza distinta, transformando o espaço inicial em um subconjunto de 10 novas variáveis (componentes principais) que retenham cerca de 90% da variância presente nos dados originais.

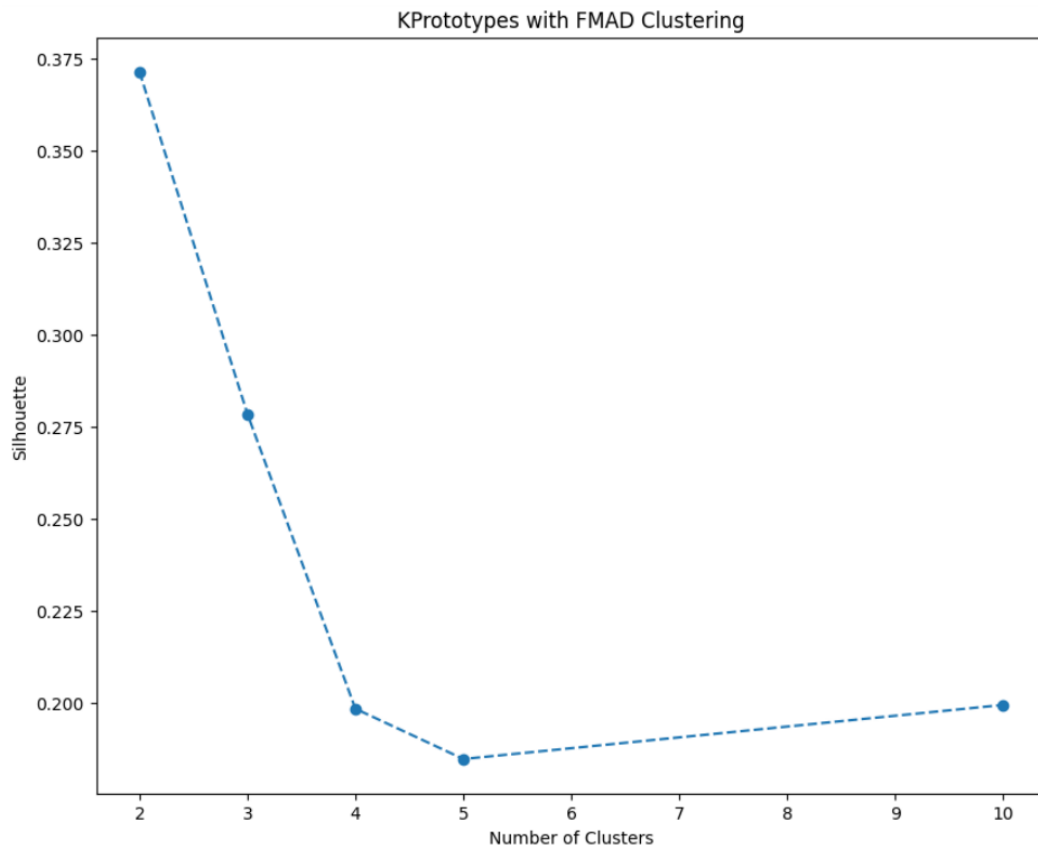


Figura 10: FMAD Clustering do K-Prototypes. **Fonte:** Elaboração própria

O gráfico mostra o valor mais alto do coeficiente de silhueta está no cluster 2, sugerindo que este pode ser o número ótimo de clusters para esse conjunto específico de dados, considerando a qualidade do agrupamento indicada pelo coeficiente de silhueta. Esses resultados podem ser interpretados como uma indicação de que a divisão dos dados em dois clusters é a mais adequada, segundo o método K-Prototypes com FMAD Clustering, para capturar as relações essenciais entre as variáveis analisadas na sua pesquisa.

Passo 3 - Algoritmo K-Prototypes: O método foi aplicado às variáveis resultantes da FAMD, partições de teste de 2 a 5 clusters foram avaliadas pela abordagem de Silhouette, escolhendo aquela com índice médio máximo (0,57 para 2 grupos). Fixou-se tal quantitativo de conglomerados para o processamento pelo K-

protótipos, especificando 2 variáveis codificadas como categóricas, uma interpretação detalhada dos resultados:

Inicialização dos Protótipos

O processo começa com a seleção de k pontos de dados aleatórios do conjunto como protótipos iniciais. Estes protótipos servem como os centros iniciais para os clusters que serão formados. É importante notar que a inicialização neste caso é determinística, com **n_init** definido como 1. Isso significa que o processo de seleção dos protótipos iniciais não é aleatório, mas segue um padrão fixo, garantindo resultados consistentes em execuções repetidas do algoritmo.

Cálculo de Distâncias

Uma vez que os protótipos iniciais são estabelecidos, o algoritmo procede para calcular as distâncias entre cada ponto de dados e cada protótipo. Esta etapa é crucial e diferencia o K-Prototypes do K-Means tradicional.

Para cada ponto de dados (x_i) e cada protótipo (q_l), a distância total ($d(x_i, q_l)$) é calculada como a soma ponderada de duas componentes:

- Distância numérica: Para atributos numéricos, utiliza-se a diferença quadrática entre os valores, similar ao K-Means.
- Distância categórica: Para atributos categóricos, a distância é 0 se os valores são iguais e 1 se são diferentes.

Atualização de Associação

Com as distâncias calculadas, cada ponto de dados é então atribuído ao protótipo mais próximo. Este processo forma os clusters iniciais. A associação de cada ponto ao cluster mais próximo é fundamental para a eficácia do algoritmo, pois determina a composição inicial dos grupos.

Atualização dos Protótipos

Após a formação inicial dos clusters, os protótipos são recalculados para melhor representar os pontos de dados associados a eles. Este passo é crucial para refinar a posição dos centros dos clusters:

- Para atributos numéricos: O novo valor do protótipo é calculado como a média dos valores de todos os pontos no cluster.
- Para atributos categóricos: O novo valor do protótipo é definido como a moda (o valor mais frequente) dos atributos categóricos dos pontos no cluster.

Esta abordagem híbrida permite que o K-Prototypes lide eficientemente com dados mistos, adaptando-se às características específicas de cada tipo de variável.

Iterações e Convergência

Os passos 2 a 4 são repetidos iterativamente até que uma condição de parada seja atingida. Isso pode ocorrer quando não há mais mudanças significativas na atribuição dos pontos de dados aos protótipos, ou quando um número máximo predefinido de iterações é alcançado. No caso descrito, o algoritmo convergiu após algumas iterações, indicando que encontrou uma solução estável para a partição dos dados. A rápida convergência sugere que os clusters formados são relativamente bem definidos e distintos.

Passo 4 - Cálculo dos centróides: Após a convergência dos protótipos, determinou-se o ponto central (centroide) de cada um dos 2 agrupamentos, computando a média das características numéricas e a moda das categóricas associadas. Como mostra a Figura 11:

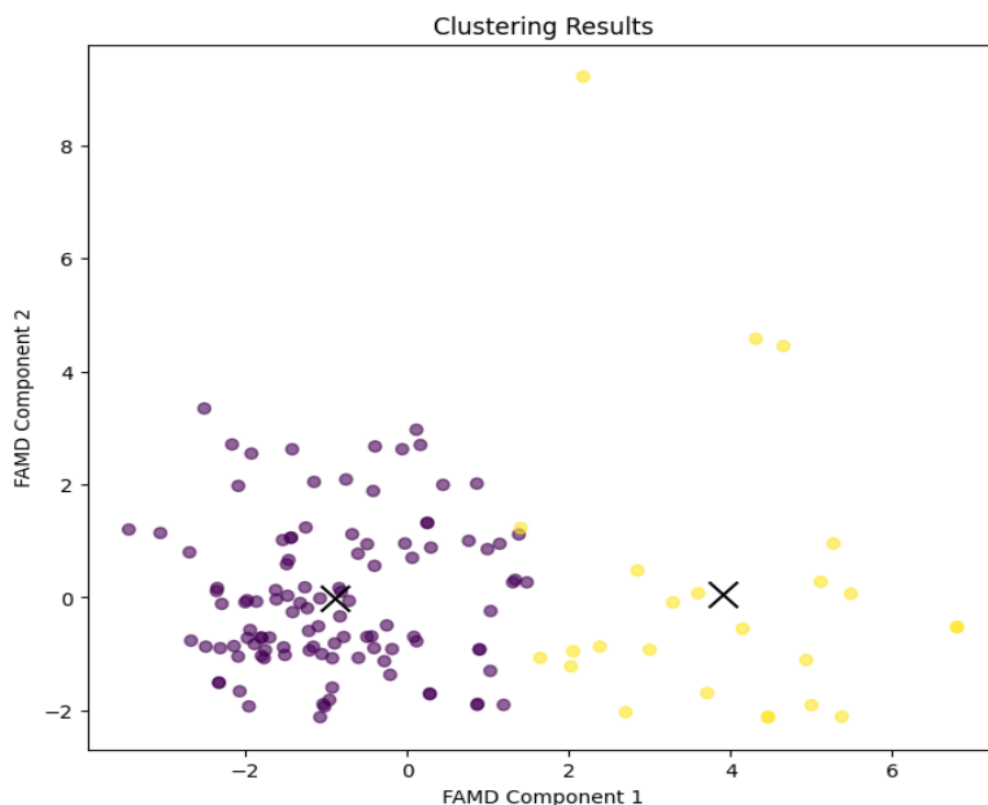


Figura 11: Centróides difusos do K-Prototypes. **Fonte:** Elaboração própria

Os centróides difusos são calculados como a média dos pontos de dados atribuídos a cada cluster. No caso, dois centróides foram calculados, cada um representando um cluster. Os valores dos centróides são apresentados como uma série de componentes, que são as médias dos valores dos pontos de dados em cada

dimensão. O primeiro centróide tem valores predominantemente negativos, enquanto o segundo centróide tem valores predominantemente positivos. Isso sugere que os dois clusters podem representar grupos distintos no conjunto de dados.

Passo 5 - Índice de Silhouette: Para validação quantitativa, calculou-se o Silhouette dos clusters formados, combinando as distâncias dentro e entre grupos. A pontuação de Silhueta é uma métrica de qualidade de agrupamento que varia de -1 a 1. Uma pontuação mais próxima de 1 indica que os clusters estão bem separados e definidos.

No caso, a pontuação de Silhueta é aproximadamente 0.377, o que indica que os clusters são razoavelmente distintos, mas ainda há alguma sobreposição entre eles. O valor reforça adequação da solução de 2 partições adotada para os dados.

5.

Resultados e discussões

Neste capítulo, foi feita à agrupação das localidades isoladas que demonstraram similaridades nas variáveis mencionadas anteriormente, visando alcançar o objetivo 2. Este processo não apenas nos permitiu identificar padrões e relações entre os dados, mas também nos capacitou a desenvolver uma compreensão mais profunda das características específicas de cada grupo de localidades, fundamentais para o desenvolvimento de estratégias de mitigação personalizadas, como previsto no objetivo 3.

5.1.

Resultados do Clustering

Nesta seção, conduzimos uma análise minuciosa do resultado obtido pelo modelo proposto e dos clusters gerados.

5.1.1 Variáveis que mais contribuíram para a formação dos clusters

Para calcular a importância das características (features) na formação dos clusters foi utilizado o código fornecido pela biblioteca SHAP (SHapley Additive exPlanations) (LUNDBERG; LEE, 2017). A SHAP é uma abordagem para explicar as previsões de modelos de aprendizado de máquina, atribuindo a cada característica uma contribuição para a previsão (MOLNAR, 2020). Este gráfico de resumo SHAP fornece insights valiosos sobre quais características foram mais influentes na separação dos dados em dois clusters distintos. Com base nesses insights, é possível compreender melhor os fatores subjacentes que diferenciam os grupos de localidades e tomar decisões informadas sobre como lidar com essas diferenças. Esses gráficos mostram como cada característica contribui para a atribuição de um ponto de dados a um cluster específico, como mostra a figura 12.

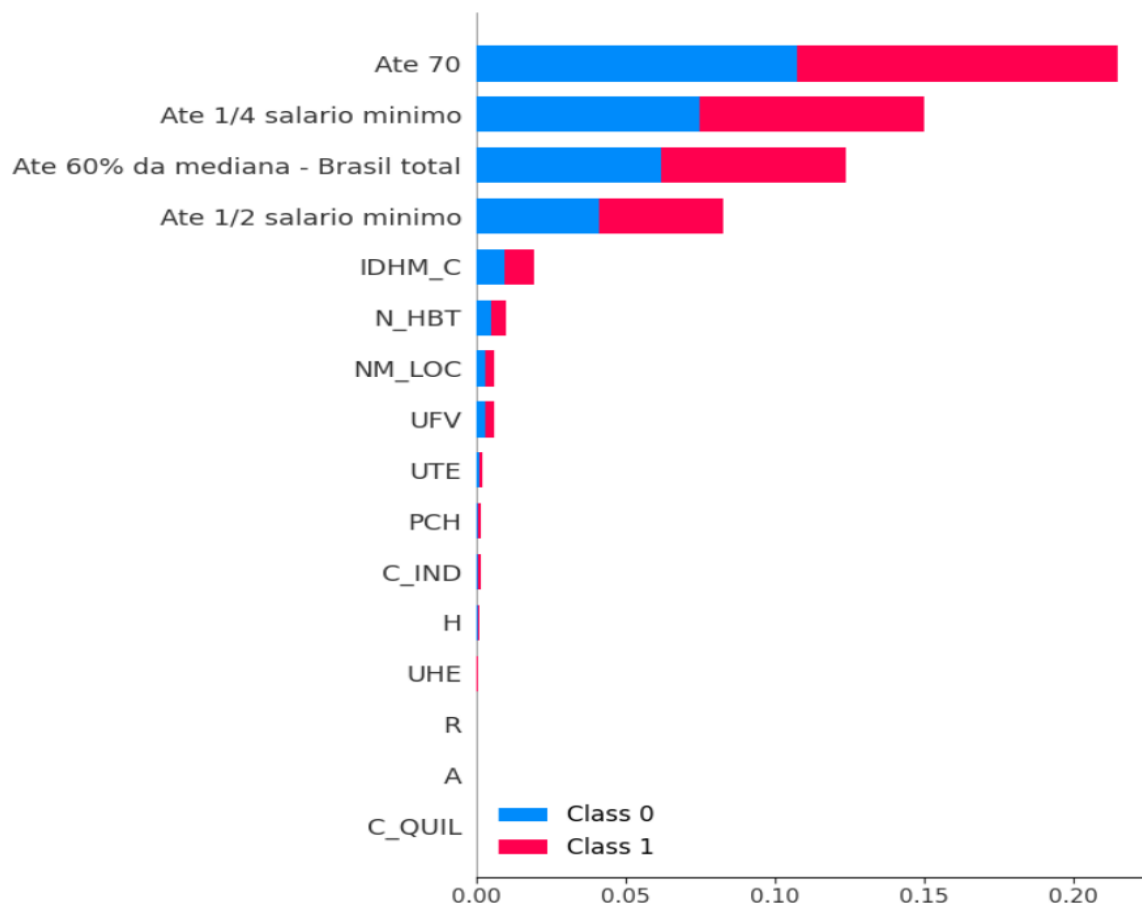


Figura 12: Gráfico SHAP de importância das variáveis para a formação de clusters.

Fonte: Elaboração própria

Com base no gráfico apresentado, é possível realizar as seguintes observações:

1. As características mais importantes para a formação dos clusters são "Ate 70", "Ate 1/4 salario minimo", "Ate 60% da mediana - Brasil total" e "Ate 1/2 salario minimo". Essas características estão relacionadas aos níveis de renda da população e apresentam os maiores valores de importância. Considerando que são barreiras de gravidade aquelas que demandam maior cuidado.
2. As características "IDHM_C" (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal) e "N_HBT" (Número de habitantes) também têm uma importância considerável na formação dos clusters. Essas são variáveis pertencentes à dimensão social, em sua maioria consideradas de impacto e gravidade.
3. Características como "UFV" (Usina Fotovoltaica), "UTE" (Usina Termelétrica), "PCH" (Pequena Central Hidrelétrica), "C_IND" (Comunidade indígena), "UHE" (Usina Hidrelétrica), "AL" (Acesso às localidades) e "C_QUIL" (Comunidade quilombola) têm uma importância relativamente menor na formação dos clusters.

Estão relacionadas às dimensões técnica e logística, consideradas em sua maioria como variáveis de variabilidade e impacto.

5.1.2 Análise dos clusters

A aplicação do algoritmo K-Prototypes na análise de clustering proporcionou uma segmentação das localidades amazônicas com base nos indicadores das barreiras identificadas. Os resultados revelaram a formação de dois clusters distintos, cada um com atributos específicos em relação a níveis de renda, presença de comunidades tradicionais, acessibilidade e infraestrutura disponível, como detalhado na Tabela 11.

Tabela 11: Características e Comparação do Cluster 0 com o Cluster 1 de Localidades na Região Amazônica

Cluster	Número de Localidades	População Total	Características	Diferenças do Cluster 0 com o Cluster 1
Cluster 0	109	2.054.773	• Maior presença de comunidades indígenas e quilombolas • Muitas localidades têm acesso por hidrovias e rodovias • Algumas localidades contam com usinas hidrelétricas ou pequenas centrais hidrelétricas • IDHM varia de níveis baixos a moderados Parcela significativa da população tem renda nominal mensal per capita de até metade do salário mínimo	• Localidades maiores e mais populosas • Maior presença de comunidades indígenas e quilombolas • Infraestrutura e acessibilidade ligeiramente melhores
Cluster 1	25	672.183	• Localidades menores e menos populosas • Acessibilidade é um desafio, com acesso apenas por hidrovias ou difícil acesso • Informações escassas sobre geração de energia elétrica • IDHM varia de níveis muito baixos a baixos • Parcela substancial da população tem renda nominal mensal per capita de até ¼ um quarto do salário mínimo	• Localidades menores e isoladas • Níveis de renda extremamente baixos • Maiores dificuldades de acesso e infraestrutura deficiente

Fonte: Elaboração própria

O Cluster 0 é o mais numeroso, abrangendo 109 localidades distribuídas principalmente pelo interior do Amazonas, além de algumas localidades em Roraima e no Pará. Este cluster é caracterizado por uma forte presença de comunidades indígenas e quilombolas, evidenciando uma diversidade étnica e cultural significativa nessas regiões. A acessibilidade a essas localidades é razoável, várias delas contando com acesso por hidrovias e rodovias. Algumas dessas localidades contam com usinas hidrelétricas ou pequenas centrais hidrelétricas como fonte de geração de energia, indicando um nível básico de infraestrutura energética. No entanto, o IDHM varia de níveis baixos a moderados, refletindo os desafios enfrentados por essas comunidades em termos de desenvolvimento socioeconômico.

Por outro lado, o Cluster 1 é menor, compreendendo 25 localidades dispersas pelo Amazonas, Amapá, Rondônia e Roraima. Essas localidades tendem a ser comunidades menores, com populações reduzidas. A acessibilidade é um desafio mais proeminente neste cluster, com algumas localidades tendo acesso apenas por hidrovias ou enfrentando dificuldades significativas de acesso. Informações sobre a geração de energia elétrica são escassas para muitas dessas localidades, sugerindo uma possível falta de infraestrutura energética adequada. O IDHM varia de níveis muito baixos a moderados, refletindo os obstáculos enfrentados por essas comunidades em termos de desenvolvimento humano. Além disso, uma parcela substancial da população tem rendimentos nominais mensais per capita de até um quarto do salário mínimo, indicando níveis de renda extremamente baixos e uma situação de pobreza mais acentuada em comparação com o Cluster 0.

As principais diferenças entre os clusters residem no tamanho das localidades, na presença de comunidades tradicionais, na acessibilidade e na infraestrutura disponível. Enquanto o Cluster 0 é composto por localidades maiores, com populações mais numerosas e maior presença de comunidades indígenas e quilombolas (Figura 13), o Cluster 1 é formado por comunidades menores, muitas vezes isoladas, com populações reduzidas e níveis de renda mais baixos (Figura 14).



Figura 13: Localidades isoladas do cluster 0. **Fonte:** Elaboração própria

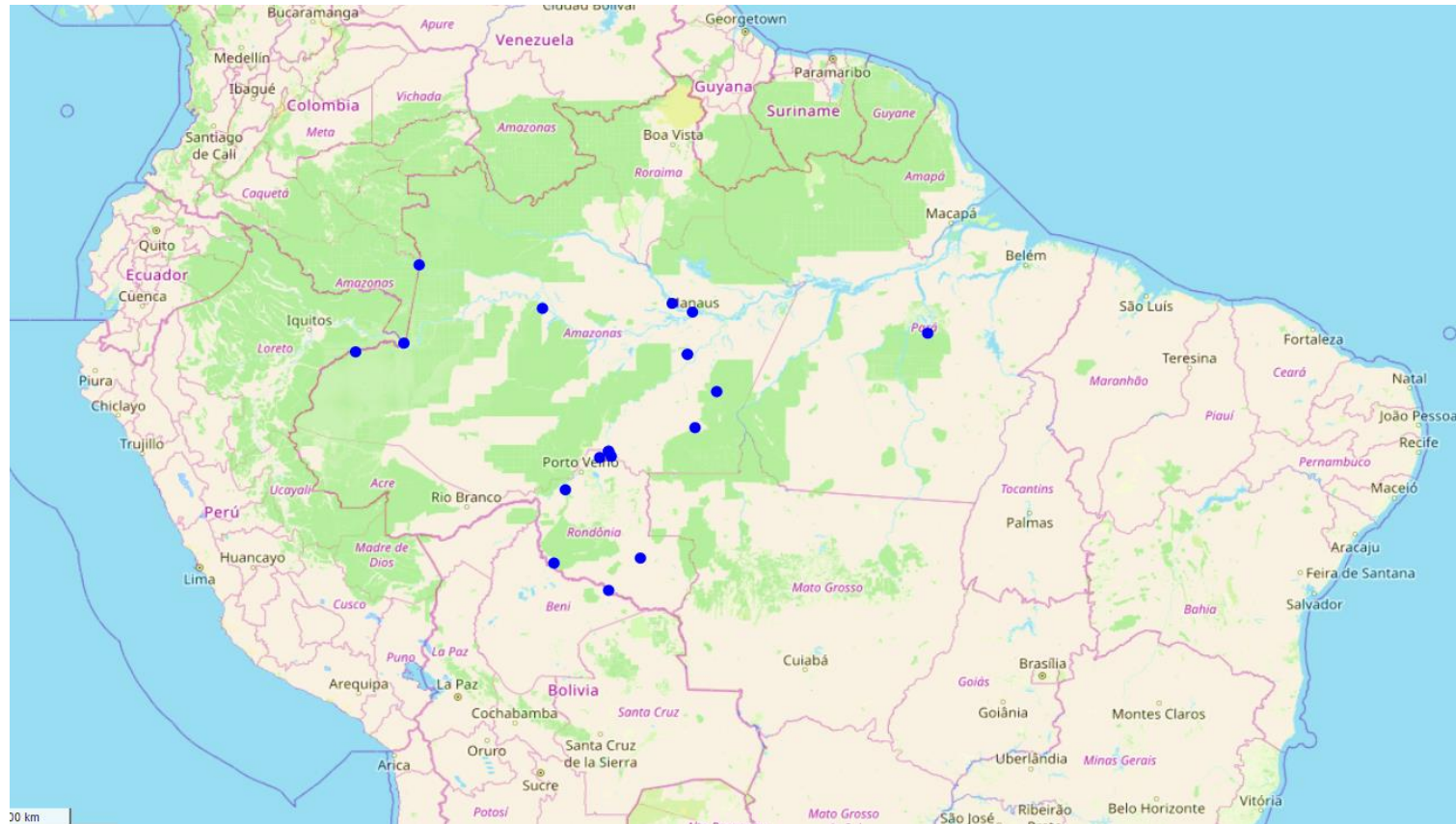


Figura 14: Localidades isoladas do cluster 1. **Fonte:** Elaboração própria

Além disso, o Cluster 0 tem uma infraestrutura e acessibilidade ligeiramente melhores, com mais localidades com acesso por rodovias e hidrovias, bem como fontes de geração de energia elétrica, enquanto o Cluster 1 enfrenta maiores desafios nessas áreas. Essas observações fornecem insights valiosos sobre as características e semelhanças dentro de cada cluster, bem como as diferenças entre eles, destacando os desafios e as necessidades específicas enfrentadas por essas comunidades em termos de desenvolvimento socioeconômico, infraestrutura e acesso a serviços básicos.

Os resultados da análise de clusters oferecem uma base essencial para desenvolver estratégias de mitigação personalizadas para diferentes grupos de localidades, em consonância com o OE3. Por exemplo, o Cluster 0, pode requerer estratégias de mitigação que levem em conta seus aspectos culturais e tradicionais. Por outro lado, o Cluster 1, pode necessitar de estratégias que priorizem o acesso a financiamento e incentivos econômicos, visando tornar a energia solar mais acessível. Adicionalmente, os insights derivados da análise da importância das características podem guiar o desenvolvimento de estratégias específicas para enfrentar as barreiras mais críticas, tais como a falta de infraestrutura energética adequada, dificuldades de acesso e baixos níveis de desenvolvimento humano.

5.2. Discussão

Os resultados desta pesquisa fornecem uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias personalizadas de mitigação para cada grupo de localidades isoladas da Amazônia, considerando seu contexto geográfico, socioeconômico e ambiental. A análise abrangente das barreiras, indicadores, variáveis e estratégias associadas ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica nessas regiões permite uma compreensão aprofundada dos desafios e oportunidades específicos de cada cluster. A identificação das principais barreiras e sua conexão com os indicadores associados, realizada na seção 2.31, é fundamental para avaliar e classificar as barreiras de forma eficaz. Essa relação, resumida na Tabela 4, fornece uma base para o desenvolvimento de estratégias direcionadas para superar os obstáculos específicos enfrentados em cada grupo de localidades. Além disso, a revisão das estratégias propostas na literatura para mitigar as barreiras, apresentada na seção 2.3.2 e sintetizada na Tabela 5, oferece um conjunto abrangente de possíveis abordagens para superar os desafios identificados. Essas estratégias, que abrangem

aspectos técnicos, financeiros, regulatórios e participativos, podem ser adaptadas e combinadas de acordo com as necessidades e características de cada cluster.

A ACS, realizada na seção 2.3.3, revelou a relação entre as barreiras e as estratégias de mitigação, indicando que as barreiras relacionadas a aspectos econômicos e financeiros (B1, B2, B3 e B4) são as mais influentes e que a estratégia de implementação de mecanismos de financiamento e subsídios adequados (E1) é a mais adequada para mitigá-las. Além disso, as barreiras associadas a questões técnicas e de infraestrutura (B11, B12, B13, B16 e B18) podem ser abordadas com estratégias específicas, como a capacitação de mão de obra técnica especializada (E6) e o desenvolvimento de infraestrutura adequada (E7). Esses resultados da ACS se conectam com os achados das seções anteriores, que identificaram as principais barreiras, indicadores e variáveis associadas ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica nas regiões isoladas da Amazônia. A análise das variáveis mais influentes nessas localidades, realizada na seção 3.2, e a segmentação das localidades em grupos distintos com base nessas variáveis, apresentada na seção 4.2, fornecem um contexto valioso para a aplicação das estratégias de mitigação identificadas na ACS.

A técnica de agrupamento K-Prototypes, combinada com a FAMD, permitiu identificar dois clusters principais de localidades isoladas, cada um com características e desafios específicos. Com base nessa segmentação e nas relações entre barreiras, indicadores, variáveis e estratégias, é possível propor estratégias de mitigação personalizadas para cada cluster. Para o Cluster 0, que apresenta uma maior diversidade étnica e cultural, as estratégias devem levar em consideração as particularidades sociais e culturais dessas comunidades, buscando a participação e o engajamento da população local no processo de implementação da energia solar fotovoltaica. Além disso, a promoção de programas de capacitação e conscientização sobre a tecnologia solar pode contribuir para superar as barreiras relacionadas à falta de conhecimento específico (B7). Já para o Cluster 1, composto por localidades menores e mais isoladas, com acesso limitado e níveis de renda extremamente baixos, as estratégias devem focar na superação das barreiras econômicas e financeiras (B1, B2, B3 e B4), por meio da implementação de mecanismos de financiamento e subsídios adequados (E1). Além disso, o desenvolvimento de infraestrutura adequada (E7) e a capacitação de mão de obra

técnica especializada (E6) são estratégias essenciais para superar as barreiras técnicas e de infraestrutura enfrentadas por essas localidades.

A análise SHAP, realizada na seção 5.2.1, identificou as variáveis mais importantes para a formação dos clusters, com destaque para os níveis de renda da população e o IDHM. Essa informação é crucial para priorizar ações e investimentos nas áreas mais críticas, buscando melhorar as condições de vida das comunidades e criar um ambiente propício para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica.

Para aprofundar a compreensão dessas inter-relações, aplicou-se o princípio matemático de transitividade (BOOTHBY; WILSON, 1979). Esse princípio estabelece que, se a variável A está relacionada à variável B , e a variável B está relacionada à variável C , então a variável A também está relacionada à variável C . A aplicação desse princípio à análise das barreiras, indicadores e variáveis proporciona uma visão abrangente e sistemática da rede de relações entre esses elementos-chave. A Figura 15 ilustra claramente essas inter-relações, destacando a importância de considerar a dinâmica complexa entre as barreiras, indicadores e variáveis no contexto investigado.

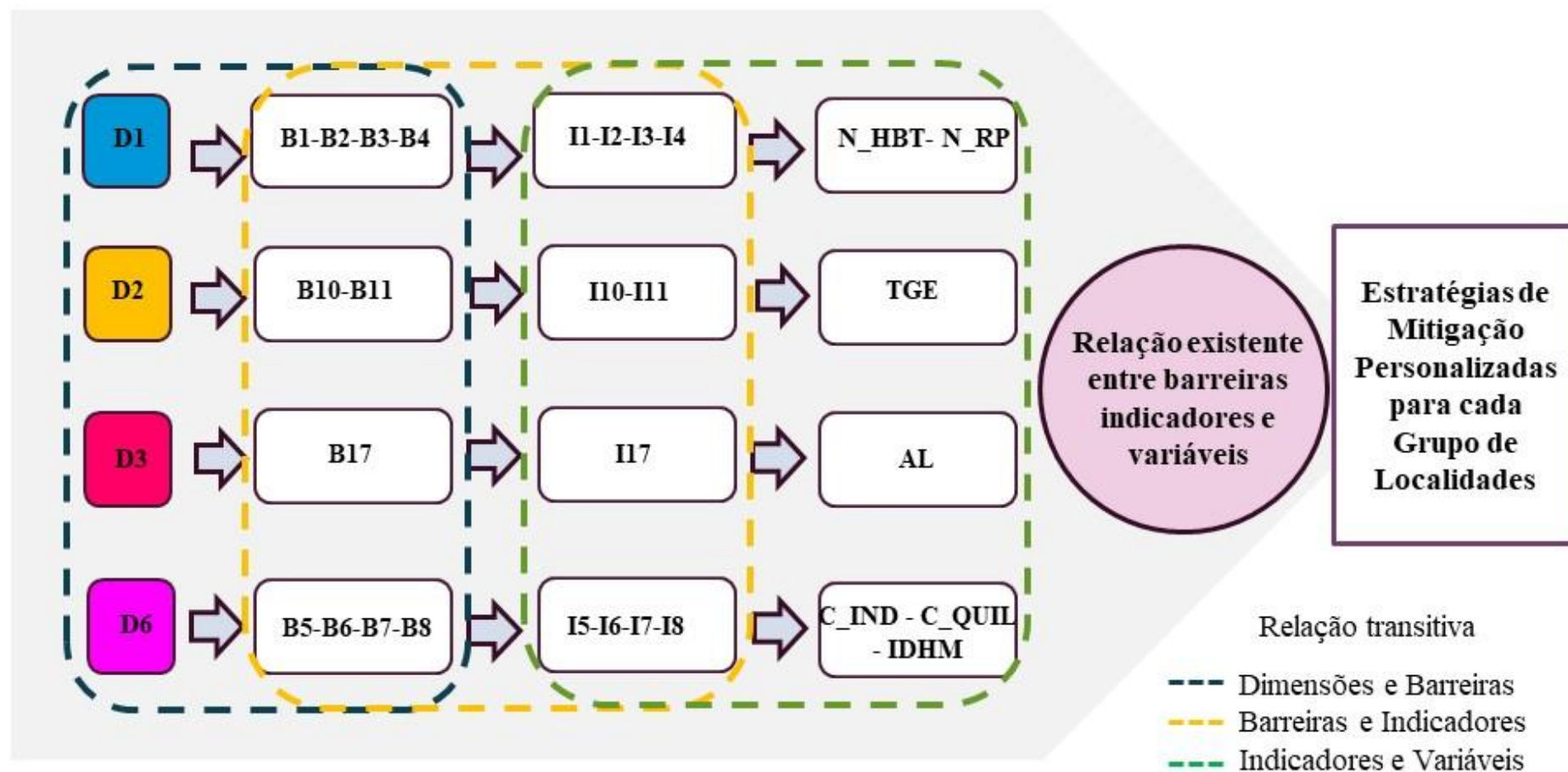


Figura 15: Relação existente entre barreiras, indicadores e variáveis. **Fonte:** Elaboração própria

5.2.1 Estratégias específicas por cluster

Na seção anterior, foi evidenciada a relação entre as barreiras, os indicadores, as variáveis e as estratégias mais influentes para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica nas localidades isoladas da Amazônia. Com base nessas análises, esta seção apresenta estratégias específicas para cada cluster, levando em consideração suas especificidades e os resultados obtidos nas seções anteriores. Por meio de uma revisão da literatura, foram identificadas estratégias que têm sido aplicadas com sucesso em contextos similares e que podem ser adaptadas às realidades das localidades isoladas da Amazônia.

Para o Cluster 0:

Resultados teóricos:

A Análise de Correspondência Simples (ACS) e a revisão da literatura indicaram a importância de abordar barreiras econômicas e financeiras (B1, B2, B3 e B4) como as mais influentes. A literatura também destacou a relevância de considerar aspectos socioculturais no desenvolvimento de estratégias. Além disso, a ACS mostrou a importância de estratégias como capacitação de mão de obra (E6) e desenvolvimento de infraestrutura (E7) para esse cluster.

Resultados práticos:

As estratégias propostas para o Cluster 0 incluem o estabelecimento de parcerias público-privadas para oferecer subsídios e criar mecanismos de cooperação financeira, como cooperativas e fundos comunitários. Há um foco em investir na formação e capacitação de mão de obra técnica local através de parcerias com instituições de ensino e organizações não governamentais, respeitando a diversidade étnica e cultural das comunidades indígenas e quilombolas. As estratégias também contemplam o fortalecimento de redes de apoio técnico e social, visando superar os desafios socioeconômicos específicos dessas comunidades.

Para o Cluster 1:

Resultados teóricos:

A literatura e a ACS enfatizaram a necessidade de soluções financeiras adaptadas para comunidades de baixa renda. A ACS destacou a importância de estratégias como soluções tecnológicas para armazenamento (E8) e sistemas modulares e compactos (E10). A literatura também abordou a importância de considerar as barreiras logísticas e de infraestrutura em regiões isoladas, bem como a necessidade de capacitação local e desenvolvimento de competências.

Resultados práticos:

As estratégias propostas para o Cluster 1 incluem a busca de cooperação financeira adaptada às comunidades menores e mais isoladas, considerando os níveis de renda extremamente baixos. Há um foco na adoção de sistemas modulares e compactos para facilitar o transporte e a instalação, levando em conta as dificuldades de acesso e a falta de infraestrutura. As estratégias também contemplam a busca por soluções tecnológicas para armazenamento eficiente, o fortalecimento de redes de apoio técnico e social, e a capacitação da população local para viabilizar a aquisição de equipamentos e gerar emprego e renda com a energia solar fotovoltaica.

Essas estratégias específicas para cada cluster, adaptadas às especificidades das localidades isoladas da Amazônia, visam superar as barreiras identificadas e promover a adoção sustentável da energia solar fotovoltaica nessas comunidades. Ao considerar os aspectos econômicos, sociais, culturais, técnicos e logísticos de cada grupo de localidades, essas estratégias personalizadas têm maior probabilidade de sucesso e impacto positivo na transição energética da região.

É importante ressaltar que a seleção das estratégias de mitigação não se baseou apenas na identificação das variáveis influentes e das barreiras associadas, mas também levou em consideração a viabilidade e a adequação dessas estratégias ao contexto específico de cada cluster. Isso significa que as estratégias propostas foram cuidadosamente avaliadas em termos de sua exequibilidade, levando em conta fatores como recursos disponíveis, capacidade técnica, aceitação da comunidade e potencial de impacto a longo prazo, conforme evidenciado nas Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 12: Estratégias de mitigação personalizadas para o cluster 0.

Cluster	Variáveis	Barreiras relacionadas	Indicadores relacionados	Estratégias	Referências
Cluster 0	N_RP	B1-B2-B3-B4	I1-I2-3-I4	- Estabelecer parcerias público-privadas para oferecer subsídios e criar mecanismos de cooperação financeira, como cooperativas e fundos comunitários, levando em consideração a diversidade étnica e cultural das comunidades indígenas e quilombolas - Viabilizar a aquisição de equipamentos e aumentar a eficiência dos sistemas de energia solar fotovoltaica	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; REBUCAS <i>et al.</i> , 2024; SHYU, 2023; WANG <i>et al.</i> , 2024; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
	IDHM	B6-B9	I6-I9	- Investir na formação e capacitação de mão de obra técnica local por meio de parcerias com instituições de ensino e organizações não governamentais, considerando os desafios socioeconômicos enfrentados pelas comunidades - Melhorar as condições de emprego e garantir a qualidade e sustentabilidade dos sistemas de energia solar fotovoltaica	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; NURU <i>et al.</i> , 2021; VIDES-PRADO <i>et al.</i> , 2018; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
	N_HBT	B1-B2-B3-B4	I1-I2-I3-I4	Criar mecanismos de cooperação financeira adaptados ao contexto das localidades com populações mais numerosas	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; REBUCAS <i>et al.</i> , 2024; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
	C_IND/ C_QUIL	B5-B7	I5-I7	- Fortalecer redes de apoio técnico e social, estabelecer metas e regulamentos favoráveis, considerando os aspectos técnicos, econômicos, sociais, ambientais e culturais específicos das comunidades indígenas e quilombolas - Aumentar a confiabilidade, eficiência e sustentabilidade dos sistemas de energia solar fotovoltaica, respeitando suas tradições e conhecimentos	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; NURU <i>et al.</i> , 2021; VIDES-PRADO <i>et al.</i> , 2018; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)

Fonte: Elaboração própria

Tabela 13: Estratégias de mitigação personalizadas para o cluster 1.

Cluster	Variáveis	Barreiras relacionadas	Indicadores relacionados	Estratégias	Referências
Cluster 1	N_RP	B1-B2-B3-B4-B8	I1-I2-I3-I4-I8	• Buscar cooperação financeira adaptados às comunidades menores e mais isoladas • Capacitar a população local, considerando os níveis de renda extremamente baixos, a fim de viabilizar a aquisição de equipamentos, aumentar a eficiência dos sistemas e gerar emprego e renda com a energia solar fotovoltaica	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; LÓPEZ-GONZÁLEZ <i>et al.</i> , 2019; SHYU, 2023; SURROOP <i>et al.</i> , 2018; VIDES-PRADO <i>et al.</i> , 2018; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
	IDHM	B6-B8-B9	I6-I8-I9	• Estabelecer parcerias com organizações públicas e privadas para oferecer subsídios adaptados às comunidades com populações reduzidas • Investir na formação e capacitação de mão de obra local, melhorando as condições de emprego e garantindo a qualidade e sustentabilidade dos sistemas de energia solar fotovoltaica	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; SURROOP <i>et al.</i> , 2018; VIDES-PRADO <i>et al.</i> , 2018; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
	N_HBT	B1-B2-B3-B4	I1-I2-I3-I4	• Facilitar o acesso ao crédito e à poupança, viabilizando a aquisição de equipamentos de energia solar fotovoltaica	(DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; SURROOP <i>et al.</i> , 2018; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
	AL	B14-B17	I14-I17	• Buscar apoio comunitario, político e privado para obtenção de licenças de direitos da terra e da água • Utilizar sistemas de proteção contra intempéries, aproveitar estruturas existentes para fixação dos painéis • Adotar sistemas modulares e compactos para facilitar o transporte e instalação, considerando as dificuldades de acesso e a falta de infraestrutura	(AKINADE <i>et al.</i> , 2018; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; VIDES-PRADO <i>et al.</i> , 2018; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)

TGE	B10-B11- B12-B16- B18-B19	I10-I11-I12- I16-I18-I19	• Fortalecer redes de apoio técnico e social, buscar soluções tecnológicas para armazenamento eficiente, obter orientação para licenciamento • Estabelecer metas e regulamentos favoráveis, utilizar sistemas de proteção • Garantir a qualidade, sustentabilidade e viabilidade dos projetos de energia solar fotovoltaica em diferentes tipos de geração de energia elétrica	(ARCA <i>et al.</i> , 2023; DA PONTE <i>et al.</i> , 2021a; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022; REBUCAS <i>et al.</i> , 2024; WU, M. <i>et al.</i> , 2022)
-----	---------------------------------	-----------------------------	--	--

Fonte: Elaboração própria

Com base nos resultados apresentados nas Tabela 12 e 13, é possível observar que as estratégias propostas para cada cluster estão diretamente relacionadas às variáveis mais influentes, às barreiras e aos indicadores identificados. Essa relação reforça a relevância e a adequação das estratégias propostas para superar os desafios específicos enfrentados pelas localidades isoladas da Amazônia no desenvolvimento da energia solar fotovoltaica com baterias.

A comparação entre os resultados teóricos e práticos revela uma forte coerência na abordagem proposta. As estratégias desenvolvidas para cada cluster não apenas refletem as barreiras e necessidades identificadas na literatura, mas também são adaptadas às realidades locais reveladas pela análise de clusters. Por exemplo, a ênfase em parcerias público-privadas e mecanismos de cooperação financeira no Cluster 0 alinha-se com as recomendações teóricas de Da Ponte et al. (2021) e Rebucas et al. (2024) sobre a importância de abordagens colaborativas. Da mesma forma, a proposta de sistemas modulares e compactos para o Cluster 1 reflete diretamente as recomendações de Arca et al. (2023) e Shyu (2023) sobre soluções técnicas adaptadas para regiões isoladas.

No Cluster 0, as variáveis mais influentes, como o N_RP, o IDHM, N_HBT e a presença de C_IND/C_QUIL, estão associadas a barreiras econômicas, sociais e culturais. As estratégias propostas, como o estabelecimento de parcerias público-privadas, a criação de mecanismos de cooperação financeira adaptados ao contexto das localidades e o investimento na capacitação de mão de obra local, levando em consideração a diversidade étnica e cultural, estão alinhadas com as recomendações apresentadas nos estudos de referência (DA PONTE *et al.*, 2021; NURU *et al.*, 2021; REBUCAS *et al.*, 2024; SHYU, 2023; VIDES-PRADO *et al.*, 2018; WANG *et al.*, 2024; WU, M. *et al.*, 2022). Esses estudos destacam a importância de abordagens colaborativas e adaptadas às realidades locais para superar as barreiras econômicas, sociais e culturais.

Para o Cluster 1, as variáveis mais influentes, como o N_RP, IDHM, N_HBT), AL e TGE, estão relacionadas a barreiras econômicas, sociais, logísticas e técnicas. As estratégias propostas, como a busca de cooperação financeira adaptada às comunidades menores e mais isoladas, a capacitação da população local, a facilitação do acesso ao crédito, o apoio comunitário, político e privado para obtenção de licenças, a adoção de sistemas modulares e compactos, e o fortalecimento de redes de apoio técnico e social, estão em consonância com as

recomendações encontradas na literatura (ARCA *et al.*, 2023; DA PONTE *et al.*, 2021; LÓPEZ-GONZÁLEZ *et al.*, 2019; MATSUMOTO; MATSUMURA, 2022; REBUCAS *et al.*, 2024; SHYU, 2023; SURROOP *et al.*, 2018; VIDES-PRADO *et al.*, 2018; WU, M. *et al.*, 2022). Esses estudos enfatizam a necessidade de soluções financeiras, técnicas e logísticas adaptadas às realidades das comunidades isoladas, bem como a importância do envolvimento e do apoio dos diversos atores locais.

A relação direta entre as variáveis mais influentes, as barreiras, os indicadores e as estratégias propostas para cada cluster, conforme apresentado nas Tabela 12 e 13, demonstra a coerência e a fundamentação das estratégias sugeridas. Essa relação evidencia que as estratégias foram desenvolvidas com base em uma análise aprofundada das características e dos desafios específicos de cada grupo de localidades, levando em consideração os aspectos econômicos, sociais, culturais, logísticos e técnicos. Além disso, a discussão das estratégias em relação às pesquisas de referência reforça sua relevância e adequação, uma vez que estão alinhadas com as recomendações e boas práticas identificadas em estudos anteriores realizados em contextos similares.

Esta integração bem-sucedida entre teoria e prática aumenta significativamente a probabilidade de sucesso na implementação dessas estratégias. Ao fundamentar as propostas tanto em evidências teóricas quanto em dados práticos específicos das localidades amazônicas estudadas, a pesquisa oferece um roteiro robusto e contextualizado para superar as barreiras ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica nessas regiões. A abordagem holística, considerando aspectos econômicos, sociais, culturais, logísticos e técnicos, demonstra uma compreensão profunda dos desafios multifacetados enfrentados por essas comunidades e propõe soluções que são tanto inovadoras quanto enraizadas nas realidades locais.

Dessa forma, os resultados e a discussão das estratégias em relação às pesquisas de referência demonstram a solidez e a pertinência das estratégias propostas para superar as barreiras ao desenvolvimento da energia solar fotovoltaica nas localidades isoladas da Amazônia. Essa abordagem abrangente e adaptada às realidades locais, fundamentada em evidências e boas práticas, aumenta a probabilidade de sucesso e impacto positivo das estratégias propostas na promoção da adoção sustentável da energia solar fotovoltaica nessas comunidades.

6. Conclusões

A presente pesquisa abordou de forma abrangente e sistemática as barreiras para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica em regiões isoladas da Amazônia e propôs estratégias de mitigação adaptadas às características específicas de cada localidade. Por meio da identificação e análise das principais barreiras, do agrupamento das localidades com base em indicadores relacionados e da proposição de estratégias personalizadas, este estudo contribui para a compreensão dos desafios enfrentados e para a formulação de soluções eficazes e sustentáveis.

A identificação e análise das principais barreiras enfrentadas para o desenvolvimento da energia solar em regiões isoladas da Amazônia foram realizadas por meio de uma revisão abrangente da literatura. Essa revisão permitiu a identificação de 19 barreiras, classificadas em 6 dimensões: econômica e financeira, social e cultural, técnica, política e regulatória, ecológica e geográfica, e logística. A análise dessas barreiras permitiu uma compreensão mais aprofundada dos obstáculos enfrentados para a disseminação da energia solar fotovoltaica nas regiões isoladas da Amazônia, respondendo assim o OE1. Além disso, para atender o OE2, a revisão da literatura também possibilitou a identificação de estratégias de mitigação para superar essas barreiras. Essa compreensão é fundamental para o desenvolvimento de estratégias de mitigação eficazes e adaptadas às realidades locais. A relação entre barreiras e estratégias foi identificada por meio da ACS. Essa análise permitiu uma melhor compreensão da influência das barreiras no desenvolvimento da GSFb em SIs.

Para atender ao OE3, as localidades da Amazônia foram agrupadas com base em indicadores relacionados às barreiras identificadas. Além disso, foram utilizados dados provenientes das bases do IBGE e da EPE. Esses dados incluem variáveis sociais, técnicas, econômicas e logísticas, possibilitando uma caracterização completa das localidades analisadas.

A modelagem proposta para o agrupamento das localidades envolveu a aplicação do algoritmo K-Prototypes, que é especialmente adequado para lidar com dados mistos (variáveis numéricas e categóricas).

O processo de agrupamento foi realizado em cinco etapas: pré-processamento dos dados, redução de dimensionalidade com FAMD, aplicação do algoritmo K-Prototypes, cálculo dos centroides difusos e avaliação da qualidade dos clusters com o índice de Silhouette. A aplicação dessa modelagem resultou na formação de dois clusters distintos: o Cluster 0, e o Cluster 1. Esses clusters apresentam características e desafios específicos, evidenciados pelas variáveis mais influentes em cada um deles. No Cluster 0, destacam-se a influência do nível de renda da população, do Índice de Desenvolvimento Humano Municipal e da presença de comunidades indígenas e quilombolas. Já no Cluster 1, as variáveis mais influentes estão relacionadas ao nível de renda extremamente baixo, aos desafios de acessibilidade e à infraestrutura limitada de geração de energia elétrica. O agrupamento das localidades com base nesses indicadores permite uma compreensão mais precisa das realidades locais e dos desafios específicos enfrentados em cada cluster. Essa compreensão é essencial para o desenvolvimento de estratégias de mitigação personalizadas e eficazes.

Finalmente, com base nos resultados obtidos nos objetivos específicos anteriores, foram propostas estratégias de mitigação personalizadas para cada grupo de localidades, considerando seu contexto geográfico, socioeconômico e ambiental, para atender ao OE4.

Para o Cluster 0, as estratégias propostas envolvem o estabelecimento de parcerias público-privadas para oferecer subsídios e criar mecanismos de cooperação financeira adaptados à realidade das comunidades, o investimento na formação e capacitação de mão de obra técnica local, respeitando a diversidade étnica e cultural das comunidades indígenas e quilombolas, e o fortalecimento de redes de apoio técnico e social. Já para o Cluster 1, as estratégias incluem a busca por cooperação financeira adaptada às comunidades menores e mais isoladas, a capacitação da população local para viabilizar a aquisição de equipamentos e gerar emprego e renda com a energia solar fotovoltaica, a obtenção de apoio comunitário, político e privado para licenças de direitos da terra e da água, a utilização de sistemas de proteção contra intempéries e a adoção de sistemas modulares e compactos para facilitar o transporte e a instalação.

Essas estratégias personalizadas levam em consideração as variáveis mais influentes, as barreiras identificadas e os indicadores relacionados em cada cluster. Dessa forma, buscam atender às necessidades e desafios específicos de cada grupo

de localidades, aumentando a eficácia e a sustentabilidade das ações propostas. Embora este estudo tenha fornecido insights valiosos, é importante reconhecer suas limitações. A análise foi baseada principalmente em dados secundários e literatura existente, o que pode não capturar completamente as realidades dinâmicas no terreno. Além disso, a categorização em apenas dois clusters pode simplificar excessivamente a diversidade das localidades amazônicas. Com base nas limitações identificadas e nas oportunidades de expansão desta pesquisa, recomenda-se as seguintes direções para trabalhos futuros:

1. Realizar pesquisas de campo extensivas para validar e refinar os resultados obtidos, proporcionando uma compreensão mais precisa das realidades locais.
2. Explorar a possibilidade de mais clusters para revelar nuances adicionais entre as localidades, capturando uma maior diversidade de contextos na Amazônia.
3. Desenvolver estudos de caso detalhados em localidades representativas de cada cluster, oferecendo uma compreensão mais profunda dos desafios e oportunidades específicas.
4. Investigar mais detalhadamente as implicações socioeconômicas da implementação de GSFb nas comunidades isoladas, incluindo aspectos de emprego, renda e qualidade de vida.
5. Explorar sinergias potenciais entre a energia solar fotovoltaica e outras tecnologias de energia renovável, visando o desenvolvimento de sistemas híbridos mais robustos e adaptados às condições locais.
6. Analisar e propor políticas públicas específicas para fomentar a adoção de energia solar fotovoltaica em regiões isoladas, considerando os resultados obtidos nesta pesquisa.

Por fim, é importante destacar que os resultados e insights obtidos nesta pesquisa podem servir como referência para estudos futuros e para a elaboração de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento da energia solar fotovoltaica em regiões isoladas, não apenas na Amazônia, mas também em outras áreas com características similares. A abordagem metodológica adotada pode ser replicada e adaptada para diferentes contextos, contribuindo para a disseminação de soluções energéticas sustentáveis e inclusivas em todo o país.

Referências bibliográficas

- ACKAH, I.; ASOMANI, M. Empirical Analysis of Renewable Energy Demand in Ghana with Autometrics. *International Journal of Energy Economics and Policy*, [s. l.], v. 5, n. 3, p. 754–758, 2015.
- ADHIKARI, S.; MITHULANANTHAN, N.; DUTTA, A.; MATHIAS, A. J. Potential of sustainable energy technologies under CDM in Thailand: Opportunities and barriers. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 33, n. 9, p. 2122–2133, 2008.
- AKINADE, O. O.; OYEDELE, L. O.; AJAYI, S. O.; BILAL, M.; ALAKA, H. A.; OWOLABI, H. A.; ARAWOMO, O. O. Designing out construction waste using BIM technology: Stakeholders' expectations for industry deployment. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 180, p. 375–385, 2018.
- ALI SADAT, S.; VAKILALROAYA FINI, M.; HASHEMI-DEZAKI, H.; NAZIFIFARD, M. Barrier analysis of solar PV energy development in the context of Iran using fuzzy AHP-TOPSIS method. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, [s. l.], v. 47, p. 101549, 2021.
- ALLOUI, F.; DINCER, I. *Exergy for A Better Environment and Improved Sustainability 2: Applications*. [S. l.]: Springer, 2018. 2018.
- ANDRADE, C. S.; ROSA, L. P.; DA SILVA, N. F. Generation of electric energy in isolated rural communities in the Amazon Region a proposal for the autonomy and sustainability of the local populations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 493–503, 2011.
- ARAÚJO, C. de F. *Eletrificação rural em comunidades isoladas na Amazônia : introdução da energia solar fotovoltaica na Reserva Extrativista do Rio Unini, AM*. [s. l.], 2015. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/6158>. Acesso em: 26 jun. 2023.
- ARCA, D.; KESKIN CITIROGLU, H.; YALÇINKAYA, N. M. Determining optimal solar power plant (SPP) sites by technical and environmental analysis: the case of Safranbolu, Türkiye. *razm*, [s. l.], v. 30, n. 17, p. 50829–50846, 2023.
- ARIA, M.; CUCCURULLO, C. bibliometrix: An R-tool for comprehensive science mapping analysis. *Journal of Informetrics*, [s. l.], v. 11, n. 4, p. 959–975, 2017.
- ASANTE, D.; AMPAH, J. D.; AFRANE, S.; ADJEI-DARKO, P.; ASANTE, B.; FOSU, E.; DANKWAH, D. A.; AMOH, P. O. Prioritizing strategies to eliminate barriers to renewable

energy adoption and development in Ghana: A CRITIC-fuzzy TOPSIS approach. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 195, p. 47–65, 2022a.

ASANTE, D.; AMPAH, J. D.; AFRANE, S.; ADJEI-DARKO, P.; ASANTE, B.; FOSU, E.; DANKWAH, D. A.; AMOH, P. O. Prioritizing strategies to eliminate barriers to renewable energy adoption and development in Ghana: A CRITIC-fuzzy TOPSIS approach. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 195, p. 47–65, 2022b.

ASANTE, D.; HE, Z.; ADJEI, N. O.; ASANTE, B. Exploring the barriers to renewable energy adoption utilising MULTIMOORA- EDAS method. *Energy Policy*, [s. l.], v. 142, p. 111479, 2020.

BADAMPUDI, D.; WOHLIN, C.; PETERSEN, K. Experiences from using snowballing and database searches in systematic literature studies. *Em: PROCEEDINGS OF THE 19TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVALUATION AND ASSESSMENT IN SOFTWARE ENGINEERING*, 2015, New York, NY, USA. Anais [...]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2015. p. 1–10. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2745802.2745818>. Acesso em: 12 mar. 2024.

BASE DE INFORMAÇÕES SOBRE OS POVOS INDÍGENAS E QUILOMBOLAS | IBGE. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/tipologias-do-territorio/27480-base-de-informacoes-sobre-os-povos-indigenas-e-quilombolas.html?edicao=27481&t=acesso-ao-produto>. Acesso em: 17 nov. 2023.

BAZILIAN, M.; ONYEJI, I.; LIEBREICH, M.; MACGILL, I.; CHASE, J.; SHAH, J.; GIELEN, D.; ARENT, D.; LANDFEAR, D.; ZHENGRONG, S. Re-considering the economics of photovoltaic power. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 53, p. 329–338, 2013.

BEH, E. J. Simple Correspondence Analysis of Ordinal Cross-Classifications Using Orthogonal Polynomials. *Biometrical Journal*, [s. l.], v. 39, n. 5, p. 589–613, 1997.

BEZDEK, J. C.; KELLER, J.; KRISNAPURAM, R.; PAL, N. *Fuzzy Models and Algorithms for Pattern Recognition and Image Processing*. [S. l.]: Springer Science & Business Media, 1999. 1999.

BEZERRA, P. B. da S.; CALLEGARI, C. L.; RIBAS, A.; LUCENA, A. F. P.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; KOBERLE, A.; SZKLO, A.; SCHAEFFER, R. The power of light: socio-economic and environmental implications of a rural electrification program in Brazil. *Environmental Research Letters*, [s. l.], v. 12, n. 9, p. 095004, 2017.

BIERNACKI, P.; WALDORF, D. Snowball Sampling: Problems and Techniques of Chain Referral Sampling. *Sociological Methods & Research*, [s. l.], v. 10, n. 2, p. 141–163, 1981.

BLECHINGER, P.; CADER, C.; BERTHEAU, P.; HUYSKENS, H.; SEGUIN, R.; BREYER, C. Global analysis of the techno-economic potential of renewable energy hybrid systems on small islands. *Energy Policy*, [s. l.], v. 98, p. 674–687, 2016.

BOOTHBY, W. M.; WILSON, E. N. Determination of the Transitivity of Bilinear Systems. *SIAM Journal on Control and Optimization*, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 212–221, 1979.

CAIADO, R.; SCAVARDA, L. F.; VIDAL, G.; DE MATTOS NASCIMENTO, D. L.; GARZA-REYES, J. A. A taxonomy of critical factors towards sustainable operations and supply chain management 4.0 in developing countries. Springer Nature, [s. l.], 2024.

CALDAS, L.; NOGUEIRA, G.; MENDONÇA, M.; PEREIRA, E. EDIFICAÇÕES ENERGIA ZERO: ESTUDO DE CASO PARA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS UTILIZANDO A AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV). [S. l.: s. n.], 2017. 2017.

CAO, L.; ZHAO, Z.; WANG, D. Clustering Algorithms. *Em*: CAO, Lin; ZHAO, Zongmin; WANG, Dongfeng (org.). Target Recognition and Tracking for Millimeter Wave Radar in Intelligent Transportation. Singapore: Springer Nature, 2023. p. 97–122. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-981-99-1533-0_5. Acesso em: 17 jul. 2023.

CLIFTON, J.; BORUFF, B. J. Assessing the potential for concentrated solar power development in rural Australia. *Energy Policy*, [s. l.], v. 38, n. 9, Special Section on Carbon Emissions and Carbon Management in Cities with Regular Papers, p. 5272–5280, 2010.

COELHO, T.; VALDÉS SERRA, J. Tecnologias para Reciclagem de Sistemas Fotovoltaicos: Impactos Ambientais. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, [s. l.], v. 15, 2018.

CUESTA, M. A.; CASTILLO-CALZADILLA, T.; BORGES, C. E. A critical analysis on hybrid renewable energy modeling tools: An emerging opportunity to include social indicators to optimise systems in small communities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 122, p. 109691, 2020.

DA PONTE, G. P.; CALILI, R. F.; SOUZA, R. C. Energy generation in Brazilian isolated systems: Challenges and proposals for increasing the share of renewables based on a multicriteria analysis. *Energy for Sustainable Development*, [s. l.], v. 61, p. 74–88, 2021a.

DA PONTE, G. P.; CALILI, R. F.; SOUZA, R. C. Energy generation in Brazilian isolated systems: Challenges and proposals for increasing the share of renewables based on a multicriteria analysis. *Energy for Sustainable Development*, [s. l.], v. 61, p. 74–88, 2021b.

DA SILVA PEREIRA, J.; SANTOS, M. A. O.; DE LIMA BANDEIRA, F.; SOARES, F. I. L.; VIEIRA, T. A. Electrification in Remote Regions: An Analysis of the More Light for Amazon Program. *Energies*, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 4663, 2023a.

DA SILVA PEREIRA, J.; SANTOS, M. A. O.; DE LIMA BANDEIRA, F.; SOARES, F. I. L.; VIEIRA, T. A. Electrification in Remote Regions: An Analysis of the More Light for Amazon Program. *Energies*, [s. l.], v. 16, n. 12, p. 4663, 2023b.

DAI, J.; YANG, X.; WEN, L. Development of wind power industry in China: A comprehensive assessment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 97, p. 156–164, 2018.

DE FARIA, H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: Challenges and prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 75, p. 469–475, 2017.

DENG, S.; HE, Z.; XU, X. G-ANMI: A mutual information based genetic clustering algorithm for categorical data. *Knowledge-Based Systems*, [s. l.], v. 23, n. 2, p. 144–149, 2010.

DINCER, I. Renewable energy and sustainable development: a crucial review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 157–175, 2000.

DOORGA, J. R. S.; RUGHOPUTH, S. D. D. V.; BOOJHAWON, R. Multi-criteria GIS-based modelling technique for identifying potential solar farm sites: A case study in Mauritius. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 133, p. 1201–1219, 2019.

DOUKAS, H.; KARAKOSTA, C.; PSARRAS, J. RES technology transfer within the new climate regime: A “helicopter” view under the CDM. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 13, n. 5, p. 1138–1143, 2009.

DUKU, M. H.; GU, S.; HAGAN, E. B. A comprehensive review of biomass resources and biofuels potential in Ghana. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 15, n. 1, p. 404–415, 2011.

EPE. <https://www.facebook.com/EPE.Brasil>. EPE publica Relatório de Planejamento para Atendimento aos Sistemas Isolados, Horizonte 2027 – Ciclo 2022. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/epe-publica-relatorio-de-planejamento-para-atendimento-aos-sistemas-isolados-horizonte-2027-ciclo-2022>. Acesso em: 5 maio 2023.

FERREIRA, A.; KUNH, S. S.; FAGNANI, K. C.; DE SOUZA, T. A.; TONEZER, C.; DOS SANTOS, G. R.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 81, p. 181–191, 2018.

FRANCO, A. C.; FRANCO, L. S. Photovoltaic solar energy and environmental impacts in the industrial sector: a critical overview of barriers and opportunities. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, [s. l.], v. 0, n. 0, p. 1–13, 2021.

FRONDEL, M.; RITTER, N.; SCHMIDT, C. M.; VANCE, C. Economic impacts from the promotion of renewable energy technologies: The German experience. *Energy Policy*, [s. l.], v. 38, n. 8, p. 4048–4056, 2010.

FUKUNAGA, K. *Introduction to Statistical Pattern Recognition*. [S. l.]: Elsevier, 2013. 2013.

GALDINO, M. A. ANÁLISE DE CUSTOS HISTÓRICOS DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL. São Paulo, [s. l.], 2012.

GARLET, T. B.; RIBEIRO, J. L. D.; DE SOUZA SAVIAN, F.; MAIRESSE SILUK, J. C. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 111, p. 157–169, 2019a.

GARLET, T. B.; RIBEIRO, J. L. D.; DE SOUZA SAVIAN, F.; MAIRESSE SILUK, J. C. Paths and barriers to the diffusion of distributed generation of photovoltaic energy in southern Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 111, p. 157–169, 2019b.

GBONEY, W. Policy and regulatory framework for renewable energy and energy efficiency development in Ghana. *Climate Policy*, [s. l.], v. 9, n. 5, p. 508–516, 2009.

GOV.BR. Consultar o Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM). [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/pt-br/servicos-estaduais/consultar-o-indice-de-desenvolvimento-humano-municipal-idhm-1>. Acesso em: 21 jul. 2023.

GUERRA, L.; ROBLES, V.; BIELZA, C.; LARRAÑAGA, P. A comparison of clustering quality indices using outliers and noise. *Intelligent Data Analysis*, [s. l.], v. 16, n. 4, p. 703–715, 2012.

HEBERLE, H.; MEIRELLES, G. V.; DA SILVA, F. R.; TELLES, G. P.; MINGHIM, R. InteractiVenn: a web-based tool for the analysis of sets through Venn diagrams. *BMC Bioinformatics*, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 169, 2015.

HORVÁTH, D.; SZABÓ, R. Zs. Evolution of photovoltaic business models: Overcoming the main barriers of distributed energy deployment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 90, p. 623–635, 2018.

HOSSEININASAB, S. M. E.; ERSHADI, M. J. Optimization of the number of clusters: a case study on multivariate quality control results of segment installation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, [s. l.], v. 64, n. 5, p. 1049–1055, 2013.

HSU, C.-C.; LIN, S.-H.; TAI, W.-S. Apply extended self-organizing map to cluster and classify mixed-type data. *Neurocomputing*, [s. l.], v. 74, n. 18, p. 3832–3842, 2011.

HSUEH, S.-L.; FENG, Y.; SUN, Y.; JIA, R.; YAN, M.-R. Using AI-MCDM Model to Boost Sustainable Energy System Development: A Case Study on Solar Energy and Rainwater Collection in Guangdong Province. *Sustainability*, [s. l.], v. 13, n. 22, p. 12505, 2021.

HUANG, Z. Clustering Large Data Sets With Mixed Numeric And Categorical Values," *Proceedings Of 1st Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery And Data Mining*. [S. l.: s. n.], 1997. 1997.

HUANG, Z. Extensions to the k-Means Algorithm for Clustering Large Data Sets with Categorical Values. *Data Mining and Knowledge Discovery*, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 283–304, 1998.

HUANG, Z.; NG, M. K. A fuzzy k-modes algorithm for clustering categorical data. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, [s. l.], v. 7, n. 4, p. 446–452, 1999.

IBGE. Brasil | Cidades e Estados | IBGE. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados>. Acesso em: 5 maio 2023.

IEMA. Exclusão elétrica na Amazônia Legal: quem ainda está sem acesso à energia elétrica? *Em: INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA)*. fevereiro de 2021. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/produto/exclusao-eletrica-na-amazonia-legal-quem-ainda-esta-sem-acesso-a-energia-eletrica>. Acesso em: 5 maio 2023.

INCE, D.; VREDENBURG, H.; LIU, X. Drivers and inhibitors of renewable energy: A qualitative and quantitative study of the Caribbean. *Energy Policy*, [s. l.], v. 98, p. 700–712, 2016.

IRFAN, M.; YADAV, S.; SHAW, K. The adoption of solar photovoltaic technology among Indian households: Examining the influence of entrepreneurship. *Technological Forecasting and Social Change*, [s. l.], v. 169, p. 120815, 2021.

JAHANGOSHAH REZAEI, M.; YOUSEFI, S.; HAYATI, J. Root barriers management in development of renewable energy resources in Iran: An interpretative structural modeling approach. *Energy Policy*, [s. l.], v. 129, p. 292–306, 2019.

JALALI, S.; WOHLIN, C. Systematic literature studies: database searches vs. backward snowballing *Em: PROCEEDINGS OF THE ACM-IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON EMPIRICAL SOFTWARE ENGINEERING AND MEASUREMENT*, 2012, New York, NY, USA. Anais [...]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2012. p. 29–38. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2372251.2372257>. Acesso em: 12 mar. 2024.

JI, J.; BAI, T.; ZHOU, C.; MA, C.; WANG, Z. An improved k-prototypes clustering algorithm for mixed numeric and categorical data. *Neurocomputing*, [s. l.], v. 120, Image Feature Detection and Description, p. 590–596, 2013.

JONES, L. E. Renewable Energy Integration: Practical Management of Variability, Uncertainty, and Flexibility in Power Grids. [S. l.]: Academic Press, 2017. 2017.

KAHRAMAN, C.; KAYA, İ.; CEBI, S. A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process. *Energy*, [s. l.], v. 34, n. 10, 11th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, p. 1603–1616, 2009.

KARAKAYA, E.; SRIWANNAWIT, P. Barriers to the adoption of photovoltaic systems: The state of the art. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 49, p. 60–66, 2015.

KHALID, R.; LANDINI, S.; VALASAI, G. D.; KHALID, F.; SANDWELL, P. Towards equitable and inclusive energy systems for remote off-grid communities: A socio-technical assessment of solar power for village Helario in Tharparkar, Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, [s. l.], v. 4, p. 100067, 2023.

KIM, D.-W.; LEE, K. H.; LEE, D. Fuzzy clustering of categorical data using fuzzy centroids. *Pattern Recognition Letters*, [s. l.], v. 25, n. 11, p. 1263–1271, 2004.

LIMA, J. G.; GIOVANELLA, L.; BOUSQUAT, A.; FAUSTO, M.; MEDINA, M. G. Barreiras de acesso à Atenção Primária à Saúde em municípios rurais remotos do Oeste do Pará. *Trabalho, Educação e Saúde*, [s. l.], v. 20, p. e00616190, 2022.

LLETÍ, R.; ORTIZ, M. C.; SARABIA, L. A.; SÁNCHEZ, M. S. Selecting variables for k-means cluster analysis by using a genetic algorithm that optimises the silhouettes. *Analytica Chimica Acta*, [s. l.], v. 515, n. 1, Papers presented at the 5th COLLOQUIUM CHEMIOMETRICUM MEDITERRANEUM, p. 87–100, 2004.

LLOYD, S. Least squares quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*, [s. l.], v. 28, n. 2, p. 129–137, 1982.

LÓPEZ-GONZÁLEZ, A.; FERRER-MARTÍ, L.; DOMENECH, B. Sustainable rural electrification planning in developing countries: A proposal for electrification of isolated communities of Venezuela. *Energy Policy*, [s. l.], v. 129, p. 327–338, 2019.

LUNDBERG, S. M.; LEE, S.-I. A Unified Approach to Interpreting Model Predictions. *Em: ADVANCES IN NEURAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS*, 2017, [s. l.], . Anais [...]. [S. l.]: Curran Associates, Inc., 2017. Disponível em: <https://proceedings.neurips.cc/paper/2017/hash/8a20a8621978632d76c43dfd28b67767-Abstract.html>. Acesso em: 12 mar. 2024.

LUTHRA, A. Implementation of Building Information Modeling in Architectural Firms in India. *Purdue Polytechnic Directed Projects*, [s. l.], 2010. Disponível em: <https://docs.lib.purdue.edu/techdirproj/1>.

LUTHRA, S.; KUMAR, S.; GARG, D.; HALEEM, A. Barriers to renewable/sustainable energy technologies adoption: Indian perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 41, p. 762–776, 2015.

MAH, D. N.; WANG, G.; LO, K.; LEUNG, M. K. H.; HILLS, P.; LO, A. Y. Barriers and policy enablers for solar photovoltaics (PV) in cities: Perspectives of potential adopters in Hong Kong. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 92, p. 921–936, 2018.

MANJU, S.; SAGAR, N. Progressing towards the development of sustainable energy: A critical review on the current status, applications, developmental barriers and prospects of solar photovoltaic systems in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 70, p. 298–313, 2017.

MARAFÃO, F. P.; ALONSO, A. M. dos S.; GONÇALVES, F. A. S.; BRANDÃO, D. I.; MARTINS, A. C. G.; MORALES PAREDES, H. K. Trends and Constraints on Brazilian Photovoltaic Industry: Energy Policies, Interconnection Codes, and Equipment Certification. *IEEE Transactions on Industry Applications*, [s. l.], v. 54, n. 5, p. 4017–4027, 2018.

MATSUMOTO, K.; MATSUMURA, Y. Challenges and economic effects of introducing renewable energy in a remote island: A case study of Tsushima Island, Japan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 162, p. 112456, 2022.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Central Geradora Fotovoltaica (UFV). [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/manuais-modelos-e-instrucoes/geracao/registro-autorizacao-e-concessao-de-empresamentos-de-geracao/ufv>. Acesso em: 26 jun. 2023.

MIRZA, U. K.; AHMAD, N.; HARIJAN, K.; MAJEED, T. Identifying and addressing barriers to renewable energy development in Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 13, n. 4, p. 927–931, 2009.

MISHRA, P.; BEHERA, B. Socio-economic and environmental implications of solar electrification: Experience of rural Odisha. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 56, p. 953–964, 2016.

MOLNAR, C. *Interpretable Machine Learning*. [S. l.]: Lulu.com, 2020. 2020.

MONGEON, P.; PAUL-HUS, A. The journal coverage of Web of Science and Scopus: a comparative analysis. *Scientometrics*, [s. l.], v. 106, n. 1, p. 213–228, 2016.

MOSTAFAEIPOUR, A.; ALVANDIMANESH, M.; NAJAFI, F.; ISSAKHOV, A. Identifying challenges and barriers for development of solar energy by using fuzzy best-worst method: A case study. *Energy*, [s. l.], v. 226, p. 120355, 2021.

MOSTAFAEIPOUR, A.; REZAEI, M.; MOFTAKHARZADEH, A.; QOLIPOUR, M.; SALIMI, M. Evaluation of hydrogen production by wind energy for agricultural and industrial sectors. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 44, n. 16, p. 7983–7995, 2019.

NEVES, D.; SILVA, C. A.; CONNORS, S. Design and implementation of hybrid renewable energy systems on micro-communities: A review on case studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 31, p. 935–946, 2014.

NIDHEESH, N.; NAZEER, K. A. A.; AMEER, P. M. A Hierarchical Clustering algorithm based on Silhouette Index for cancer subtype discovery from genomic data. *Neural Computing and Applications*, [s. l.], v. 32, n. 15, p. 11459–11476, 2020.

NOORBEHBAHANI, F.; MOUSAVI, S. R.; MIRZAEI, A. An incremental mixed data clustering method using a new distance measure. *Soft Computing*, [s. l.], v. 19, n. 3, p. 731–743, 2015.

NURU, J. T.; RHOADES, J. L.; GRUBER, J. S. The socio-technical barriers and strategies for overcoming the barriers to deploying solar mini-grids in rural islands: Evidence from Ghana. *Technology in Society*, [s. l.], v. 65, p. 101586, 2021.

OHUNAKIN, O. S.; ADARAMOLA, M. S.; OYEWOLA, Olanrewaju. M.; FAGBENLE, R. O. Solar energy applications and development in Nigeria: Drivers and barriers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 32, p. 294–301, 2014.

ONS. ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico. [S. l.: s. n.], 2017. Disponível em: <http://www.ons.org.br:80/paginas/sobre-o-sin/sistemas-isolados>. Acesso em: 5 maio 2023.

PAINULY, J. P. Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 73–89, 2001a.

PAINULY, J. P. Barriers to renewable energy penetration; a framework for analysis. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 73–89, 2001b.

PALM, J. Household installation of solar panels – Motives and barriers in a 10-year perspective. *Energy Policy*, [s. l.], v. 113, p. 1–8, 2018a.

PALM, J. PALM. *Energy Policy*, [s. l.], v. 113, p. 1–8, 2018b.

PANDYASWARGO, A. H.; WIBOWO, A. D.; ONODA, H. Socio-techno-economic assessment to design an appropriate renewable energy system for remote agricultural communities in developing countries. *Sustainable Production and Consumption*, [s. l.], v. 31, p. 492–511, 2022.

PEÑA, J. M.; LOZANO, J. A.; LARRAÑAGA, P. An empirical comparison of four initialization methods for the K-Means algorithm. *Pattern Recognition Letters*, [s. l.], v. 20, n. 10, p. 1027–1040, 1999.

PORTALDOAMAZONAS. Programa “Mais Luz para a Amazônia” gera renda em comunidade isolada. [S. l.: s. n.], 2023. Disponível em: <https://portaldoamazonas.com.br/2023/06/22/programa-mais-luz-para-a-amazonia-gera-renda-em-comunidade-isolada/>. Acesso em: 22 jun. 2023.

PUNIA SINDHU, S.; NEHRA, V.; LUTHRA, S. Recognition and prioritization of challenges in growth of solar energy using analytical hierarchy process: Indian outlook. *Energy*, [s. l.], v. 100, p. 332–348, 2016.

QUEIROZ, J. V.; BORGES, K. K.; QUEIROZ, F. C. B. P.; LIMA, N. C.; SILVA, C. L. da; MORAIS, L. de S. Barriers to expand solar photovoltaic energy in Brazil. *Independent Journal of Management & Production*, [s. l.], v. 11, n. 7, p. 2733–2754, 2020.

RAINA, G.; SINHA, S. Outlook on the Indian scenario of solar energy strategies: Policies and challenges. *Energy Strategy Reviews*, [s. l.], v. 24, p. 331–341, 2019.

RAMACHANDRA, T. V.; JAIN, R.; KRISHNADAS, G. Hotspots of solar potential in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 15, n. 6, p. 3178–3186, 2011.

RAZMJOO, A.; GHAZANFARI, A.; ØSTERGAARD, P. A.; ABEDI, S. Design and Analysis of Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems for Sustainable Development of Remote Areas. *Energies*, [s. l.], v. 16, n. 7, p. 3181, 2023.

REBUCAS, M.; RADAM, J. L.; MOLERO, N.; MACAYANA, R. R.; GO, C.; ABELLANA, D. P.; UBANDO, A.; CULABA, A.; OCAMPO, L. An integrated fuzzy evaluation of photovoltaic systems adoption barriers in rural island communities of developing economies. *Energy for Sustainable Development*, [s. l.], v. 80, p. 101424, 2024.

ROBY, K. Onde encontrar mão de obra especializada em energia solar? *Em: HSP ENGENHARIA*. 27 abr. 2021. Disponível em: <https://hspenergia.com.br/onde-encontrar-mao-de-obra-especializada-em-energia-solar/>. Acesso em: 26 jun. 2023.

SALIMI, M.; HOSSEINPOUR, M.; N. BORHANI, T. Analysis of Solar Energy Development Strategies for a Successful Energy Transition in the UAE. *Processes*, [s. l.], v. 10, n. 7, p. 1338, 2022.

SCHUTZE, A.; HOLZ, R. Como os Sistemas Isolados (SIs) da Amazônia Legal afetam o custo de energia elétrica? – Data Zoom Amazônia. *Em: DATA ZOOM AMAZÔNIA*. 30 jan. 2023. Disponível em: <https://datazoomamazonia.com.br/2023/01/30/como-os-sistemas-isolados-sis-da-amazonia-legal-afetam-o-custo-de-energia-eletrica/>. Acesso em: 5 maio 2023.

SEURING, S.; GOLD, S. Conducting content-analysis based literature reviews in supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal*, [s. l.], v. 17, n. 5, p. 544–555, 2012.

SHAH, S. A. A.; SOLANGI, Y. A.; IKRAM, M. Analysis of barriers to the adoption of cleaner energy technologies in Pakistan using Modified Delphi and Fuzzy Analytical Hierarchy Process. *Journal of Cleaner Production*, [s. l.], v. 235, p. 1037–1050, 2019.

SHEIKH, M. A. Energy and renewable energy scenario of Pakistan. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 354–363, 2010.

SHEIKH, N. J.; KOCAOGLU, D. F.; LUTZENHISER, L. Social and political impacts of renewable energy: Literature review. *Technological Forecasting and Social Change*, [s. l.], v. 108, p. 102–110, 2016.

SHYU, C.-W. Lessons from the World Bank’s solar home system-based rural electrification projects (2000–2020): Policy implications for meeting Sustainable Development Goal 7 by 2030. *Energy Reports*, [s. l.], v. 9, p. 2820–2838, 2023.

SILVA, S. B.; DE OLIVEIRA, M. A. G.; SEVERINO, M. M. Economic evaluation and optimization of a photovoltaic–fuel cell–batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. *Energy Policy*, [s. l.], v. 38, n. 11, *Energy Efficiency Policies and Strategies with regular papers.*, p. 6713–6723, 2010.

SINDHU, S.; NEHRA, V.; LUTHRA, S. Identification and analysis of barriers in implementation of solar energy in Indian rural sector using integrated ISM and fuzzy MICMAC approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 62, p. 70–88, 2016.

SOURIAL, N.; WOLFSON, C.; ZHU, B.; QUAIL, J.; FLETCHER, J.; KARUNANANTHAN, S.; BANDEEN-ROCHE, K.; BÉLAND, F.; BERGMAN, H. Correspondence analysis is a useful tool to uncover the relationships among categorical variables. *Journal of Clinical Epidemiology*, [s. l.], v. 63, n. 6, p. 638–646, 2010.

SURROOP, D.; RAGHOO, P.; WOLF, F.; SHAH, K. U.; JEETAH, P. Energy access in Small Island Developing States: Status, barriers and policy measures. *Environmental Development*, [s. l.], v. 27, p. 58–69, 2018.

TALLARIDA, R. J.; MURRAY, R. B. Chi-Square Test. *Em: TALLARIDA, Ronald J.; MURRAY, Rodney B. (org.). Manual of Pharmacologic Calculations: With Computer Programs. New York, NY: Springer, 1987. p. 140–142. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-4612-4974-0_43. Acesso em: 6 maio 2024.*

TAVANA, A.; EMAMI JAVID, A.; HOUSHFAR, E.; MAHMOUDZADEH ANDWARI, A.; ASHJAEI, M.; SHOAEE, S.; MAGHMOOMI, A.; MARASHI, F. Toward renewable and sustainable energies perspective in Iran. *Renewable Energy*, [s. l.], v. 139, p. 1194–1216, 2019.

THOMÉ, A. M. T.; SCAVARDA, L. F.; SCAVARDA, A. J. Conducting systematic literature review in operations management. *Production Planning & Control*, [s. l.], v. 27, n. 5, p. 408–420, 2016.

TIETENBERG, T.; LEWIS, L. *Environmental Economics: The Essentials*. [S. l.]: Routledge, 2019.

TIMILSINA, G. R.; SHAH, K. U. Filling the gaps: Policy supports and interventions for scaling up renewable energy development in Small Island Developing States. *Energy Policy*, [s. l.], v. 98, p. 653–662, 2016.

VIARDOT, E. The role of cooperatives in overcoming the barriers to adoption of renewable energy. *Energy Policy*, [s. l.], v. 63, p. 756–764, 2013.

VIDES-PRADO, A.; CAMARGO, E. O.; VIDES-PRADO, C.; OROZCO, I. H.; CHENLO, F.; CANDELO, J. E.; SARMIENTO, A. B. Techno-economic feasibility analysis of photovoltaic systems in remote areas for indigenous communities in the Colombian Guajira. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 82, p. 4245–4255, 2018.

WANG, J.; SONG, C.; HUANG, Z.; CAMPBELL, A.; KONAROVA, M. Remote island renewable transition potential: Affordable, reliable and sustainable generation optimisation for Mornington island. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, [s. l.], v. 5, p. 100084, 2024.

WEBSTER, J.; WATSON, R. T. Analyzing the Past to Prepare for the Future: Writing a Literature Review. *MIS Quarterly*, [s. l.], v. 26, n. 2, p. xiii–xxiii, 2002.

WEISS, S.; PROUDLER, I. K.; BARBARINO, G.; PESTANA, J.; MCWHIRTER, J. G. Properties and Structure of the Analytic Singular Value Decomposition. *IEEE Transactions on Signal Processing*, [s. l.], p. 1–15, 2024.

WOHLIN, C. Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *Em: PROCEEDINGS OF THE 18TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON EVALUATION AND ASSESSMENT IN SOFTWARE ENGINEERING*, 2014, New York, NY, USA. Anais [...]. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2014. p. 1–10. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>. Acesso em: 12 mar. 2024.

WU, M.; WU, Y.; HE, J.; XU, M.; ZHANG, T.; LIU, F. Barrier identification, analysis and solutions of hydrogen energy storage application in multiple power scenarios based on improved DEMATAL-ISM approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, [s. l.], v. 47, n. 71, p. 30329–30346, 2022.

WU, Y.; XU, M.; TAO, Y.; HE, J.; LIAO, Y.; WU, M. A critical barrier analysis framework to the development of rural distributed PV in China. *Energy*, [s. l.], v. 245, p. 123277, 2022a.

WU, Y.; XU, M.; TAO, Y.; HE, J.; LIAO, Y.; WU, M. A critical barrier analysis framework to the development of rural distributed PV in China. *Energy*, [s. l.], v. 245, p. 123277, 2022b.

WYLLIE, J. O. Y.; ESSAH, E. A.; OFETOTSE, E. L. Barriers of solar energy uptake and the potential for mitigation solutions in Barbados. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 91, p. 935–949, 2018a.

WYLLIE, J. O. Y.; ESSAH, E. A.; OFETOTSE, E. L. Luthra. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 91, p. 935–949, 2018b.

XUE, Y.; LINDKVIST, C. M.; TEMELJOTOV-SALAJ, A. Barriers and potential solutions to the diffusion of solar photovoltaics from the public-private-people partnership perspective – Case study of Norway. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, [s. l.], v. 137, p. 110636, 2021.

YONG, C.; DESEN, J.; WEN, L.; YUNLONG, C.; LI, C. Research on the Cost of Distributed Photovoltaic Plant of China Based on Whole Life Cycle Perspective. *IEEE Access*, [s. l.], v. 7, p. 89379–89389, 2019.

ZADEH, L. A. A Fuzzy-Set-Theoretic Interpretation of Linguistic Hedges. *Journal of Cybernetics*, [s. l.], v. 2, n. 3, p. 4–34, 1972.

ZHANG, F.; DENG, H.; MARGOLIS, R.; SU, J. Analysis of distributed-generation photovoltaic deployment, installation time and cost, market barriers, and policies in China. *Energy Policy*, [s. l.], v. 81, p. 43–55, 2015.

ZHENG, Z.; GONG, M.; MA, J.; JIAO, L.; WU, Q. Unsupervised evolutionary clustering algorithm for mixed type data. *Em: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION*, 2010, [s. l.], . *Anais [...]*. [S. l.: s. n.], 2010. p. 1–8. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5586136?casa_token=24QDHcua3OwAAAAA:qCigS6hVEY0pLIIDNNBrRlGBzeCBibMcoHloALK85Z5FN2y6_NuX8bcWv4UsJutxb7A6-Y2y0Ao. Acesso em: 20 nov. 2023.