



ConBREpro

XV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

03 a 05 de dezembro de 2025

As Engenharias na Transformação Digital das PMEs

Smart Energy sob uma Perspectiva Crítica: Uma Revisão Sistemática com Aplicação do Methodi Ordinatio

Thamires Martinho Prados

Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Regina Negri Pagani

Engenharia de Produção – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Leda Maria Saragiotto Colpini

Química - Universidade Federal do Paraná

Giane Gonçalves Lenzi

Engenharia Química - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Resumo: As transformações no setor energético global têm impulsionado o interesse por Sistemas de Energia Inteligente (Smart Energy Systems – SES), que integram fontes renováveis, tecnologias digitais e estratégias de gestão da demanda. No entanto, a literatura científica ainda carece de abordagens críticas que contemplem os desafios sociotécnicos, institucionais e territoriais associados a esses sistemas. Este artigo realiza uma revisão sistemática da literatura sobre SES, utilizando a metodologia Methodi Ordinatio, a fim de identificar os estudos mais relevantes publicados entre 2021 e 2025. A análise classificou 65 artigos com base em critérios objetivos, como fator de impacto, número de citações e ano de publicação, organizando-os em três eixos temáticos: (i) integração setorial e arquitetura dos sistemas, (ii) sustentabilidade e governança e (iii) barreiras sociotécnicas. Os resultados indicam que, embora as inovações técnicas sejam amplamente discutidas, aspectos como justiça energética, desigualdades territoriais e participação social permanecem pouco explorados. A pesquisa evidencia a necessidade de uma abordagem integrada, que reconheça os limites e potenciais das soluções tecnológicas, e promova transições energéticas contextualizadas, equitativas e sensíveis às realidades locais. Conclui-se que, para que a energia inteligente seja de fato transformadora, ela precisa ser acompanhada por mudanças institucionais, arranjos de governança inclusivos e critérios amplos de sustentabilidade.

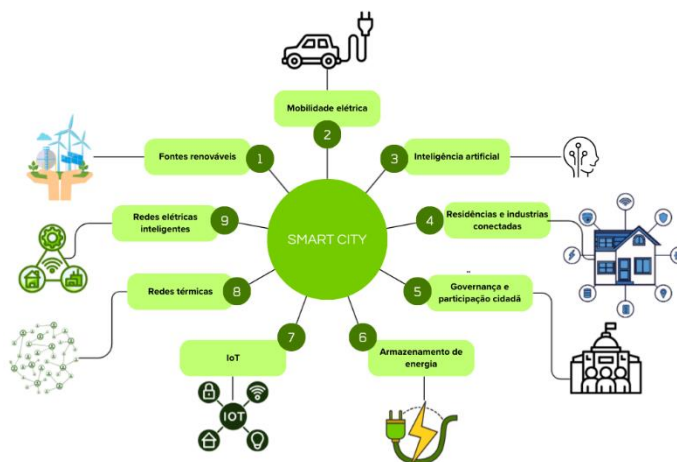
Palavras-chave: SES; Transição Energética; Sustentabilidade; Barreiras Sociotécnicas; Indústria 5.0.

Smart Energy from a Critical Perspective: A Systematic Review Using the Methodi Ordinatio Approach

Abstract: Transformations in the global energy sector have driven interest in Smart Energy Systems (SES), which integrate renewable sources, digital technologies, and demand management strategies. However, the scientific literature still lacks critical approaches that address the socio-technical, institutional, and territorial challenges associated with these systems. This article conducts a systematic review of the literature on SES, using the Methodi Ordinatio methodology, in order to identify the most relevant studies published between 2021 and 2025. The analysis classified 65 articles based on objective criteria, such as impact factor, number of citations, and year of publication, organizing them into three thematic axes: (i) sectoral integration and systems

architecture, (ii) sustainability and governance, and (iii) socio-technical barriers. The results indicate that, although technical innovations are widely discussed, aspects such as energy justice, territorial inequalities, and social participation remain largely unexplored. The research highlights the need for an integrated approach that recognizes the limits and potential of technological solutions and promotes contextualized, equitable energy transitions that are sensitive to local realities. It can be concluded that, for smart energy to be truly transformative, it must be accompanied by institutional changes, inclusive governance arrangements, and broad sustainability criteria.

Keywords: SES; Energy Transition; Sustainability; Socio-technical Barriers; Industry 5.0.



1. Introdução

O cenário energético global enfrenta transformações profundas, impulsionado por fatores como o crescimento urbano acelerado, a intensificação das mudanças climáticas e o avanço das tecnologias digitais. Embora a pandemia da COVID-19 tenha desacelerado muitos programas de transição energética, o desenvolvimento de sistemas energéticos altamente integrados permanece essencial para alcançar maior eficiência, competitividade econômica e redução dos impactos ambientais (CARVALHO; MILLAR, 2012; SARAFRAZ *et al.*, 2019). Nesse contexto, os Sistemas de Energia Inteligente (*Smart Energy Systems* - SES) que se referem à integração de múltiplas infraestruturas energéticas como redes elétricas, térmicas e de gás com tecnologias digitais, automação e participação ativa dos consumidores, emergem como soluções promissoras, ao integrarem fontes renováveis, redes inteligentes de eletricidade, calor e gás, além de tecnologias avançadas de armazenamento e automação (CONNOLLY *et al.*, 2013).

Esse movimento ocorre em paralelo às transformações da chamada Indústria 4.0, caracterizada pela digitalização intensiva, automação e conectividade entre sistemas físicos e virtuais. O avanço dessa revolução tecnológica abriu caminho para a Indústria 5.0, que traz como fundamentos a sustentabilidade, resiliência e centralidade no ser humano (ROJKO, 2017; XU *et al.*, 2021). Ao incorporar essas diretrizes, os SES não apenas otimizam o fornecimento energético, mas também se alinham às diretrizes dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente no que diz respeito à promoção de cidades mais verdes, inclusivas e eficientes (NORDHAUS, 2019).

As cidades, por sua vez, estão no centro das discussões sobre sustentabilidade. Em 2019, elas foram responsáveis por cerca de dois terços do consumo global de energia final e por aproximadamente 75% das emissões de CO₂ (HALES, 2019). Em muitas regiões urbanas, o sistema de aquecimento e resfriamento urbano representa uma parcela significativa da infraestrutura energética (WERNER, 2017). Transformar essa estrutura é, portanto,

fundamental para alcançar a neutralidade de carbono (IEA, 2021; LAKE, 2017). No entanto, essa transição vai além da incorporação de fontes renováveis: envolve modelos de negócio inovadores, integração setorial (eletricidade, calor e mobilidade), redes inteligentes e novos mecanismos de financiamento (SUMMARY *et al.*, 2016; MATHIESEN; LUND, 2021; GOGGINS *et al.*, 2019).

Apesar do avanço técnico, a maior parte da literatura científica concentra-se nas soluções tecnológicas, deixando de lado aspectos igualmente cruciais, como as barreiras sociotécnicas, as desigualdades no acesso à energia, os riscos ambientais associados às novas cadeias produtivas e os interesses econômicos e políticos que moldam o ritmo da transição (REDA *et al.*, 2021). Como mostram estudos recentes, a transição energética não é neutra, ela exige enfrentamento de resistências institucionais, transformação de infraestruturas legadas e superação de modelos de governança.

É justamente essa lacuna que motiva o presente estudo. Diante da crescente valorização dos sistemas de energia inteligente no discurso acadêmico e institucional, torna-se necessário revisar criticamente como a literatura tem construído esse conceito e em que medida ela aborda suas complexidades, contradições e implicações sociais. Assim, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura sobre *Smart Energy*, com base no método *Methodi Ordinatio*, a fim de identificar os estudos mais relevantes publicados.

Ao identificar os principais temas abordados e as lacunas na literatura, esta pesquisa busca oferecer uma visão crítica e diversa sobre o papel dos sistemas de energia inteligente nas transformações urbanas. Mais do que apenas destacar avanços tecnológicos, o objetivo é compreender as múltiplas dimensões técnicas, sociais e políticas que estão implicadas no conceito de energia inteligente.

2. Referencial teórico

2.1 Integração setorial e arquitetura de sistemas de energia inteligentes

O avanço da digitalização tem redefinido as estruturas produtivas e energéticas em escala global, impulsionado pelo surgimento da Indústria 4.0, que promove a integração entre sistemas físicos e digitais em tempo real (SCHWAB, 2017). Mais recentemente, a indústria 4.0 abriu caminho para a quinta revolução industrial, a Indústria 5.0, que tem ampliado esse paradigma ao incorporar valores como sustentabilidade, resiliência e foco humano (XU *et al.*, 2021). Neste cenário, os SES aparecem como elementos-chave nas estratégias de mitigação das mudanças climáticas, ao promoverem a integração entre redes elétricas, térmicas e de gás com tecnologias de armazenamento e automação avançadas (CONNOLLY *et al.*, 2013).

A lógica dos SES baseia-se na criação de sinergias entre diferentes setores energéticos, rompendo com a lógica de planejamento setorial isolado e caminhando para uma abordagem mais interligada, eficiente e adaptável às demandas locais (LUND, 2014). Esses sistemas podem ser potencializados por arquiteturas baseadas em Internet das Coisas (IoT) e Resposta à Demanda (DR), nas quais consumidores ajustam seu consumo de energia com base em sinais econômicos, tarifários ou operacionais, contribuindo para o equilíbrio da rede e para a eficiência geral do sistema (PALENSKY; DIETRICH, 2011). Recentes avanços sugerem o uso de tecnologias como Arquitetura Orientada a Serviços (SOA), IoT e soluções baseadas em nuvem (HAGHGOO *et al.*, 2021). No entanto, apesar da escalabilidade das soluções em nuvem globais, há preocupações significativas relacionadas à segurança da informação, ao tempo de resposta e à privacidade (DERHAMY *et al.*, 2017; YAGHMAEE *et al.*, 2017).

Como alternativa, propõe-se a utilização de nuvens locais, compostas por sistemas interconectados e restritos a ambientes organizacionais ou territoriais específicos, que

aumentam a confiabilidade e reduzem os riscos operacionais (VARGA *et al.*, 2017). Essa arquitetura distribuída é particularmente relevante na implementação de SES, pois permite acoplamentos mais seguros e eficazes entre setores energéticos e usuários finais. Três grandes infraestruturas compõem essa abordagem sistêmica: (i) redes elétricas inteligentes, que articulam fontes renováveis intermitentes (como solar e eólica) com cargas flexíveis, como veículos elétricos e bombas de calor; (ii) redes térmicas, que otimizam o uso de calor residual e ampliam a flexibilidade via armazenamento térmico; e (iii) redes de gás inteligentes, capazes de conectar os setores elétrico, térmico e de transporte, com potencial de conversão em combustíveis líquidos quando necessário (LUND *et al.*, 2016).

Combinando essas infraestruturas e tecnologias emergentes, os *Smart Energy Systems* tornam-se centrais na arquitetura energética no contexto da Indústria 4.0 e 5.0 (JAVED *et al.*, 2022). A interconexão entre subsetores energéticos via IoT e automação inteligente abre caminho para soluções mais eficientes e menos custosas, ao mesmo tempo em que fortalece a resiliência dos sistemas urbanos. Nesse sentido, destacam-se as estratégias de Gestão da Demanda (DSM), voltadas ao uso racional de energia no nível do consumidor, e a Resposta à Demanda (DR), que se concentra em ajustes de curto prazo no consumo energético em resposta a estímulos externos, ambos essenciais para o equilíbrio dinâmico entre oferta e demanda em tempo real (SALAMEH *et al.*, 2021; JAVED *et al.*, 2023).

Em síntese, os Sistemas de Energia Inteligente vão além da inovação técnica: exigem integração setorial, participação social e alinhamento com as realidades locais, para que possam realmente contribuir com uma transição energética justa e sustentável.

2.2 Sustentabilidade e governança na produção de energia limpa

A produção de energia limpa vai além da substituição de tecnologias, é essencial integrar critérios de justiça social, uso responsável dos recursos e participação ativa dos diversos atores.

A sustentabilidade, no contexto da transição energética, deve ser compreendida de maneira ampla e integrada, baseada nos cinco pilares fundamentais: pessoas, planeta, prosperidade, paz e parcerias, que sustentam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 (NATIONS, 2015). Esses pilares possuem igual importância e orientam ações voltadas à erradicação da pobreza, promoção da saúde e segurança, garantia de equidade, uso responsável dos recursos naturais e fortalecimento da solidariedade global, especialmente com os grupos mais vulneráveis. Tais princípios se tornam ainda mais relevantes diante do crescimento dos acordos internacionais para produção e exportação de hidrogênio verde entre países do Norte e do Sul Global, exigindo a definição de critérios de sustentabilidade específicos para esse novo vetor energético.

O Blohm; Dettner (2023), discute o uso do hidrogênio como vetor estratégico para alcançar a neutralidade de carbono, dada sua capacidade de substituir fontes fósseis em setores intensivos em energia. Entretanto, as emissões associadas ao hidrogênio ao longo de seu ciclo de vida dependem diretamente da matriz energética utilizada para sua produção. Atualmente, a maior parte do hidrogênio no mundo é produzida a partir de combustíveis fósseis, principalmente o gás natural. Por outro lado, o hidrogênio verde, obtido via eletrólise com fontes renováveis, tem o potencial de ser uma alternativa de baixo impacto, além de funcionar como armazenador de energia em sistemas com fontes intermitentes, como solar e eólica. Nesse cenário, muitos países destacam-se pelo elevado potencial renovável e pelos custos relativamente baixos de geração elétrica, o que os torna candidatos estratégicos à produção de hidrogênio verde em larga escala.

Contudo, experiências anteriores com grandes empreendimentos energéticos mostram que é fundamental estabelecer padrões socioambientais rigorosos, a fim de garantir que tais projetos não repitam injustiças históricas (BLOHM; DETTNER, 2023). A produção de

hidrogênio não deve comprometer os recursos naturais locais nem gerar impactos sociais negativos. Ao contrário, deve ser uma oportunidade para incentivar o desenvolvimento industrial regional e ampliar o acesso à energia. Por isso, a adoção de critérios de sustentabilidade não deve se restringir à exportação do hidrogênio verde, mas também deve ser aplicada ao seu uso doméstico (BLOHM, 2023; MOUSTAKBAL, 2021).

Além disso, a expansão da infraestrutura renovável não está isenta de contradições sociais. Injustiças relacionadas à apropriação de terras, exclusão de comunidades e benefícios desiguais são desafios persistentes. Torna-se essencial garantir que a cadeia de produção do hidrogênio verde não seja estruturada com base nas mesmas desigualdades que marcam a atual transição energética (BLOHM, 2023; KALT; TUNN, 2022).

Apesar da importância de critérios ambientais e de justiça na estruturação de soluções energéticas, o sucesso da transição energética urbana depende também de fatores institucionais, culturais e econômicos que frequentemente escapam às análises tradicionais de sustentabilidade. Por essa razão, é fundamental discutir as barreiras sociotécnicas que se impõem à implementação de sistemas inteligentes, especialmente em contextos urbanos marcados por estruturas legadas e desigualdades históricas.

2.3 Barreiras sociotécnicas na transição energética urbana

À medida que os centros urbanos se consolidam como os principais consumidores de energia e emissores de gases de efeito estufa, tornam-se também protagonistas nas estratégias globais de mitigação climática. A descarbonização do setor de aquecimento urbano, representa uma frente estratégica e muitas vezes negligenciada no debate sobre transições energéticas sustentáveis. Apesar de sua relevância estrutural, ainda enfrentam barreiras que vão além das limitações tecnológicas.

Dados de 2019 indicam que as cidades foram responsáveis por aproximadamente dois terços do consumo de energia final e por 75% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) em escala global (HALES, 2019). Em várias regiões urbanas, os sistemas de aquecimento e resfriamento centralizados representam uma fração considerável da infraestrutura energética local (WERNER, 2017). Nesse sentido, transformar essa base instalada é essencial para alcançar metas de neutralidade de carbono, sobretudo em países onde o aquecimento urbano tem papel central no abastecimento (IEA, 2021; LAKE *et al.*, 2017).

Avanços tecnológicos recentes apontam que soluções digitais e integradas, como sensores inteligentes, redes térmicas inteligentes e automação de demanda, têm potencial para reduzir significativamente as emissões desse setor (BUFFA *et al.*, 2019; LUND *et al.*, 2016). No entanto, embora promissoras, essas tecnologias não enfrentam apenas desafios operacionais: há também obstáculos sociopolíticos e econômicos relevantes que condicionam sua adoção e viabilidade em larga escala. A literatura revela, por exemplo, que interesses econômicos consolidados, especialmente de empresas atuantes na geração convencional, tendem a resistir à adoção de alternativas limpas (REDA *et al.*, 2021).

Além disso, há uma lacuna significativa na literatura e nas políticas públicas quando se trata das barreiras sociais associadas à descarbonização do aquecimento urbano. Elementos como aceitação social, capacidade institucional local, conflitos de interesse e falta de incentivos financeiros adequados são frequentemente subestimados, apesar de influenciarem diretamente a velocidade e a autenticidade da transição.

3. Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa e exploratória com base na revisão sistemática da literatura, fundamentada na metodologia *Methodi Ordinatio*, proposta por (PAGANI *et al.*, 2015) e posteriormente atualizada em sua versão 2.0 (PAGANI *et al.*, 2022). Tal método foi escolhido por sua capacidade de classificar artigos científicos com base em

critérios objetivos e combinados, particularmente útil em áreas emergentes e multidimensionais como o tema *Smart Energy*.

A revisão seguiu as nove etapas da *Methodi Ordinatio*, desde a definição de palavras-chave até a análise qualitativa dos artigos mais relevantes. As buscas ocorreram na base *Scopus*, utilizando os termos “*smart energy*” (em *source title*) e “*renewable energy*” AND “*sustainability*” (em título, resumo e palavras-chave), totalizando 217 documentos iniciais. Após a eliminação manual de duplicatas, documentos não científicos e artigos de conferência, obteve-se um portfólio final de 65 artigos científicos. A filtragem foi realizada manualmente, seguindo os critérios da metodologia e assegurando rigor na seleção dos estudos. Foi utilizada uma planilha eletrônica (RankIn), conforme proposto na versão 2.0 da metodologia, para organizar e classificar os artigos selecionados. Essa ferramenta permite automatizar o cálculo do índice de relevância científica *InOrdinatio*, assegurando que todos os periódicos estejam devidamente indexados. O cálculo é realizado com base na combinação de três critérios principais: o fator de impacto (FI) da revista, o número de citações (Ci) e o ano de publicação (γ). Dentro da planilha atribuiu-se o valor 10 ao fator de impacto, priorizando a atualidade das publicações, uma vez que o campo de *Smart Energy* tem se desenvolvido com intensidade nos últimos cinco anos, refletindo inovações tecnológicas e debates políticos atualizados, o valor 10 também a variável ano e ao número de citações. Como resultado, foram selecionados para a amostra final de artigos aqueles que obtiveram os maiores escores na equação do índice *InOrdinatio*. A escolha não se pautou exclusivamente pelo volume de citações, mas considerou também a atualidade das publicações e sua pertinência temática em relação à abordagem crítica adotada neste estudo (PAGANI *et al.*, 2015; PAGANI *et al.*, 2022).

Por fim, os artigos com os maiores valores de *InOrdinatio* foram selecionados para análise sistemática, sendo posteriormente categorizados em três eixos temáticos: (i) integração setorial e arquitetura dos SES; (ii) sustentabilidade e governança; (iii) barreiras sociotécnicas. Essa organização tem como finalidade fomentar uma análise crítica e transversal do conceito de *Smart Energy*.

4. Resultados e discussão

4.1 Sustentabilidade

Embora a sustentabilidade seja um termo recorrente nos discursos sobre *Smart Energy*, não pode ser limitada a indicadores técnicos como eficiência ou à redução de emissões com a substituição de fontes fósseis por renováveis. Como mostram os estudos analisados, ela deve ser compreendida como um conceito multidimensional, que relata aspectos ambientais, sociais, econômicos e institucionais. Essa visão ajustada está de acordo com os cinco pilares definidos pela Agenda 2030, fornecendo uma base orientadora para avaliar não apenas os resultados das soluções energéticas inteligentes, mas também os modos de implementação, os atores envolvidos e os impactos gerados nos territórios (NATIONS, 2015).

Estudos de Reker *et al.*, (2022) ressaltam que, para que determinados países consigam conter o aumento da temperatura global abaixo de 1,5 °C, será necessário expandir significativamente a presença de fontes renováveis na matriz energética. No entanto, a variabilidade na geração solar e eólica impõe desafios relevantes, como a integração entre setores, o gerenciamento da demanda e a garantia de fornecimento contínuo. Tais obstáculos demandam uma abordagem sistêmica da sustentabilidade, que leve em conta não apenas o papel da tecnologia, mas também suas limitações operacionais e impactos indiretos.

Por outro lado, muitos países do Sul Global apresentam elevado potencial para a geração de energia renovável, com custos reduzidos de eletricidade e condições ideais para a

produção de hidrogênio verde. No entanto, a experiência com grandes projetos energéticos mostra que, sem padrões rigorosos de sustentabilidade e justiça social, há o risco de repetição de práticas extrativistas que comprometem os direitos das populações locais e a integridade ambiental. A inclusão de critérios sociotécnicos e de indicadores qualitativos como aceitação pública, geração de emprego e impacto na saúde é, portanto, fundamental para avaliar a sustentabilidade de forma mais realista e comprometida com o bem-estar coletivo (BLOHM; DETTNER, 2023).

Nesse cenário, ganha relevância a transição da Indústria 4.0 para a denominada Indústria 5.0, que tem se consolidado nos debates acadêmicos e institucionais por valorizar princípios como a resiliência, a centralidade no ser humano e o compromisso com a sustentabilidade. Ao contrário de sua antecessora, a indústria 5.0 propõe o equilíbrio entre o avanço tecnológico e a promoção da justiça social, buscando garantir que os benefícios da digitalização e da inteligência artificial sejam distribuídos de maneira mais equitativa (XU *et al.*, 2021). Essa abordagem reforça a necessidade de que as SES, inclusive as energéticas, sejam desenvolvidas e implementadas com empatia social, alinhadas à realidade dos territórios e às necessidades das comunidades que delas dependem (JAVED *et al.*, 2023).

Portanto, a sustentabilidade das cidades e dos sistemas urbanos de energia não devem ser analisadas de maneira isolada. Deve-se considerar a interdependência com os sistemas de água, transporte, saneamento e governança urbana. A literatura reforça que a integração desses elementos, aliada a uma governança participativa e a um planejamento baseado em dados e indicadores socioambientais, é o caminho para a construção de cidades verdadeiramente inteligentes e não apenas tecnológicas.

4.2 Barreiras sociotécnicas e os limites da transição energética

A transição para sistemas de energia inteligente é frequentemente apresentada como um processo inevitável e tecnicamente viável rumo à sustentabilidade. No entanto, quando analisada, essa transição revela-se distante de um processo linear, homogênea ou desprovida de tensões, existe muitas barreiras. Ela envolve a transformação de sistemas sociotécnicos, profundamente enraizados em estruturas institucionais, culturais, econômicas e tecnológicas que, muitas vezes, resistem à mudança. Assim, mais do que um desafio de engenharia, a transição energética impõe um conjunto de barreiras que exigem soluções sociais, políticas e organizacionais.

No estudo de Reda *et al.*, 2021, oferecem uma contribuição fundamental ao destacar que a descarbonização de sistemas urbanos de aquecimento, requer não apenas tecnologias como redes inteligentes, armazenamento de energia e novos modelos de negócio, mas também uma integração setorial entre eletricidade, calor e mobilidade, além de governança e financiamento adequados (SUMMARY *et al.*, 2016; MATHIESEN; LUND, 2021; GOGGINS *et al.*, 2019). Os autores observaram que a maioria dos estudos concentra-se na inovação tecnológica, enquanto as barreiras sociais, que deveriam ser valorizadas para acelerar a descarbonização, receberam pouca atenção. Dessa forma, a abordagem das transições sociotécnicas mostra-se pertinente para compreender as múltiplas barreiras de natureza não técnica que frequentemente surgem na reestruturação de infraestruturas de aquecimento urbano ainda dependentes de combustíveis fósseis.

A partir da perspectiva de transições sociotécnicas, no trabalho de Reda *et al.*, 2021, adotam o modelo multinível (Multi-Level Perspective – MLP) no qual propõe que as transições sociotécnicas ocorrem por meio da interação entre três níveis: regime, nicho e paisagem. O regime sociotécnico representa a forma tradicional e estabilizada de atender a uma necessidade social, como o fornecimento de energia, sendo sustentado por normas, instituições, hábitos culturais e tecnologias consolidadas. Já os nichos são espaços protegidos onde surgem inovações radicais ainda não competitivas, que precisam de apoio

político ou econômico para se desenvolver. Exemplos incluem tecnologias como bombas de calor industriais, armazenamento térmico e automação de resposta à demanda. Por fim, a paisagem engloba fatores externos e macroestruturais, como crises climáticas, transformações culturais e políticas públicas, que podem pressionar os regimes vigentes, criando janelas de oportunidades para que as inovações de nicho ganhem espaço e transformem os sistemas existentes.

Nesse contexto, a literatura mostra que não basta desenvolver tecnologias avançadas. É preciso alterar estruturas institucionais, desafiar modelos de negócio enraizados e superar resistências culturais. Assareh *et al.*, (2022), reforça essa ideia ao afirmar que a transição para sistemas baseados em fontes renováveis e variáveis exige não só novos arranjos técnicos, como o uso de múltiplos vetores energéticos integrados (eletricidade, calor, refrigeração), mas também um redesenho dos próprios sistemas energéticos. Tal transformação exige conhecimento sobre a dinâmica dos SES, descentralização e articulação entre diferentes agentes territoriais (MATHIESEN; LUND, 2021; O'DWYER *et al.*, 2019; SIDNELL *et al.*, 2021). Ainda que seja tecnicamente possível projetar um sistema 100% renovável (SIDNELL *et al.*, 2018), isso não será sustentável sem planejamento sensível ao contexto, capacidade de governança local e suporte contínuo à inovação institucional.

Portanto, a transição para sistemas de energia inteligente não deve ser compreendida apenas como uma questão de inovação tecnológica, mas como um processo profundamente sociotécnico, que exige mudanças estruturais nos modos de governar, planejar e distribuir energia. As tecnologias emergentes, por mais promissoras que sejam, não são suficientes para garantir uma transição bem-sucedida se não forem acompanhadas de mecanismos institucionais capazes de lidar com conflitos, resistências e desigualdades. Avançar rumo a sistemas energéticos mais sustentáveis e inteligentes depende da capacidade de integrar múltiplos setores, atores e territórios em torno de um plano comum, que reconheça a complexidade das infraestruturas existentes e promova soluções baseadas na realidade local.

4.3 Barreiras sociotécnicas e os limites da transição energética

As inovações tecnológicas vêm ocupando posição central nos debates sobre *Smart Energy*, sendo frequentemente apresentadas como soluções promissoras para os desafios energéticos contemporâneos. Tecnologias como módulos fotovoltaicos bifaciais verticais, sistemas híbridos de energia com dessalinização e cogeração, além de modelos baseados em inteligência artificial e automação descentralizada, aparecem como alternativas para aumentar a eficiência, reduzir emissões e ampliar a autonomia energética. No entanto, existem limitações importantes quando confrontados com os contextos sociais, geográficos e econômicos em que são aplicados.

O trabalho de Reker *et al.*, (2022) é modelo nesse sentido. Ao analisar o potencial dos sistemas fotovoltaicos verticais no futuro sistema energético alemão, os autores mostram que a distribuição espacial da produção de energia influencia diretamente a necessidade de armazenamento, a estabilidade da rede e o uso de combustíveis fósseis como complemento. A proposta de sistemas orientados para o leste-oeste, especialmente em áreas agrícolas com uso duplo da terra (energia e cultivo), revela ganhos significativos na distribuição horária da geração elétrica. Contudo, o estudo reconhece que a viabilidade desse modelo depende de condições específicas de latitude, albedo do solo e políticas de incentivo ao uso do espaço rural, ou seja, não é uma solução universal, mas territorialmente condicionada.

De maneira semelhante Assareh *et al.*, (2022), propõem um sistema híbrido baseado em energia solar, com acoplamento entre ciclo *Rankine* orgânico (ORC), dessalinização por múltiplos efeitos (MED) e gerador a biogás. A pesquisa destaca a eficiência termoecômica

do sistema e seu potencial para regiões com escassez hídrica e alta irradiação solar. No entanto, o modelo exige tecnologia avançada, conhecimento técnico especializado e infraestrutura de manutenção altamente qualificada, o que pode ser um impedimento em países do Sul Global ou em localidades isoladas. O estudo reforça a importância de considerar não apenas o desempenho técnico, mas também a capacidade instalada dos territórios para absorver e sustentar soluções tecnológicas complexas ao longo do tempo.

Esses estudos mostram que, apesar das inovações aplicadas às transições energéticas serem fundamentais, trazem consigo uma série de desafios operacionais, sociais e institucionais. Assim, torna-se essencial adotar uma perspectiva que reconheça os seus limites e à articule com o planejamento local, as capacidades regionais e a governança pública.

5. Considerações finais

5.1 Síntese crítica dos achados

Neste estudo, foi possível observar que, embora o campo de *Smart Energy* esteja em plena expansão, os discursos predominantes ainda se concentram fortemente nos benefícios técnicos e operacionais das tecnologias emergentes. A revisão sistemática realizada com base no método *Methodi Ordinatio* evidenciou que os artigos mais relevantes do período entre 2021 e 2025 tratam majoritariamente da integração setorial e das inovações digitais, mas nem sempre aprofundam os impactos sociais, ambientais e geopolíticos que acompanham essas soluções. Por outro lado, trabalhos que adotam uma abordagem mais crítica como os que discutem governança, justiça energética e desigualdades estruturais ainda são minoritários, embora essenciais para a construção de uma transição energética mais justa e inclusiva.

5.2 Contribuições e limites da pesquisa

A principal contribuição desta pesquisa foi oferecer uma leitura crítica e sistematizada da literatura recente sobre *Smart Energy*, a partir de critérios objetivos de ranqueamento científico. Ao integrar diferentes dimensões — técnica, social, política e ambiental —, este trabalho amplia o debate sobre os desafios da transição energética nas cidades e em contextos de vulnerabilidade territorial. No entanto, é importante reconhecer algumas limitações: a análise se restringiu à base *Scopus*, o que pode ter excluído produções relevantes presentes em outras bases; além disso, o estudo não incluiu entrevistas ou dados empíricos primários, o que pode ser explorado em trabalhos futuros.

5.3 Caminho para futuras pesquisas

Os resultados desta revisão indicam a necessidade de ampliar a produção acadêmica que conecte tecnologia e justiça social. Estudos futuros podem avançar na análise de experiências locais de implantação de sistemas *smart*, incluindo vozes da sociedade civil, movimentos sociais, e comunidades afetadas por grandes projetos de energia limpa. Além disso, recomenda-se que novas pesquisas considerem as interseções entre *Smart Energy*, gênero, raça e território — dimensões ainda pouco exploradas no campo. Por fim, é urgente refletir sobre os riscos de uma transição energética que reproduza as lógicas de exclusão do passado: uma energia inteligente, para ser verdadeiramente transformadora, precisa ser também política, sensível ao contexto e comprometida com a equidade.

Referências

ASSAREH, E.; DELPISHEH, M.; ALIRAHMI, S. M.; AFI, S.; CARVALHO, M. Thermodynamic-economic optimization of a solar-powered combined energysystem with desalination for electricity and freshwater production. *Smart Energy*, 5 (2022) 100062 10.1016/j.segy.2021.100062

BAČEKOVIĆ, I.; ØSTERGAARD, P.A. Local smart energy systems and cross-system integration. *Energy*, 151 (2018), 812-825, 10.1016/j.energy.2018.03.098

BLOHM, M. The hidden costs of Morocco's energy transition: investigating the impact of foreign investment and the lack of social participation (2023)

BLOHM, M.; DETTNER, F. Green hydrogen production: Integrating environmental and social criteria to ensure sustainability. *Smart Energy*, 11 (2023) 100112, 10.1016/j.segy.2023.100112

BUFFA, S.; COZZINI, M.; D'ANTONI, M.; BARATIERI, M.; FEDRIZZI, R. 5th generation district heating and cooling systems: a review of existing cases in Europe. *Renew Sustain Energy Rev*, 104 (2019), pp. 504-522, 10.1016/j.rser.2018.12.059

CARVALHO, M.; MILLAR, D.L. Concept development of optimal mine site energy supply. *Energies*, 5 (2012), pp. 4726-4745, 10.3390/en5114726

CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V.; ØSTERGAARD, P. A.; MÖLLER, B.; NIELSEN, S.; RIDJAN, I.; HVELPLUND, F.; SPERLING, K.; KARNØE, P. Smart energy systems: holistic and integrated energy systems for the era of 100% renewable energy, *Smart Energy Systems*. Aalborg: Aalborg University; 2013.

DERHAMY, H.; ELIASSON, J.; DELSING, J. Iot interoperability—on-demand and low latency transparent multiprotocol translator. *IEEE Internet Things J*, 4 (5) (2017), pp. 1754-1763

GOGGINS, G.; FAHY, F.; JENSEN, C.L. Sustainable transitions in residential energy use: characteristics and governance of urban-based initiatives across Europe. *J Clean Prod*, 237 (2019), p. 117776, 10.1016/j.jclepro.2019.117776

HAGHGOO, M.; DOGNINI, A.; STOREK, T.; PLAMANESCU, R.; RAHE, U.; GHEORGHE, S.; ALBU, M.; MONTI, A.; MÜLLER, D. A cloud-based service-oriented architecture to unlock smart energy services. *Energy Informatics*, 4 (1) (2021), pp. 1-20

HALES, D. REN21 - 2019 global status report: renewables in cities [ren21.net/renewables-in-cities-2019-gsr/](https://www.ren21.net/renewables-in-cities-2019-gsr/)(2019), p. 336

IEA- District heating needs flexibility to navigate the energy transition – Analysis - IEA n.d. <https://www.iea.org/commentaries/district-heating-needs-flexibility-to-navigate-the-energy-transition> (accessed February 2, 2021).

JAVED, S.; PANIAGUA, C.; PATIL, S.; VAN DEVENTER, J.; DELSING, J. Smart adapter system architecture for seamless and scalable integration of industry and smart home iot. *IECON 2022—48th annual conference of the, IEEE Industrial Electronics Society* (2022), pp. 1-6

JAVED, S.; TRIPATHY, A.; VAN DEVENTER, J.; MOKAYED, H.; PANIAGUA, C.; DELSING, J. An approach towards demand response optimization at the edge in smart energy systems using local clouds. *Smart Energy*, 12 (2023), 100123, 10.1016/j.segy.2023.100123

KALT, T.; TUNN, J. Shipping the sunshine? A critical research agenda on the global hydrogen transition. *GAIA Ecol Perspect Sci Soc*, 31 (2022), pp. 72-76

LAKE, A.; REZAIE, B.; BEYERLEIN, S. Review of district heating and cooling systems for a sustainable future. *Renew Sustain Energy Rev*, 67 (2017), pp. 417-425, 10.1016/j.rser.2016.09.061

LUND, H. Renewable energy systems: a smart energy systems approach to the choice and modeling of 100% renewable solutions. Academic Press (2014)

LUND, H.; DUIC, N.; ØSTERGAARD, P.A.; MATHIESEN, B.V. Smart energy systems and 4th generation district heating. *Energy*, 110 (2016), pp. 1-4, 10.1016/j.energy.2016.07.105

MATHIESEN, B.V.; LUND, H. Global smart energy systems redesign to meet the Paris Agreement. *Smart Energy*, 1 (2021), p. 100024, 10.1016/J.SEGY.2021.100024

MOUSTAKBAL, J. The Moroccan energy sector: a permanent dependence. (2021) <https://longreads.tni.org/the-moroccan-energy-sector>

NATIONS, U. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. (2015) <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/9814>

NORDHAUS, W. Climate change: the ultimate challenge for economics. *Am Econ Rev*, 109 (6) (2019), pp. 1991-2014

O'DWYER, E.; PAN, I.; ACHA, S.; SHAH, N. Smart energy systems for sustainable smart cities: current developments, trends and future directions. *Appl Energy*, 237 (2019), 581-597, 10.1016/j.apenergy.2019.01.024

PAGANI, R.; KOVALESKI, J.; RESENDE, L. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact factor, number of citation, and year of publication. *Scientometrics* (2015) 105:2109–2135 10.1007/s11192-015-1744-x

PAGANI, R.; PEDROSO, B.; DOS SANTOS, C.; PICININ, C.; KOVALESKI, J. Methodi Ordinatio 2.0: revisited under statistical estimation, and presenting Flinder and RankIn. *Quality & Quantity* (2022) 10.1007/s11135-022-01562-y

PALENSKY, P.; DIETRICH, D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads. *IEEE Trans Ind Inf*, 7 (3) (2011), pp. 381-388

REDA, F.; RUGGIERO, S.; AUVINEN, K.; TEMMES, A. Towards low-carbon district heating: Investigating the socio-technical challenges of the urban energy transition. *Smart Energy*, 4 (2021), 100054, 10.1016/j.segy.2021.100054.

REKER, S.; SCHNEIDER, J.; GERHARDS, C. Integration of vertical solar power plants into a future German energy system. *Smart Energy*, 7 (2022) 100083 <https://doi.org/10.1016/j.segy.2022.100083>

ROJKO, A. Industry 4.0 concept: background and overview., *International journal of interactive mobile technologies* 11 (2017).

SALAMEH, K.; AWAD, M.; MAKARFI, A.; JALLAD, A.-H.; CHBEIR, R. Demand side management for smart houses: a survey. *Sustainability*, 13 (12) (2021), p. 6768

SARAFRAZ, M.M.; TLILI, I.; TIAN, Z.; BAKOURI, M.; SAFAEI, M.R.; GOODARZI, M. Thermal evaluation of graphene nanoplatelets nanofluid in a fast-responding HP with the potential use in solar systems in smart cities. *Appl Sci*, 9 (2019), p. 2101, 10.3390/APP9102101

SCHWAB, K. The fourth industrial revolution. *Currency* (2017)

SIDNELL, T.; CLARKE, F.; DORNEANU, B.; MECHLERI, E.; ARELLANO-GARCIA, H. Optimal design and operation of distributed energy resources systems for residential neighbourhoods. *Smart Energy*, 4 (2021), p. 100049

SUMMARY, E.; EFFICIENCY, B. NO.; E, TRANSPORTATION S. Report of the Horizon 2020 advisory group on energy (2016)

VARGA, P.; BLOMSTEDT, F.; FERREIRA, L.L.; ELIASSON, J.; JOHANSSON, M.; DELSING, J.; DE SORIA, I.M. Making system of systems interoperable—the core components of the arrowhead framework. *J Netw Comput Appl*, 81 (2017), pp. 85-95

XU, X.; LU, Y.; VOGEL-HEUSER, B.; WANG, L. Industry 4.0 and industry 5.0—inception, conception and perception. *J Manuf Syst*, 61 (2021), pp. 530-535

WERNER, S. International review of district heating and cooling. *Energy*, 137 (2017), pp. 617-631, 10.1016/j.energy.2017.04.045

YAGHMAEE, M.H.; LEON-GARCIA, A.; MOGHADDASSIAN, M. On the performance of distributed and cloud-based demand response in smart grid. *IEEE Trans Smart Grid*, 9 (5) (2017), pp. 5403-5417