

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”**ESTUDO SOBRE IMPACTO DOS TELHADOS VERDES FOTOVOLTAICOS NA CAPTURA DE ODORES DE ESGOTO NO AMBIENTE URBANO.**Ana Livia Canato Mangili¹ (IC), Herlane Costa Calheiros (PQ)¹¹Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).**Palavras-chave:** Cobertura Verde. Infraestrutura urbana. Qualidade do ar.**Introdução**

A implantação de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) é essencial, pois contribui com a redução da carga poluidora nos corpos hídricos e preservar o equilíbrio ambiental, mas sua instalação em áreas urbanas costuma enfrentar rejeição devido à emissão de gases odorantes, que afetam o bem-estar da população vizinha e comprometem a aceitação social e a sustentabilidade socioambiental desses sistemas (NUVOLARI, 2011).

Investimentos em construções sustentáveis, como ETEs com soluções baseadas na natureza, podem gerar benefícios ambientais e sociais. Entre essas soluções inovadoras, destacam-se os telhados verdes fotovoltaicos (PV-verde), que integram cobertura vegetal e módulos solares. Além de gerar energia limpa, auxiliam na mitigação de odores, no isolamento térmico e acústico, e na redução do efeito de ilha de calor (LAMNATOU; CHEMISANA, 2015).

O estudo tem como objetivo avaliar o potencial dos telhados verdes fotovoltaicos (PV-verde) como alternativa complementar para a mitigação de odores em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), visando a melhoria da qualidade ambiental urbana e a maior aceitação social dessas infraestruturas. Para isso, busca-se compreender os aspectos técnicos, funcionais e ambientais desses sistemas, considerando seus componentes estruturais, o tipo de vegetação empregada, as características hidráulicas e o desempenho energético.

Além disso, a pesquisa também investiga os impactos das emissões de odores das ETEs sobre a saúde e o bem-estar da população, avaliando como a integração entre vegetação e geração de energia pode contribuir para reduzir esses incômodos. Dessa forma, pretende-se identificar os benefícios ambientais e sociais que os telhados verdes fotovoltaicos podem oferecer ao contexto urbano, reforçando sua importância como solução sustentável multifuncional.

Metodologia

O estudo foi conduzido por meio de uma Revisão Bibliográfica sistemática, com foco em publicações entre 2003 e 2025, disponíveis em bases científicas

como o Portal de Periódicos da CAPES, Google Acadêmico e repositórios institucionais.

As etapas incluíram o estudo dos conceitos e tipologias de telhados verdes fotovoltaicos, a análise crítica de estudos de caso, a investigação dos efeitos dos odores urbanos gerados por sistemas de esgoto e a avaliação do potencial de mitigação desses odores por coberturas vegetadas.

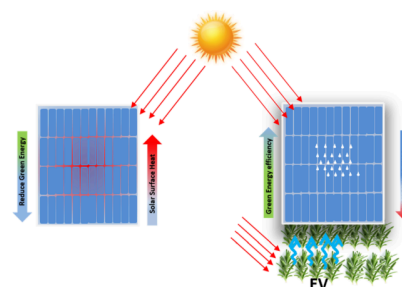
Resultados e discussão

A revisão bibliográfica e a análise de estudos de caso indicam que a integração entre sistemas fotovoltaicos e telhados verdes traz benefícios energéticos, ambientais e urbanos, transformando os telhados convencionais, superfícies impermeáveis e pouco aproveitadas, em soluções baseadas na natureza voltadas à sustentabilidade nas cidades.

Conforme destacado por Hui e Chan (2011), a combinação dos dois sistemas melhora a eficiência dos painéis solares por meio do resfriamento proporcionado pela evapotranspiração da vegetação, além de contribuir para o conforto térmico no interior das edificações. Além do ganho energético, benefícios ambientais foram amplamente reportados. Bragiato e Souza (2024) identificaram incremento da biodiversidade vegetal e microclimática em áreas de PV-verde, enquanto Toledo et al. (2024) associaram a solução à mitigação do efeito de ilha de calor, redução da poluição atmosférica, sonora e hídrica, e promoção de um microclima mais saudável.

A Figura 1 mostra a sinergia entre um sistema convencional e um integrado, destacando como a redução da temperatura dos módulos fotovoltaicos aumenta a eficiência na conversão da energia solar.

Figura 1 – Ilustração do mecanismo dos Telhados Verdes Fotovoltaicos.



Fonte: Shafique; Luo; Zuo (2020)

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

Chagas e Calheiros (2023) evidenciaram, por meio de modelagem no software SWMM, que o uso de coberturas verdes em 75% de um loteamento urbano pode reduzir a vazão de pico de escoamento superficial em até 60%, contribuindo para a prevenção de alagamentos e enchentes. Almeida (2018) ilustra o impacto térmico desses sistemas ao registrar que a superfície de concreto exposta em um telhado atinge 66 °C, enquanto áreas com vegetação se mantêm próximas a 23 °C, como mostrado na Figura 2.

Figura 2: Comparação da temperatura da parte de um telhado coberto por vegetação e a parte sem cobertura verde na prefeitura de Chicago.



Fonte: Almeida, 2018.

Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) realizada por Lamnatou (2014) comparou telhados PV-verde (fotovoltaico com cobertura verde extensiva), PV-calhaus (fotovoltaico com cobertura de pedras) e telhados verdes extensivos e intensivos, destacando que, embora o PV-verde apresente impacto inicial 3% maior no indicador Eco-Indicador 99 devido à produção de insumos vegetais e do substrato, esse efeito é compensado durante a fase operacional pela redução da demanda energética para climatização em climas quentes e pelo aumento da eficiência dos módulos fotovoltaicos, o que se traduz em menores emissões de CO₂ e maior economia de combustíveis fósseis frente ao PV-calhaus e à geração elétrica convencional.

Do ponto de vista econômico, estudos como o de Ciriminna et al. (2019) e Sattler et al. (2020) mostram que o aumento da produção elétrica pode compensar os custos adicionais de instalação e manutenção do telhado verde, sobretudo quando há incentivos fiscais ou políticas públicas de apoio. No Egito, o estudo de Ibrahim et al. (2024) também confirmou a eficiência energética dos telhados PV-verde, apontando redução média de 40% no consumo de energia, embora com custos iniciais mais elevados.

Apesar dos benefícios, existem desafios técnicos e operacionais que podem limitar a adoção em larga escala. Como apontado por Chagas & Calheiro (2023), o peso adicional de substrato, vegetação e água de irrigação exige dimensionamento estrutural adequado, enquanto o sombreamento excessivo ou mal planejado pode reduzir a geração elétrica. E a manutenção também

é apontado com um ponto crítico, abrangendo irrigação, poda, controle de pragas e substituição de espécies. O estudo de Toledo & Calheiros (2023) alerta que os benefícios citados podem ser superestimados se não houver projeto e manutenção adequados, sendo fundamental selecionar espécies adaptadas às condições locais e resistentes a variações climáticas.

Outra limitação relevante é a escassez de dados experimentais em diferentes contextos climáticos e tipologias de edificação, conforme enfatizado por Shafique, Luo e Zuo (2020). A maioria dos estudos é restrita a protótipos ou pequenas áreas, o que dificulta extrapolar resultados para aplicações em escala urbana. Para superar essa lacuna, recomenda-se a realização de pesquisas de longo prazo que incluam monitoramento sazonal e avaliação do desempenho tanto da vegetação quanto dos módulos fotovoltaicos ao longo de vários anos.

A emissão de odores provenientes de sistemas de esgoto urbanos, especialmente nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs), surge como um problema ambiental e de saúde pública relevante. O principal gás responsável por esse impacto é o sulfeto de hidrogênio (H₂S), gerado pela degradação anaeróbica da matéria orgânica, frequentemente associado ao odor característico de “ovo podre” (NUVOLARI, 2011). Compostos como mercaptanas e amins também contribuem para o desconforto olfativo (LILIAMTIS; MANCUSO, 2003).

Do ponto de vista perceptivo e fisiológico, a sensibilidade aos odores varia individualmente, mas a literatura aponta que mesmo concentrações relativamente baixas podem gerar desconforto psicológico, induzindo estresse, náuseas, dores de cabeça, alterações de apetite e, em casos específicos, dificuldades respiratórias (NUVOLARI, 2011). A exposição prolongada pode levar a efeitos crônicos, incluindo a atrofia da função olfativa, enquanto episódios agudos, decorrentes de falhas operacionais ou atividades pontuais, podem provocar reações imediatas e severas (NUVOLARI, 2011). Estudos também destacam efeitos sobre o humor, a pressão arterial, a frequência cardíaca e a respiração, assim como implicações socioeconômicas, como desvalorização imobiliária, redução da arrecadação fiscal e diminuição de investimentos locais (OLIVEIRA, 2021).

Apesar da relevância do tema, o Brasil ainda carece de regulamentações específicas para o controle de emissões odoríferas, existindo apenas iniciativas estaduais isoladas em Paraná, São Paulo e Pará. Em contraste,

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

países como Austrália, Nova Zelândia e diversos europeus estabelecem limites legais com base em modelagem de dispersão atmosférica, enquanto Estados Unidos, Panamá e Coreia do Sul utilizam medições diretas por olfatométria dinâmica. A ausência de padronização normativa no Brasil dificulta a implementação de medidas uniformes e a fiscalização efetiva, o que contribui para a perpetuação do problema em áreas urbanas. Todas essas informações são discutidas por Brandt et al. (2023).

Medidas de mitigação tradicionais, como a aplicação de compostos químicos (ex. nitrato de amônia) para inibir a formação de H₂S, têm mostrado bons resultados (DA SILVA, 2020). No entanto, abordagens complementares baseadas na vegetação, especialmente no contexto de infraestruturas verdes, vêm ganhando relevância por seu potencial de absorção e dispersão de gases odoríferos.

Estudos realizados pela Embrapa (MIURA et al., 2020) demonstram que a vegetação, quando estrategicamente posicionada em cinturões verdes, barreiras vegetais ou sistemas integrados a edificações e em ETEs, pode contribuir para a mitigação de odores, por meio da interceptação física de partículas odoríferas e da absorção de compostos como o H₂S, mercaptanas e aminas. Espécies arbustivas e de pequeno porte, como *Dodonaea viscosa* e *Eugenia uniflora*, são recomendadas por sua capacidade de adaptação ao ambiente urbano e por não causarem sombreamento excessivo, sendo compatíveis com sistemas que integram painéis solares.

Além disso, há exemplos internacionais de edifícios que incorporam vegetação em sua arquitetura para amenizar impactos ambientais, como o Parkroyal em Pickering, idealizado por WOHA Architects (2013), em Singapura, que utiliza jardins verticais e telhados verdes para melhorar a qualidade do ar e reduzir odores urbanos.

No estudo de Irga (2022), telhados verdes mostraram taxas anuais de remoção de 2,3 kg/ano de NO₂, 6,9 kg/ano de O₃ e 0,5 kg/ano de PM_{2.5}, superando médias de remoção registradas em pesquisas anteriores para NO₂ e O₃. Embora esses dados tenham sido obtidos em contexto urbano geral, eles indicam que a vegetação pode atuar como biofiltro para uma gama de compostos voláteis.

Tais abordagens reforçam a viabilidade técnica e paisagística da vegetação como estratégia complementar no controle de emissões odoríferas em áreas urbanas próximas a ETEs e indústrias.

A seleção adequada das espécies vegetais é determinante para a eficiência na captura de gases e na mitigação de odores, sendo preferidas aquelas com folhas densas e rugosas, alta capacidade de absorção de compostos voláteis e resistência a ambientes poluídos, além de considerar a altura e o arranjo da copa em função da direção dos ventos e da altura da fonte emissora (AMORIM, 2004). Em coberturas planas com painéis solares fotovoltaicos, recomenda-se a utilização de vegetação extensiva ou de baixo porte, de modo a evitar o sombreamento dos módulos e garantir o desempenho energético do sistema (LIU et al., 2023).

Apesar dos avanços, permanece uma lacuna de estudos que correlacionam de forma quantitativa a redução de odores em função do tipo e disposição da vegetação urbana, especialmente no contexto de integração com tecnologias fotovoltaicas. Pesquisas futuras devem contemplar medições diretas de gases odoríferos em ambientes com diferentes configurações de SbN, bem como modelagem de dispersão para otimizar o desenho dessas intervenções.

Conclusões

A integração de telhados verdes fotovoltaicos em Estações de Tratamento de Esgoto representa uma abordagem inédita na literatura científica e na prática urbana. No entanto, é uma alternativa promissora para a mitigação de odores e a promoção da sustentabilidade urbana.

A revisão bibliográfica evidenciou que, além de contribuir para o aumento da eficiência energética dos módulos solares e para o controle térmico das edificações, essas estruturas possuem potencial para reduzir a dispersão de gases odoríferos, como o sulfeto de hidrogênio, por meio da interceptação e absorção promovida pela vegetação.

Embora os resultados disponíveis indiquem benefícios ambientais, sociais e econômicos, ainda são limitadas as pesquisas que quantificam diretamente o efeito dessa tecnologia na atenuação de odores específicos de ETEs. Além disso, sua aplicação específica na mitigação de compostos odoríferos ainda não foi explorada de forma sistemática em conjunto com sistemas solares.

Essa proposta inovadora une duas tecnologias sustentáveis em uma solução sinérgica, capaz de promover ganhos ambientais múltiplos: geração de energia limpa, controle de odores urbanos e valorização paisagística. A ausência de estudos consolidados sobre essa combinação reforça o caráter pioneiro da iniciativa e abre caminho para novas pesquisas aplicadas em áreas

“Do conhecimento acadêmico à transformação sustentável: inovação com validação científica”

urbanas próximas a fontes emissoras, como Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) e indústrias.

Dessa forma, recomenda-se o desenvolvimento de estudos de campo de longo prazo, contemplando diferentes arranjos vegetativos, condições climáticas e tipologias construtivas, de modo a consolidar parâmetros técnicos e diretrizes normativas para sua aplicação. A adoção de telhados verdes fotovoltaicos, quando aliada a um planejamento urbano integrado, pode não apenas melhorar a aceitação social dessas infraestruturas, mas também fortalecer as estratégias de mitigação de impactos ambientais e de adaptação às mudanças climáticas.

Agradecimentos

Agradeço à Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI) pelo suporte institucional e pela infraestrutura disponibilizada para a execução desta pesquisa. E também, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, por meio da concessão da bolsa de iniciação científica, que viabilizou o desenvolvimento do estudo. Expresso, ainda, minha gratidão à professora Dra. Herlane Costa Calheiros pela orientação qualificada e pelas contribuições técnicas essenciais em todas as etapas do trabalho.

Referências

ALMEIDA, Milla Araujo de. Desenvolvimento de substratos sustentáveis para implantação de telhados verdes: aproveitamento de resíduos orgânicos e agroindustriais. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Acesso em: 05 de julho de 2025.

AMORIM, Viviane Lourenço de. *Barreiras vegetais para mitigação de odores em estação de tratamento de efluentes de uma indústria de celulose*. 2004. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004. Disponível em: <https://locus.ufv.br/items/a4dc5550-0968-4e61-95f8-a413620b2c30>. Acesso em: 20 ago. 2025.

BRAGIATO, C. R. B. S.; SOUZA, S. N. M. de. Integração dos sistemas de geração de energia fotovoltaica em telhados verdes. *Revista Caribeña de Ciencias Sociales*, [S. l.], v. 13, n. 3, p. e3790, 2024. DOI: 10.53591/e3790.

BRANDT, Emanuel Manfred Freire et al. Estratégias para detecção, espacialização e controle de odores em estações de tratamento de esgoto. *Cadernos Técnicos de Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 3, n. 3, p. 125–139, 2023. DOI: 10.5935/ctesa.v3n3.2023.125.

CHAGAS, B. B.; CALHEIROS, H. C. Projeto e construção de telhados verdes fotovoltaicos na promoção da sustentabilidade hídrica e energética. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, [S. l.], v. 16, n. 7, p. 8206–8220, 2023. DOI: 10.53591/ccs.v16n7.8206.

CIRIMINNA, Rosaria et al. Solar green roofs: A unified outlook 20 years on. *Energy Technology*, v. 7, n. 6, p. 1900128, 2019. DOI: 10.1002/ente.201900128.

DA SILVA LEANDRO, Deleon et al. Barreiras vegetais para a mitigação de odores devem atender também aos objetivos de reforço da segurança alimentar e suporte à biodiversidade. *Acta Geográfica*, v. 14, n. 34, 2020. DOI: 10.18227/2177-4307.acta.v14i34.4314.

HUI, S. C. M.; CHAN, S. C. Integration of green roof and solar photovoltaic systems. In: *Proceedings of Joint Symposium 2011: Integrated Building Design in the New Era of Sustainability*, 22 nov. 2011, Kowloon Shangri-la Hotel, Tsim Sha Tsui East, Kowloon, Hong Kong. p. 1.1–1.10. DOI: 10.13140/RG.2.1.5112.6884.

IBRAHIM, M. M. et al. Do solar green roofs contribute to SDGs, fostering energy efficiency and environmental conservation? *Journal of Renewable Energy and Sustainable Development*, v. 10, n. 2, p. 258–278, 2024. DOI: 10.21622/resd.2024.10.2.924.

IRGA, Peter J. et al. Biosolar green roofs and ambient air pollution in city centres: Mixed results. *Building and Environment*, v. 226, p. 109712, 2022. DOI: 10.1016/j.buildenv.2022.109712.

LAMNATOU, Chr.; CHEMISANA, D. A critical analysis of factors affecting photovoltaic-green roof performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 43, p. 264–280, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2014.11.048.

LAMNATOU, Chr.; CHEMISANA, D. Photovoltaic-green roofs: a life cycle assessment approach with emphasis on warm months of Mediterranean climate. *Journal of Cleaner Production*, v. 72, p. 57–75, 2014. DOI: 10.1016/j.jclepro.2014.03.006.

LILIAMTIS, T. B.; MANCUSO, P. C. S. A geração de maus odores na rede coletora de esgotos do município de Pereira Barreto: um problema de saúde pública. *Saúde e Sociedade*, v. 12, n. 2, p. 86–93, jul. 2003. DOI: 10.1590/S0104-12902003000200009.

LIU, H.-Y. et al. Integrating solar energy and nature-based solutions for climate-neutral urban environments. *Solar*, v. 3, n. 3, p. 382–415, 2023. DOI: 10.3390/solar3030022.

NUVOLARI, Ariovaldo (Coord.). *Esgoto sanitário: coleta, transporte, tratamento e reúso agrícola*. 2. ed. revista, atualizada e ampliada. São Paulo: Blucher, 2011. ISBN: 9788521205685.

MIURA, A. K. et al. *Espécies vegetais recomendadas para cortinamento em Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) na região noroeste do Rio Grande do Sul. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2020. Disponível em: https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1122565. Acesso em: 10 set. 2025*

OLIVEIRA, Aline Barreto Moisés de. *Instrumento de avaliação da exposição do odor industrial para a saúde humana (IOS): construção e validação de conteúdo pelo método Delphi*. 2021. 183 f. Dissertação (Mestrado em Saúde, Ambiente e Trabalho) – Faculdade de Medicina da Bahia, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/37563>. Acesso em: 20 ago. 2025.

SATTLER, Stefan et al. The “PV rooftop garden”: providing recreational green roofs and renewable energy as a multifunctional system within one surface area. *Applied Sciences*, v. 10, n. 5, p. 1791, 2020. DOI: 10.3390/app10051791.

SHAFIQUE, M. et al. Photovoltaic-green roofs: a review of benefits, limitations, and trends. *Solar Energy*, v. 202, p. 485–497, 2020. DOI: 10.1016/j.solener.2020.02.101.

TOLEDO, R. S. B. et al. Telhados verdes como recurso para melhoria da qualidade das primeiras águas pluviais e saúde coletiva. *Observatório de la Economía Latino Americana*, [S. l.], v. 22, n. 1, p. 309. DOI: 10.55905/oelv22n1-163.

WOHA ARCHITECTS. Parkroyal on Pickering / WOHA. ArchDaily, 2013. Disponível em: <https://www.archdaily.com.br/br/01-113225/parkroyal-em-pickering-slash-woha>. Acesso em: 10 set. 2025