

MICRORREDES EM COMUNIDADES REMOTAS E ILHAMENTO DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA: UMA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA COM APLICAÇÃO DO MÉTODO PROKNOW-C

MICROGRIDS IN REMOTE COMMUNITIES AND ISLANDING OF DISTRIBUTED GENERATION: A BIBLIOMETRIC REVIEW USING THE PROKNOW-C METHOD

Venceslau Pental Jerónimo - Universidade do Namibe/ Universidade Federal do Espírito Santo <venceslaugeronimo@gmail.com>

Daniel Carletti - Universidade Federal do Espírito Santo <daniel.carletti@ifes.edu.br>

Arthur Eduardo Alves Amorim - Universidade Federal do Espírito Santo <arthur.amorim@ifes.edu.br>

Daniel da Cunha Ribeiro - Universidade Federal do Espírito Santo <daniel.ribeiro@ufes.br>

Marcos Wagner Jesus Servare Junior - Universidade Federal do Espírito Santo <marcos.servare@ufes.br>

Resumo

As microrredes em comunidades remotas representam uma solução promissora para o acesso à energia elétrica em regiões isoladas, onde a extensão da rede principal é economicamente inviável. O ilhamento da geração distribuída é um aspecto crítico para garantir a confiabilidade e a continuidade do fornecimento nesses sistemas. Este artigo tem como objetivo analisar, por meio de uma revisão bibliométrica e da aplicação do método ProKnow-C, como a literatura recente tem tratado o tema das microrredes em comunidades remotas e o ilhamento da geração distribuída. Inicialmente, realiza-se uma análise bibliométrica em bases internacionais (Scopus e Web of Science) para o período 2010–2026, utilizando o pacote Bibliometrix, a fim de caracterizar o portfólio bruto de documentos quanto à evolução temporal, principais periódicos, países e palavras-chave. Em seguida, aplica-se o método ProKnow-C para selecionar um portfólio final de 10 artigos, sobre o qual se desenvolve uma análise sistêmica. Os resultados indicam que as

microrredes em áreas remotas são moldadas pela interação entre estratégias de controle (centralizado e descentralizado), tecnologias de armazenamento, fontes renováveis híbridas e desafios de sustentabilidade. Evidências empíricas mostram que o ilhamento intencional e não intencional requer estratégias de proteção avançadas, que microrredes híbridas (eólica-solar-diesel-armazenamento) tendem a ser economicamente viáveis em comunidades isoladas, e que barreiras regulatórias e de engajamento social ainda impedem a comercialização em escala. Conclui-se que o planejamento e a operação de microrredes em comunidades remotas devem considerar simultaneamente eficiência técnica, viabilidade econômica, sustentabilidade ambiental e aceitação social, especialmente em contextos de transição energética e descarbonização.

Palavras-chave: Microrredes. Comunidades Remotas. Ilhamento. Geração Distribuída. ProKnow-C.

Abstract

Microgrids in remote communities represent a promising solution for access to electricity in isolated areas, where extending the main grid is economically unfeasible. Islanding of distributed generation is a critical aspect to ensure reliability and continuity of supply in these systems. This article aims to analyze, through a bibliometric review and the application of the ProKnow-C method, how recent literature has addressed the topic of microgrids in remote communities and the islanding of distributed generation. Initially, a bibliometric analysis is carried out in international databases (Scopus and Web of Science) for the period 2010–2026, using the Bibliometrix package, in order to characterize the raw document portfolio regarding temporal evolution, main journals, countries, and keywords. Next, the ProKnow-C method is applied to select a final portfolio of 10 articles, on which a systemic analysis is developed. The results indicate that microgrids in remote areas are shaped by the interaction between control strategies (centralized and decentralized), storage technologies, hybrid renewable sources, and sustainability challenges. Empirical evidence shows that intentional and unintentional islanding requires advanced protection strategies, that hybrid microgrids (wind-solar-diesel-storage) tend to be economically feasible in isolated communities,

and that regulatory and social engagement barriers still hinder large-scale commercialization. It is concluded that the planning and operation of microgrids in remote communities should simultaneously consider technical efficiency, economic viability, environmental sustainability, and social acceptance, especially in contexts of energy transition and de-carbonization.

Keywords: Microgrids. Remote Communities. Islanding. Distributed Generation. ProKnow-C.

Introdução

O acesso à energia elétrica é um fator determinante para o desenvolvimento socioeconômico e a qualidade de vida das populações. No entanto, milhões de pessoas em todo o mundo, especialmente em regiões remotas e isoladas, ainda não têm acesso confiável à eletricidade. A extensão das redes de transmissão e distribuição convencionais para essas áreas frequentemente se mostra economicamente inviável devido aos altos custos de infraestrutura e às baixas densidades de carga (HER et al., 2021; SULAEMAN et al., 2021).

Nesse contexto, as microrredes emergem como uma solução técnica e economicamente atrativa para o fornecimento de energia em comunidades remotas. Uma microrrede é definida como um sistema energético localizado que combina fontes de geração distribuída (como solar fotovoltaica, eólica, diesel, pequenas centrais hidrelétricas), sistemas de armazenamento de energia e cargas, operando de forma coordenada e podendo funcionar conectada à rede principal ou de forma autônoma (ilhada) (DEL CARPIO HUAYLLAS; RAMOS; VASQUEZ-ARNEZ, 2010; SOSHINSKAYA et al., 2014).

O modo de operação ilhado é particularmente crítico para comunidades remotas, pois nessas situações a microrrede deve ser capaz de suprir integralmente a demanda local sem o suporte da rede principal. Isso exige estratégias avançadas de controle, proteção e gerenciamento de energia para garantir a estabilidade da tensão e da frequência, especialmente diante da intermitência das fontes renováveis e das variações de carga (TAQUÉTI SILVA; FARDIN; ENCARNAÇÃO, 2014; MOON et al., 2019). Apesar dos benefícios reconhecidos das microrredes — incluindo redução de custos de eletricidade (20-25%), diminuição das perdas de distribuição

(até 7%) e maior confiabilidade do fornecimento —, a implementação em larga escala ainda enfrenta barreiras técnicas, regulatórias, financeiras e sociais significativas (SOSHINSKAYA et al., 2014; LIU et al., 2022).

Diante do anterior exposto, este artigo tem como objetivo principal analisar, por meio de uma revisão bibliométrica e da aplicação do método ProKnow-C (Knowledge Development Process Constructivist), como a literatura científica recente (2010–2026) tem tratado o tema das microrredes em comunidades remotas e o ilhamento da geração distribuída. Especificamente, busca-se: (i) mapear a evolução temporal e a distribuição geográfica das publicações; (ii) identificar os principais periódicos, autores e palavras-chave;

(iii) selecionar um portfólio de artigos cientificamente reconhecidos; e (iv) desenvolver uma análise sistêmica das estratégias de controle, tecnologias e desafios associados ao tema.

A relevância deste estudo reside na necessidade de sintetizar o conhecimento disperso na literatura internacional, identificando lacunas de pesquisa e direcionando futuros estudos para o desenvolvimento de microrredes mais eficientes, resilientes e sustentáveis em comunidades remotas.

Bibliometrix

O software Bibliometrix (R) foi utilizado para limpeza, análise descritiva e mapeamento científico (coautoria, cocitação e coocorrência) do portfólio bruto. Foram definidas 11 palavras-chave, organizadas em três eixos, para busca nas bases Scopus e Web of Science no período 2010–2026, resultando em 1.077 documentos distribuídos em 410 fontes. A produção anual apresenta taxa média de crescimento de 15,86% e idade média dos documentos de 6,58 anos, confirmando o caráter dinâmico e em franca expansão do campo.

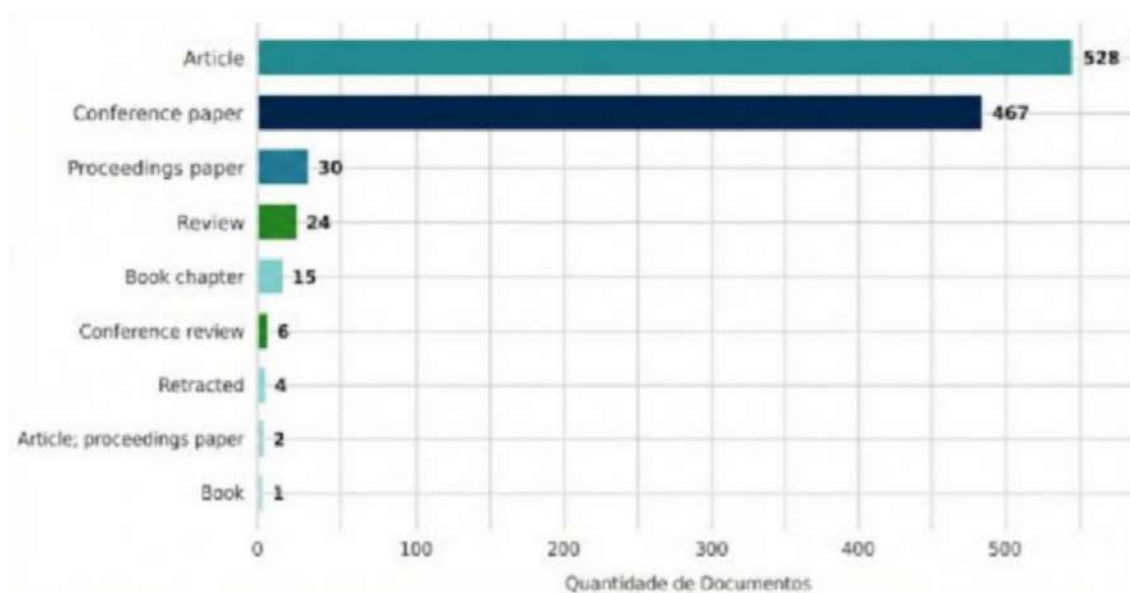
Eixo	Palavras-chaves
------	-----------------

Microrredes e Sistema de geração de Energia	Microgrid, distributed generation
Comunidades remotas e áreas isoladas	Isolated community, Remote area
Ilhamento e operação autônoma	Island mode

Tabela 1: Palavras chaves

No que se refere aos tipos de documentos, predominam os artigos científicos (528), conferência (467) revisões de literatura (24). O conjunto total contabiliza 2780 autores, com 3997 aparições de autoria, e 33 documentos de autoria única. A média de coautores por documento é 3,71 e cerca de 1,393% dos trabalhos resultam de coautorias internacionais, evidenciando uma rede de colaboração relativamente ampla.

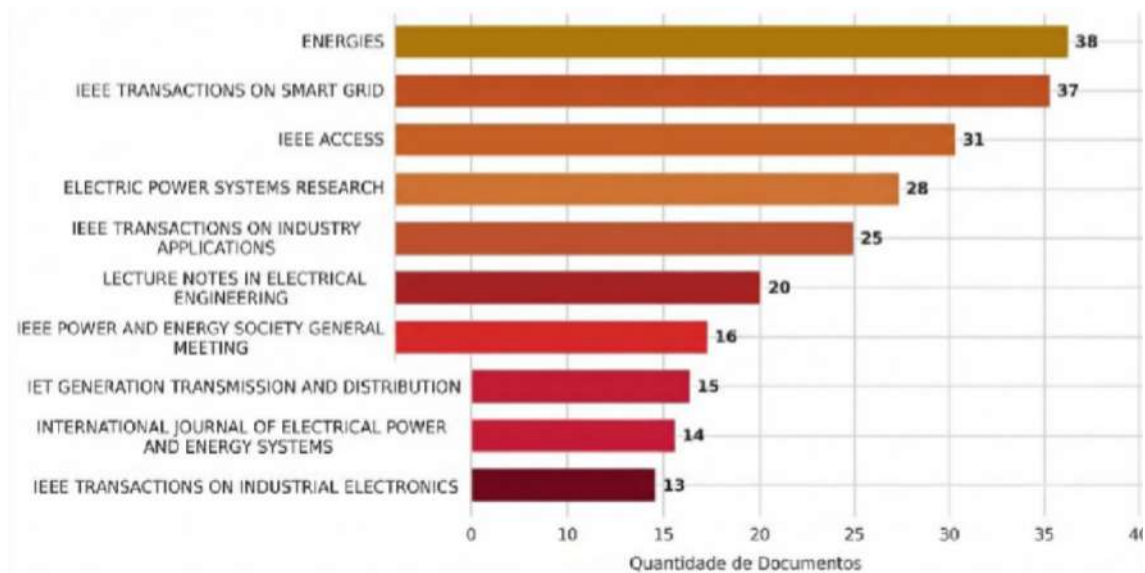
Figura 1: Distribuição graficamente do Portfolio bruto.



Na figura 2, observa-se que as fontes destacam-se como periódicos mais produtivos na temática do estudo revistas Energies, IEEE Transactions on Smart Grid, IEEE ACCESS, Electric Power Systems Research, IEEE Transactions on Industry Applications, Lecture notes in Electrical Engineering, IEEE Power and Energy

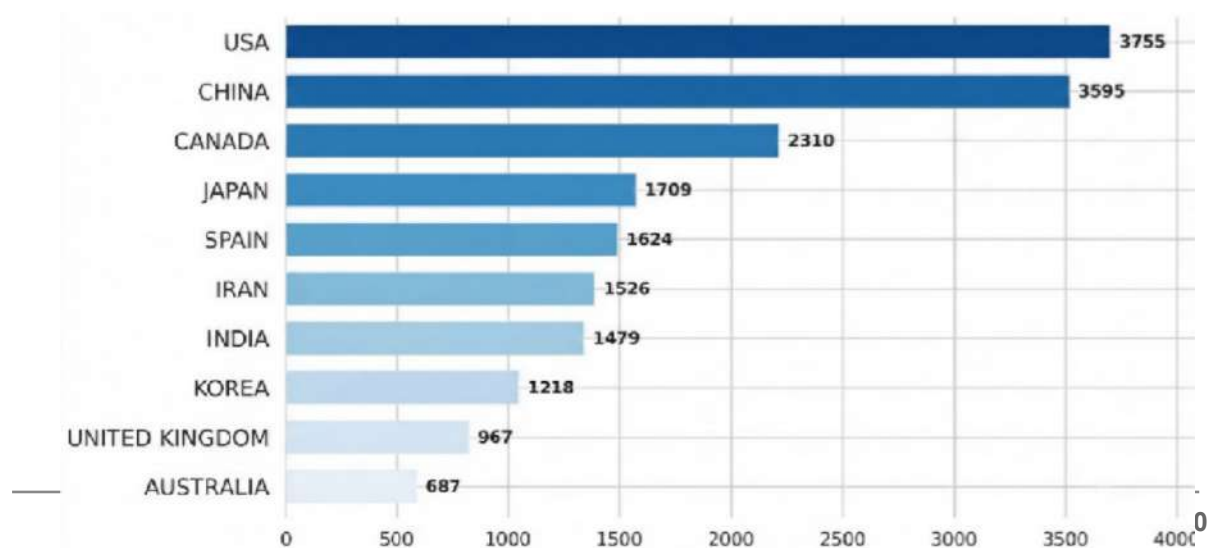
Society General Meeting, IET Generation Transmission and Distribution ,International Journal of Electrical Power and Energy Systems, IEEE Transactions on Industrial Electronics.

Figura 2: Revistas mais relevantes do portfólio bruto.



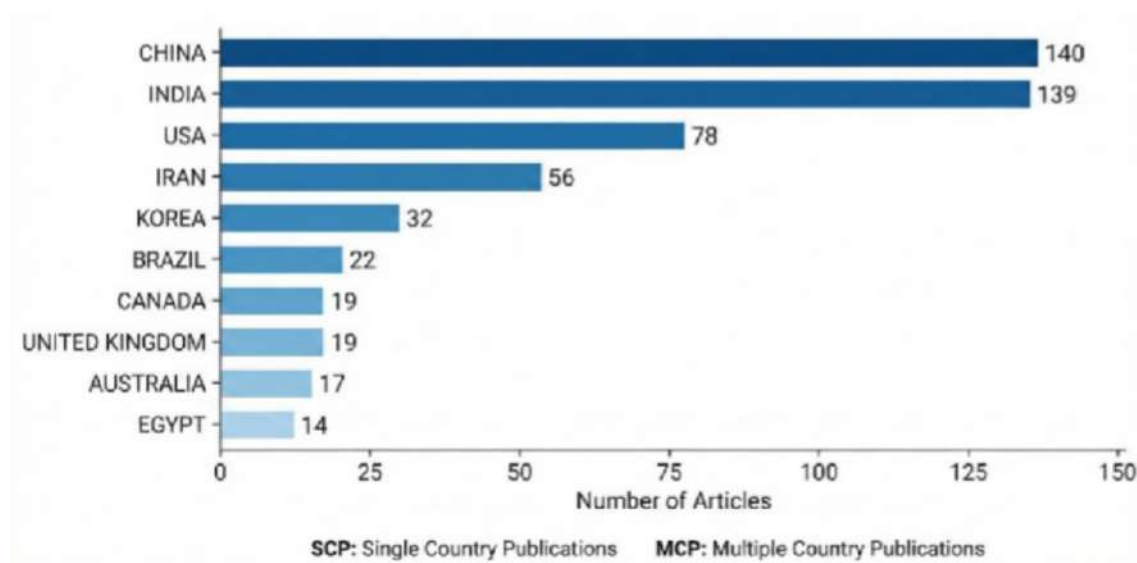
O gráfico da figura 3 apresenta os 10 países com maior impacto científico na área de microrredes, medido pelo número total de citações recebidas pelos documentos publicados por autores desses países. O mesmo evidencia que a pesquisa em microrredes é um campo global e estratégico, liderado por potências tecnológicas, mas com crescente participação de países que enfrentam desafios específicos de acesso e qualidade de energia..

Figura 3: Países com mais citações por documentos.



O gráfico da figura 4 mostra enfatiza que a pesquisa em microrredes está sendo liderada por países asiáticos e em desenvolvimento, possivelmente devido às suas necessidades específicas de expansão energética, integração de renováveis e acesso à energia em áreas remotas.

Figura 4: Países dos autores correspondentes

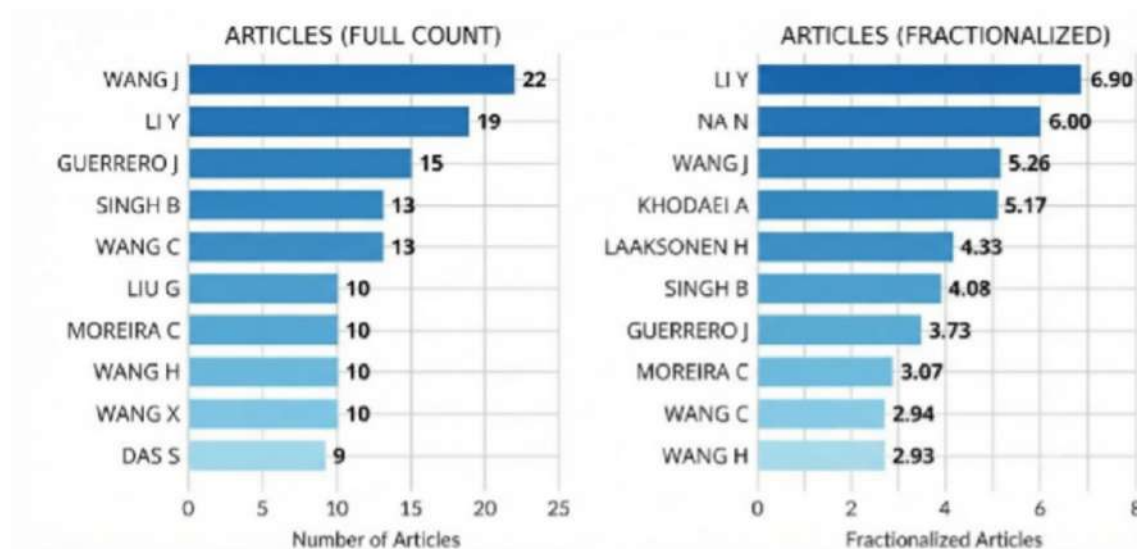


A análise bibliométrica revela que as microrredes em comunidades remotas e o ilhamento da geração distribuída constituem um campo de pesquisa em franca expansão. Esse dinamismo reflete a convergência entre a transição energética, a inovação tecnológica, as políticas públicas e a competitividade do setor elétrico.. Os resultados dessa etapa subsidiam a aplicação do Proknow-C, ao evidenciar as principais fontes, países e palavras-chave relevantes, e orientam a seleção de um portfólio reduzido de artigos com maior aderência ao foco específico deste estudo.

Na figura 5 destaca quem publica com maior frequência, como é o caso de Wang J, a contagem fracionada traz um detalhamento importante sobre a liderança científica efetiva, colocando Li Y no topo. Além disso, a forte presença de sobrenomes como Wang, Li e Singh não deixa dúvidas, ela ratifica a hegemonia de pesquisadores asiáticos, especialmente da China e da Índia, na produção de conhecimento sobre

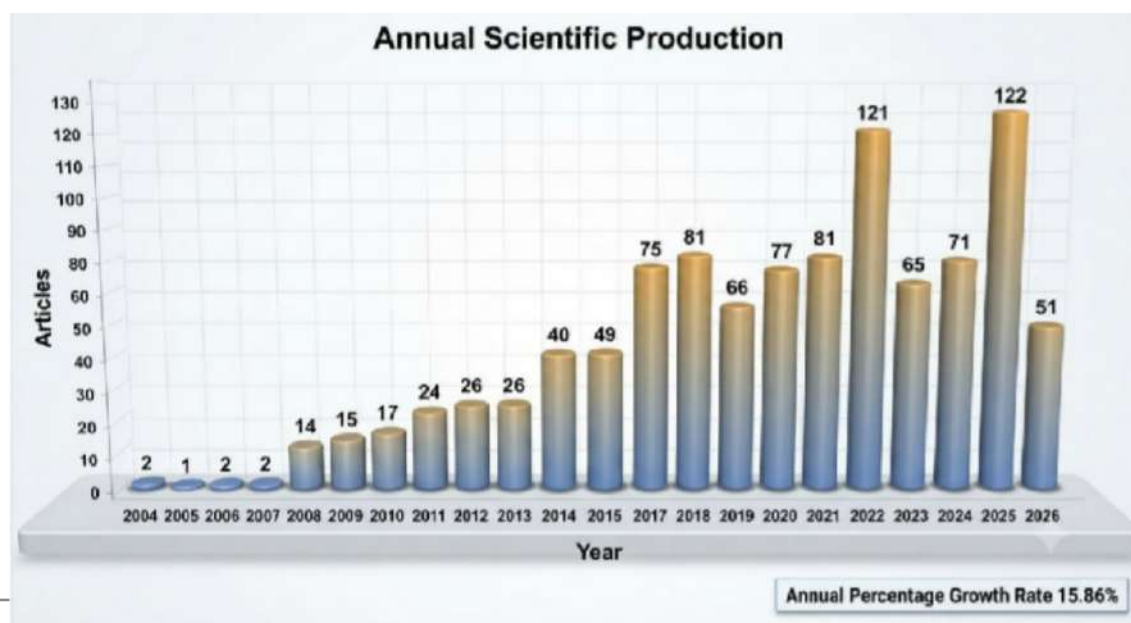
microrredes, ecoando exatamente o que as análises anteriores já apontavam.

Figura 5: Autores mais produtivos



O gráfico da figura 6 mostra a evolução da produção científica ano a ano. O tema começou com pouca expressão até 2006, mas ganhou força constante a partir de 2008 e "explodiu" a partir de 2014. Os picos em 2022 e 2025 (com mais de 120 artigos cada) confirmam o alto interesse atual no tema. A queda em 2026 é esperada, pois o ano ainda não terminou (estamos em julho), mas a taxa de crescimento de quase 16% ao ano mostra que a pesquisa sobre microrredes está em franca expansão.

Figura 6: Numeros de artigos publicado por ano



1. PROKNOW-C

O método Proknow-C (Knowledge Development Process – Constructivist) consiste em um processo estruturado para a seleção e análise de um portfólio bibliográfico alinhado a um determinado tema de pesquisa, combinando critérios quantitativos (como número de citações) e qualitativos (como aderência temática). No presente trabalho, o Proknow-C foi utilizado para filtrar o conjunto inicial de 1077 documentos obtidos nas bases Scopus e Web of Science, de modo a identificar um núcleo de artigos que tratam diretamente sobre as microrredes em comunidades remotas e o ilhamento da geração distribuída.

1.1 Seleção final do portfólio

Para obter a seleção final, foram executadas seis fases de filtragem, que são:

Fase 1 – Filtro de redundância: Nessa etapa foram retirados do portfólio, dez artigos estavam em duplicidade, restando 1067 documentos.

Fase 2 – Leitura dos títulos: Com objetivo de identificar trabalhos que possuem maior afinidade com o tema, os títulos foram analisados, resultando na eliminação de 947 documentos, finalizando a etapa com 120 selecionados.

Fase 3 – Aplicou-se o princípio de Pareto para selecionar os 42 artigos mais citados (80% do total). A estes, somaram-se 5 trabalhos de autores de destaque e 7 publicações recentes (≤ 2 anos), resultando em 54 documentos nesta fase.

Fase 4 – Leitura dos resumos: A partir da leitura dos resumos dos trabalhos restantes da etapa anterior, foram selecionados 13 artigos que possuíam maior aderência com o tema de formação dos preços das energias.

Fase 5 – Disponibilidade: Os artigos que não possuíam livre acesso, foram retirados nessa etapa, permanecendo 10 documentos disponíveis.

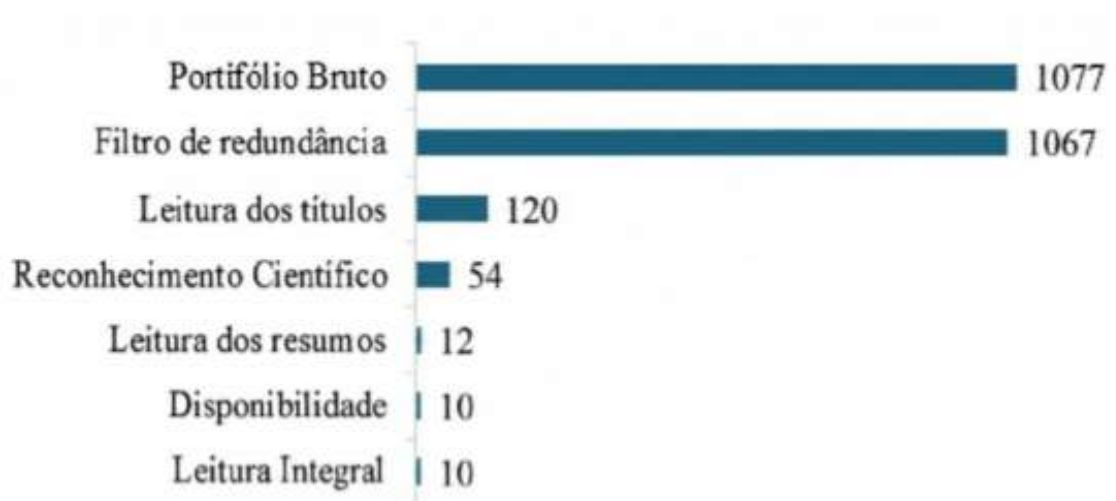
Fase 6 – Leitura integral: Após a leitura integral das dez publicações, todos foram selecionados para seleção final do portfólio de artigos utilizados para revisão de

literatura.

A evolução do número de documentos selecionados ao final de cada etapa pode ser observada no Gráfico 4.

O gráfico da figura 7 resume o processo de seleção rigoroso do ProKnow-C, de 1.077 para apenas 10 artigos (0,93%), demonstrando a seletividade do método para garantir que apenas as publicações mais alinhadas e relevantes componham a base de conhecimento da investigação.

Figura 7: Número de documentos selecionados ao final de cada etapa



Após a aplicação sequencial dos filtros do método Proknow C, o portfólio bruto

inicial de 1077 documentos foi sendo progressivamente reduzido até a seleção final de 10 artigos com aderência direta ao tema de pesquisa (Tabela 2). A etapa de leitura dos resumos permitiu refinar a aderência temática, assegurando que os trabalhos selecionados tratassem de forma substantiva de aspectos como estratégias de controle e operação em modo ilhado, planejamento e dimensionamento de microrredes para áreas remotas, integração de fontes renováveis híbridas e os desafios de confiabilidade em sistemas isolados. A análise da curva apresentada no Gráfico 7 mostra que, a partir da leitura dos resumos, o número de documentos se estabiliza em um patamar compatível com uma revisão aprofundada, possibilitando o exame detalhado de cada estudo e a construção de uma síntese sistêmica consistente. O portfólio resultante é diversificado em termos

de contextos geográficos, abrangendo Brasil, Estados Unidos (incluindo o Alasca), Coreia do Sul, Indonésia, Nova Zelândia e estudos multicountry na Europa e outros continentes, o que permite uma visão ampla sobre os desafios e soluções para microrredes em diferentes realidades socioeconômicas e ambientais. Essa diversidade, aliada à aderência ao foco da investigação, confere robustez ao portfólio.

Tabela 2 – Portfólio final dos artigos selecionados

Autores	Título	Total de Citações
DEL CARPIO HUAYLLAS, T. E. et al. (2010)	Sistemas de Microrredes: Status Atual e Desafios	30
SOSHINSKAYA, M. et al. (2014)	Microrredes: Experiências, Barreiras e Fatores de Sucesso	12
MAJDI NASAB, N. et al. (2021)	Estudo de caso de um sistema híbrido de turbinas eólicas e maremotrizes com microrrede para o fornecimento de energia a uma comunidade remota desconectada da rede na Nova Zelândia	22
SANTOS, J. F.; BETIOL, A. D. (2019)	Análise do Comportamento de uma Microgrid Composta por Fontes Renováveis Operando em Modo Ilhado	5
TAQUÉTI SILVA, G. A. et al. (2014)	Simulação dos Modos de Operação de uma Microrrede de Baixa Tensão com Sistema Fotovoltaico	16
LIU, G. et al. (2022)	Projeto Assistido por Microrredes para Áreas Remotas	29
SULAEMAN, I. et al. (2021)	Micro-redes remotas para acesso à energia na Indonésia — Parte I: Desafios de escala e sustentabilidade e uma perspectiva tecnológica	35
MOON, H. J. et al. (2019)	Estratégia de Controle Descentralizado de Potência Ativa para Equilíbrio de Potência em Tempo Real em uma Microrrede Isolada com Sistema de Armazenamento de Energia e Geradores a Diesel	34

LIMA, J. C. et al. (2019)	Micro e/ou Mini Central Hidrelétrica na Geração de Energia Distribuída	13
HER, C. et al. (2021)	Nova avaliação de recursos eólicos e análise de flexibilidade de demanda para a resiliência comunitária: Um estudo de caso de microrrede remota	0

2. Análise sistêmica

O portfólio final é composto por dez artigos, contemplando diferentes contextos regionais (Brasil, Estados Unidos, Coreia do Sul, Indonésia, Nova Zelândia) e convergentes em torno dos desafios técnicos, econômicos e sociais das microrredes em comunidades remotas. De forma sintética, esses estudos abordam os seguintes eixos temáticos:

(i) O contexto de acesso à energia e os desafios de eletrificação em comunidades remotas e isoladas.

- Estudos recentes evidenciam que a extensão da rede convencional é frequentemente inviável, tornando as microrredes a principal alternativa. Her et al. (2021) demonstram que comunidades remotas do Alasca enfrentam tarifas superiores a US\$ 1/kWh devido à dependência de diesel, enquanto Sulaeman et al. (2021) alertam que, mesmo em países com alta taxa de eletrificação como a Indonésia, as áreas remanescentes (Maluku, Papua) exigem soluções isoladas e adaptadas à realidade local.

(ii) Estratégias de controle, balanço de potência e transição para o modo ilhado.

- A estabilidade em modo ilhado é o coração técnico das microrredes remotas. Moon et al. (2019) propõem um controle descentralizado baseado em frequency-bus-signaling para equilibrar baterias e geradores a diesel em tempo real. No contexto brasileiro, Taquéti Silva et al. (2014) demonstram, em uma microrrede na UFES, a transição entre os modos conectado e ilhado com controle droop, e Santos e Betiol (2019) confirmam, via simulação no MATLAB/Simulink, que o modo ilhado é satisfatório para regiões de baixo poder industrial, desde que as cargas sejam bem dimensionadas.

(iii) Viabilidade técnica e econômica da integração de fontes renováveis híbridas.

- A combinação de múltiplas fontes renováveis com armazenamento e backup é

apontada como a configuração mais eficiente. Majdi Nasab et al. (2021), ao estudarem uma ilha na Nova Zelândia, comprovam que a hibridização eólica-mareomotriz-diesel reduz emissões e custos. Liu et al. (2022) reforçam essa visão ao proporem um modelo MILP para planejamento de microrredes multienergia em áreas remotas, enquanto Her et al. (2021) mostram que a flexibilidade de demanda (nexus Food-Energy-Water) pode absorver até 86% da intermitência eólica no Alasca.

(iv) Barreiras financeiras e a sustentabilidade econômica dos projetos.

- Apesar dos benefícios técnicos, o alto custo inicial e a dependência de subsídios ainda travam a comercialização. Soshinskaya et al. (2014) identificam as barreiras financeiras como um dos quatro grandes obstáculos à expansão das microrredes, e Sulaeman et al. (2021) complementam essa visão ao demonstrar que a falta de modelos de negócio sustentáveis compromete a perenidade dos projetos em áreas rurais da Indonésia.

(v) Barreiras regulatórias, normativas e de interconexão.

- A ausência de marcos regulatórios claros é um entrave global. Del Carpio Huayllas et al. (2010) destacam a importância do IEEE Std 1547.2-2008 para o ilhamento intencional e a proteção, mas alertam que a regulação ainda engatinha. Soshinskaya et al. (2014) vão além, apontando a vedação ao comércio local de energia e as regras restritivas de interconexão como as barreiras regulatórias mais frequentes em nível mundial.

(vi) Planejamento, dimensionamento e estratégias tecnológicas avançadas.

- O sucesso de uma microrrede remota depende de um planejamento rigoroso. Liu et al. (2022) apresentam uma metodologia de três estágios para seleção e despacho ótimo de geradores e armazenadores, enquanto Del Carpio Huayllas et al. (2010) revisam projetos-piloto ao redor do mundo (Kythnos, Fort Bragg, IIT) e concluem que a modelagem e a integração tecnológica ainda têm muito a evoluir.

(vii) Custos de energia e a dependência crítica de combustíveis fósseis.

- Em comunidades isoladas, o custo do diesel não é apenas econômico, mas também ambiental e logístico. Her et al. (2021) mostram que no Alasca o diesel responde por tarifas altíssimas, e Majdi Nasab et al. (2021) comprovam que na Stewart Island (Nova

Zelândia) o combustível representa 40% das despesas operacionais da utility local, com aumentos anuais constantes, justificando a transição para renováveis.

(viii) Operação e gestão em condições ambientais extremas e adversas.

- Microrredes remotas estão sujeitas a climas hostis que afetam a durabilidade dos equipamentos. Her et al. (2021) destacam os desafios do clima do Alasca para a geração eólica, e Sulaeman et al. (2021) alertam que na Indonésia fatores como umidade extrema, temperatura, vegetação, roedores e insetos são desafios ambientais críticos que impactam diretamente a operação e manutenção (O&M) das microrredes.

(ix) O potencial de fontes locais, como a hídrica de pequena escala, para o acesso à energia.

- Além de solar e eólica, recursos locais abundantes podem ser a chave para a eletrificação rural. Lima et al. (2019) contextualizam o enorme potencial das micro e minicentrals hidrelétricas (PCHs) no Brasil — onde a matriz é historicamente hídrica — e mostram que tecnologias simples, como rodas d'água, são alternativas robustas para ambientes hostis, embora o investimento por pequenos produtores rurais ainda seja tímido.

(x) Os efeitos distributivos da estrutura de propriedade e da tarifação na carga de custos de eletricidade para as famílias.

(x) A resiliência comunitária e a flexibilidade de demanda em climas extremos.

- Her et al. (2021) analisam comunidades remotas do Alasca que dependem de diesel caro, propondo a integração de turbinas eólicas com cargas despacháveis baseadas no nexo Água-Energia-Alimentação (FEW), demonstrando que a gestão flexível da demanda pode absorver até 86% da intermitência renovável e aumentar a resiliência local.

Tabela 3 : Síntese dos trabalhos

Autores	Síntese
---------	---------

DEL CARPIO HUAYLLAS, T. E. et al. (2010)	O artigo analisa o avanço técnico das microrredes de energia, destacando normas como a IEEE Std 1547.2-2008 e o controle droop, ao mesmo tempo que aponta a necessidade de evolução regulatória e de gestão. Estudos de caso, incluindo exemplos na Grécia, Holanda e EUA, demonstram a viabilidade prática da tecnologia, superando desafios de fluxo bidirecional e proteção.
SOSHINSKAYA, M. et al. (2014)	O artigo de 2014, publicado na Renewable & Sustainable Energy Reviews, analisa 13 estudos de caso para identificar barreiras à comercialização de microrredes, destacando que, apesar dos benefícios em custos e eficiência, a comercialização ainda é limitada. As principais barreiras são técnicas, regulatórias, financeiras e de stakeholders, com o estudo propondo diretrizes para governos e consumidores.
MAJDI NASAB, N. et al. (2021)	Um estudo de 2021 publicado na Energies avaliou a viabilidade técnica e econômica de uma microrrede híbrida eólica-mareomotriz-diesel para substituir a atual geração a diesel em Stewart Island, na Nova Zelândia. Utilizando o software HOMER Pro, a pesquisa concluiu que a combinação de duas turbinas eólicas, quatro mareomotrizes e gerador a diesel representa a configuração mais eficiente para reduzir custos e emissões no local. O estudo propõe um modelo aplicável a outras comunidades insulares remotas.
SANTOS, J. F.; BETIOL, A. D. (2019)	O estudo simula uma microrrede fotovoltaica de 250 kVA para regiões remotas do Brasil, comprovando a eficácia da transição para o modo ilhado durante falhas. Conclui-se que, se bem dimensionado, o sistema supre cargas de baixo perfil industrial com confiabilidade, além de aliviar e proteger a rede elétrica principal.
TAQUÉTI SILVA, G. A. et al. (2014)	O artigo do V Congresso Brasileiro de Energia Solar (2014) apresenta a modelagem e simulação, no MATLAB/Simulink, de uma microrrede de baixa tensão de 20 kW (fotovoltaica + baterias) conectada à UFES. Os resultados validam: • Controle PQ no modo conectado à rede; • Controle VSI com curvas <i>droop</i> no modo ilhado; • Critérios rígidos de sincronização para a reconexão. O sistema mantém a estabilidade de tensão e frequência, utilizando descarte de cargas não prioritárias em cenários de carga pesada.
LIU, G. et al. (2022)	Este estudo de 2022, publicado por pesquisadores do Oak Ridge National Laboratory na revista Energies, propõe um modelo MILP em três estágios para otimização de expansão e operação de microrredes isoladas multienergia. O algoritmo reduz custos totais e perdas técnicas através do dimensionamento e despacho de tecnologias de cogeração e armazenamento comercial, validado por simulações práticas.
SULAEMAN, I. et al. (2021)	O estudo avalia o uso de microrredes para eletrificação rural na Indonésia, focando no desafio de levar energia a áreas remotas, como Maluku e Papua, onde cerca de 590 mil famílias ainda carecem de acesso. A análise utiliza o Multi-Tier Framework

	(MTF) do Banco Mundial para identificar que a sustentabilidade dessas redes é comprometida por problemas de terras, aceitação social, planejamento, operação e fatores ambientais.
MOON, H. J. et al. (2019)	Pesquisadores sul-coreanos desenvolveram um método de controle descentralizado baseado em <i>frequency-bus-signaling</i> para microrredes isoladas, utilizando a frequência do BESS para equilibrar a potência com geradores a diesel. Validado com dados da ilha de Geocha, o método substitui abordagens centralizadas vulneráveis, oferecendo estabilidade superior ao controle <i>droop</i> tradicional.
LIMA, J. C. et al. (2019)	O artigo de 2019 analisa o potencial de micro e minicentraís hidrelétricas para geração distribuída sustentável no meio rural brasileiro, com base na REN 687/2015 (até 3 MW). Aborda componentes técnicos como turbinas Pelton, Francis e Kaplan, além de rodas d'água para locais isolados, e conclui que o potencial hídrico do país segue subutilizado por pequenos produtores.
HER, C. et al. (2021)	Pesquisadores da Universidade do Alaska Fairbanks e Stanford demonstraram que a integração de uma turbina eólica de 100 kW com cargas despacháveis baseadas no nexo Food-Energy-Water (FEW) é viável para comunidades remotas do Alasca, absorvendo até 86% da energia intermitente. O estudo, publicado na <i>Renewable Energy</i> em 2021, concluiu que essa abordagem reduz a dependência de diesel caro, atingindo um LCOE de US\$ 1,15/kWh e um fator de capacidade de 16,7%.

3. Considerações finais

Esta revisão bibliométrica, baseada em 1.077 documentos e na aplicação do método ProKnow-C, revelou um campo de pesquisa em franca expansão (crescimento anual de 15,86%), com foco na interface entre engenharia de potência, transição energética e sustentabilidade.

A análise do portfólio final de 10 artigos evidencia que o sucesso de microrredes remotas depende da articulação entre:

estratégias de controle avançadas (controle descentralizado por droop e transição suave entre modos conectado/ilhado);

hibridização de fontes renováveis (eólica, solar, maremotriz) com diesel backup, otimizada por modelos como MILP; e armazenamento de energia como elemento crítico para a estabilidade em modo ilhado.

Entretanto, barreiras regulatórias (vedação ao comércio local de energia), financeiras

(alto custo de armazenamento) e socioambientais (falta de engajamento comunitário) ainda impedem a escalabilidade comercial. A integração do nexo Água-Energia-Alimentação surge como abordagem essencial para a resiliência desses projetos.

Referências

- DEL CARPIO HUAYLLAS, T. E. *et al.* Microgrid systems: current status and challenges. In: IEEE TRANSMISSION & DISTRIBUTION CONFERENCE AND EXPOSITION, 2010, New Orleans. Proceedings... New Orleans: IEEE, 2010. p. 1-8.
- HER, C. *et al.* Novel wind resource assessment and demand flexibility analysis for community resilience: a remote microgrid case study. *Renewable Energy*, v. 179, p. 1472-1486, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.07.099>.
- LIMA, J. C. *et al.* Micro e/ou mini central hidrelétrica na geração de energia distribuída. In: SIMPÓSIO DE TCC DAS FACULDADES FINOM E TECSOMA, 1. _____, 2019, Montes Claros. Anais... Montes Claros: FINOM/Tecsoma, 2019.
- LIU, R. *et al.* Microgrid assisted design for remote areas. *Energies*, v. 15, n. 10, p. 3725, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en15103725>.
- MAJDI NASAB, N. *et al.* Case study of a hybrid wind and tidal turbines system with a microgrid for power supply to a remote off-grid community in New Zealand. *Energies*, v. 14, n. 12, p. 3636, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14123636>.
- MOON, H.-J. *et al.* Decentralised active power control strategy for real-time power balance in an isolated microgrid with an energy storage system and diesel generators. *Energies*, v. 12, n. 3, p. 511, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en12030511>.
- SANTOS, R. C.; BETIOL, G. H. Análise do comportamento de uma microgrid composta por fontes renováveis operando em modo ilhado. 2019. Trabalho de pesquisa apresentado no contexto de Iniciação Científica. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2019.
- SOSHINSKAYA, M. *et al.* Microgrids: experiences, barriers and success factors. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 659-672, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.134>.
- SULAEMAN, A. *et al.* Remote microgrids for energy access in Indonesia — Part I: scaling and sustainability challenges and a technology outlook. *Energies*, v. 14, n. 20, p. 6643, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14206643>.
- TAQUÉTI SILVA, G. A. *et al.* Simulação dos modos de operação de uma microrrede de baixa tensão com sistema fotovoltaico. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR (COBENSOL), 5., 2014, Recife. Anais... Recife: CBENS, 2014.