

## TELHADO VERDE FOTOVOLTAICO EM CIDADES ESPONJAS SUSTENTÁVEIS

Beatriz Bueno Chagas<sup>1</sup> (IC), Herlane Costa Calheiros (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI).

**Palavras-chave:** Drenagem. Energia. Infraestrutura verde. Painéis solares. Sustentabilidade.

### Introdução

O escopo deste trabalho abrange a temática da integração de telhados verdes fotovoltaicos, uma prática que une a geração de energia solar à incorporação de sistemas de coberturas vegetadas em construções urbanas.

Os objetivos fundamentais deste estudo consistem em:

- Investigar as implicações ambientais e econômicas subjacentes à confluência de telhados verdes e sistemas fotovoltaicos.
- Avaliar os métodos e estratégias de integração dessas tecnologias em contextos edificados.
- Utilização de softwares para quantificar o desempenho hidrológico e energético de um telhado verde fotovoltaico.

Este estudo encontra seu estímulo na urgência premente de conceber soluções sustentáveis para as demandas energéticas contemporâneas, juntamente com a necessidade de otimizar o uso dos espaços urbanos. A fusão de telhados verdes e sistemas fotovoltaicos representa uma perspectiva promissora para a abordagem de desafios ambientais e energéticos inerentes.

Para cumprir tais objetivos, o estudo adotou uma metodologia abrangente, envolvendo uma revisão da literatura e artigos publicados sobre as temáticas, a análise de estudos de caso selecionados, bem como uma análise expositiva das regulamentações brasileiras. Paralelamente, a pesquisa empregou simulações computacionais para avaliar os aspectos hidrológicos e energéticos de telhados verdes fotovoltaicos no cenário urbano do município de Itajubá/MG.

### Metodologia

A pesquisa teve seu ponto de partida na execução de uma revisão bibliográfica abrangente. Essa revisão contemplou fontes científicas, incluindo periódicos acadêmicos, livros-texto e literatura técnica especializada. O escopo abarcou áreas relacionadas a telhados verdes, energia solar fotovoltaica e a interconexão desses sistemas em ambientes urbanos. Esse

processo confere à pesquisa uma base sólida de conhecimento teórico.

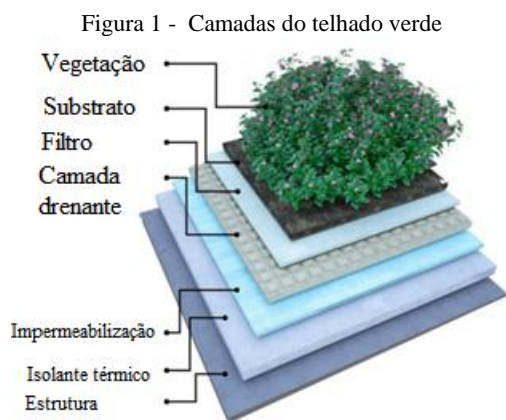
Subsequentemente, foram analisados estudos de caso selecionados, com o propósito de ilustrar a aplicação prática e bem-sucedida de telhados verdes fotovoltaicos em diversos cenários urbanos. A análise desses casos práticos possibilitou a extração de informações relevantes e a identificação de práticas recomendadas no contexto da integração das tecnologias.

A pesquisa prosseguiu com a análise das regulamentações e diretrizes pertinentes ao cenário brasileiro. Foram consultadas legislações municipais, estaduais e federais que tratam da implementação de telhados verdes e sistemas fotovoltaicos em edificações. Normas técnicas aplicáveis também foram examinadas, proporcionando um panorama completo das obrigações legais e padrões técnicos relevantes.

Por fim, foram empregados métodos de simulações computacionais para analisar detalhadamente o desempenho hidrológico e energético de telhados verdes fotovoltaicos. Para a avaliação hidrológica, foi utilizada a ferramenta SWMM (Stormwater Management Model), enquanto a análise da produção energética se valeu do software PVsyst. Essas simulações conferiram rigor quantitativo à pesquisa e viabilizaram a investigação de uma gama de cenários.

### Resultados e discussão

De acordo com Pirouz *et al.* (2021), o telhado verde é definido como uma composição da estrutura da edificação aliada a camadas, a partir da superfície do telhado ao topo: membrana impermeável, camada de drenagem, filtro, solo e vegetação. A Figura 1 apresenta as camadas estruturais de um telhado verde.



Fonte: adaptado de Abdalazeem *et al.* (2022)

De acordo com Fernandez-Cañero *et al.* (2013), os telhados verdes podem ser classificados quanto suas dimensões em três principais tipos: extensivo, semi-intensivo e intensivo. A Tabela 1 resume as principais características entre as configurações.

Tabela 1 - Tipos de telhado verde

Fatores	Tipo de Telhado-Verde		
	Extensivo	Semi-Intensivo	Intensivo
Altura da vegetação (m)	0,06 a 0,20	0,12 a 0,25	0,15 a 1
Peso (kg/m <sup>2</sup> )	60 a 150	120 a 200	180 a 500
Tipo de Vegetação	Musgos, suculentas, ervas e gramíneas	Arbustos	Vegetações perenes e árvores de baixa estatura
Investimento e manutenção	Baixo	Médio	Alto

Fonte: adaptado de Fernandez-Cañero *et al.* (2013)

De acordo com Shafique *et al.* (2020), a maioria dos estudos escolhe telhados verdes extensivos e vegetações do tipo *sedum*, popularmente conhecidas como suculentas, pela sua tolerância ao cultivo a pleno sol, típico das instalações de telhado verde. De modo geral, espera-se que a espécie escolhida possua um alto índice de área foliar (diretamente relacionado com aumento da evapotranspiração, que é responsável para diminuir a temperatura do telhado verde).

Para controlar os efeitos do escoamento superficial em grandes centros urbanos, nos quais grande parte do uso de terra está coberto por edificações, o uso de telhados verdes têm-se mostrado uma boa solução, além da melhoria na qualidade do ar, reduzindo efeitos da ilha de calor, acréscimo na estética e biodiversidade.

De maneira geral, a escolha das espécies depende diretamente do clima e região, e devem ser priorizadas espécies nativas, pela facilidade de adaptação. Além

disso, plantas de folhas de cores claras e com alta porcentagem de cobertura de solo são desejadas, pois essas têm um Albedo maior (ou seja, refletem mais radiação, beneficiando os painéis)

Em estudos conduzidos em área urbana da Malásia, Arenandan *et al.* (2022) demonstram que sistemas fotovoltaicos unidos ao telhado verde têm apresentado diminuição de temperatura sobre a superfície do ambiente e dos painéis fotovoltaicos, além do aumento da eficiência de geração de energia.

O mercado brasileiro de energia fotovoltaica está em ascensão, com previsão de crescimento de 42,4% em 2023, alcançando uma capacidade superior a 34 GW, impulsionado por políticas de incentivo e avanços tecnológicos. O Brasil já possui mais de 24 GW de capacidade instalada em energia solar fotovoltaica em 2022, esperando-se um acréscimo de 10 GW em 2023 (ABSOLAR, 2022). Este crescimento é atribuído à conscientização sobre a sustentabilidade, à disponibilidade abundante de radiação solar no país e à busca por fontes de energia limpa. A região Sudeste lidera o aumento da capacidade solar em 2022, representando 34% do total adicionado no Brasil.

A área de estudo foi definida como Itajubá (MG), utilizando da delimitação de um condomínio em etapa de venda de lotes, de aproximadamente 92 mil m<sup>2</sup>, com 190 lotes que ocupam 60% da área total do condomínio. O loteamento pode ser observado na Figura 2. Há rede de drenagem projetada no local, com 33 poços de visita e tubulações predominantemente de 400 mm.

Figura 2 - Loteamento estudado

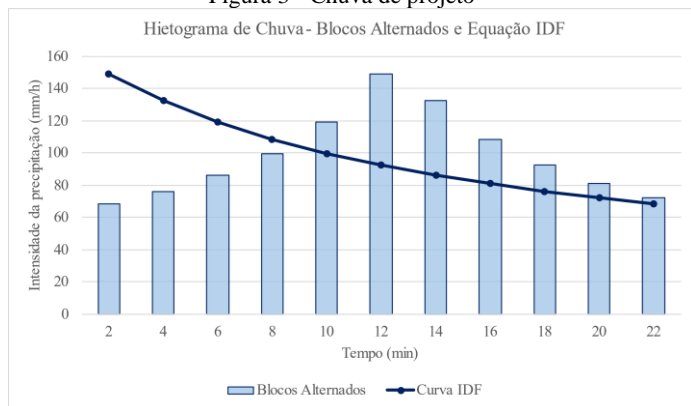


As áreas previstas para os imóveis neste loteamento variam entre 208 e 358 m<sup>2</sup>. Na área, predomina-se solos argilosos, mais especificamente o argilossolo vermelho-amarelo eutrófico. O uso e cobertura do solo em Itajubá é predominantemente de pastagem, representando 45% da área total do município, e o clima é, de acordo com a classificação climática de Köppen para Itajubá é classificado como Cwa – Clima subtropical de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente

(com temperaturas superiores a 22°C), com temperatura média anual de 20,5°C e pluviosidade média anual de 1897 mm.

Foi calculada a chuva de projeto pelo método dos blocos alternados, que pode ser observada na Figura 3. Foi definido um tempo de retorno de 2 anos e duração de 22 minutos.

Figura 3 - Chuva de projeto



Fonte: Autoria própria.

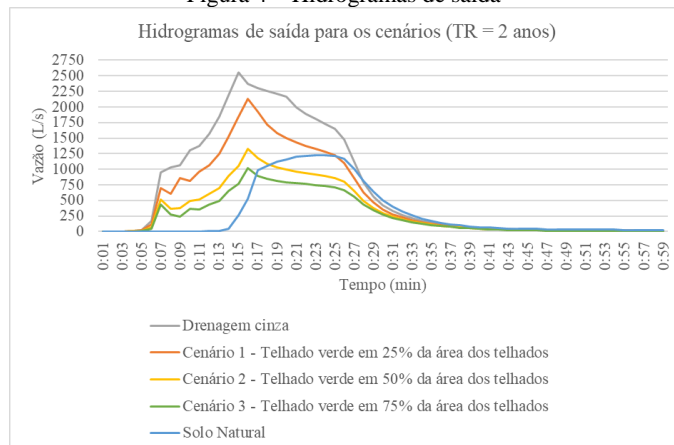
Foi utilizado o software Stormwater Management Model (SWMM) para a simulação de cenários relativos ao uso de telhados verdes em diferentes proporções no loteamento. Foi considerada a área do menor lote e gerado para todos os loteamentos situações aplicando cobertura de telhado verde em diferentes proporções, considerando os cenários:

- Cenário 0: apenas drenagem cinza prevista para o loteamento
- Cenário 1: 25% da cobertura do telhado com telhado verde
- Cenário 2: 50% da cobertura do telhado com telhado verde
- Cenário 3: 75% da cobertura do telhado com telhado verde

A Figura 4 apresenta os hidrogramas de saída para os cenários simulados no Software SWMM. Foi também gerada a condição de solo natural, utilizando os pontos de drenagem previstos para o loteamento e as condições de relevo e uso do solo sem as intervenções.

O telhado verde simulado apresenta as características do tipo extensivo, com substrato de 0,20 m e vegetação do tipo bromélia do gênero *Neoregelia*, típica de clima tropical e com alta resistência à exposição sol e grande potencial de retenção de água.

Figura 4 – Hidrogramas de saída



Fonte: Autoria própria, Excel (2020).

Como pode observado, as estruturas com telhado verde apresentam correlação positiva com a redução na vazão de pico, apresentando menores valores de vazão para maiores áreas de telhado verde no terreno. A Tabela 2 apresenta a redução percentual de cada um dos cenários em comparação com a vazão de saída da drenagem cinza.

Tabela 2 - Vazão de pico em cada cenário

Resultado	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
Vazão de Pico (L/s)	2125,77	1323,27	1015,38
Redução (%)	-17%	-48%	-60%

Fonte: Autoria própria.

No software PVsyst, foi considerado o histórico de consumo de uma residência no município de Itajubá, estabelecendo um consumo médio de energia de, em média 4,93 kWh/dia. Foram também inseridos no software os valores mensais de consumo. A posição definida para os módulos foi de 25°, com um inversor de 3 kW. A Tabela 3 apresenta as características do sistema fotovoltaico escolhido.

Tabela 3 - Características do sistema fotovoltaico

Módulo Fotovoltaico		
Pmód	285,0	Wp
Área do módulo	1,7	m²
Número de módulos	12,0	
Pnom	3,4	kWp
Área total	20,2	m²
Inversor		
Pnom	3,0	kWca
Tensão	50 - 500	V
Área	0,2	m²
Peso	14,7	kg
Eficiência média	97,0	%

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 4 apresenta os principais resultados de geração anual obtidos pelo PVsyst, nas condições supracitadas.

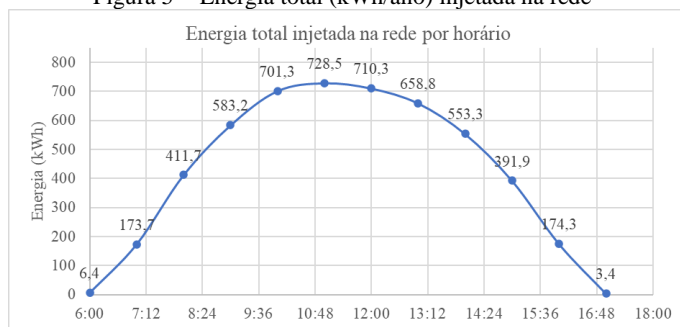
Tabela 4 - Energia produzida pelos módulos

Fatores energéticos		
Energia produzida	5873	kWh/ano
Energia utilizada	1776	kWh/ano
Produção específica	1717	kWh/kWp/ano
Performance	81,8	%
Perdas térmicas	29	W/m <sup>2</sup> K

Fonte: Autoria própria.

Como resultado da simulação, também foi possível estimar a quantidade de energia total que pode ser injetada na rede, com a utilização desse sistema em apenas uma residência, resultado que pode ser observado na Figura 5. Assim, além do consumo próprio é garantido também a inserção no sistema de excedentes, principalmente entre os horários de 9h e 16h.

Figura 5 - Energia total (kWh/ano) injetada na rede



Fonte: Autoria própria.

Portanto, com a utilização de 20,2 m<sup>2</sup> da superfície do telhado, nas condições supracitadas, é previsto geração solar passível de atender ao consumo residencial e contribuição na diversificação da matriz energética. Além disso, a área ocupada pelos módulos é aproximadamente 6% da área do menor dos lotes na área de estudo.

## Conclusões

Neste estudo, foram alcançados objetivos significativos na simulação de telhados verdes fotovoltaicos, com resultados promissores, incluindo uma eficaz mitigação do escoamento e uma geração distribuída satisfatória.

Embora tenham sido obtidas informações valiosas, há espaço para avanços, como simulações mais detalhadas, considerando o projeto residencial completo e a interação da vegetação com os módulos fotovoltaicos, bem como a integração de sistemas de irrigação.

Além disso, análises de viabilidade econômica e financeira, diretrizes de manutenção e estratégias de melhoria contínua são cruciais para otimizar a eficiência e a sustentabilidade dos telhados verdes fotovoltaicos. Em resumo, este estudo destaca o considerável potencial

de investimento em energia fotovoltaica no Brasil e a importância contínua da pesquisa nessa área para promover práticas energéticas mais limpas e sustentáveis.

## Agradecimentos

Agradecemos ao CNPQ/PVDI148-2021 Telhados verdes nos trópicos, permitindo que o estudo em tecnologias para qualidade de vida, além do conhecimento adquirido em drenagem urbana e geração fotovoltaica.

## Referências

- ABDALAZEEM, M. E. et al. Review on integrated photovoltaic-green roof solutions on urban and energy-efficient buildings in hot climate. **Sustainable Cities and Society**, 14 Julho 2022.
- ABSOLAR. Notícias. **Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica**, 07 Dezembro 2022. Disponível em: <<https://www.absolar.org.br/noticia/capacidade-de-energia-solar-no-brasil-deve-crescer-42-em-2023-a-34-gw-preve-absolar/#:~:text=Capacidade%20de%20energia%20solar%20no,a%2034%20GW%2C%20prev%C3%AA%20Absolar&text=estimada%20para%20o%20fechamento%20de,setoria>>.
- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, 22, n. 6, 2013. 711-728.
- ARENANDAN, V. et al. Efficiency enhancement in energy production of photovoltaic modules through green roof installation under tropical climates. **Ain Shams Engineering Journal**, Kajang (Malasya), 13, n. 5, Setembro 2022. 101741-101751.
- FERNANDEZ-CAÑERO, R. et al. Green roof systems: a study of public attitudes and preferences in southern Spain. **Journal Of Environmental Management**, 128, Outubro 2013. 106-115.
- PIROUZ, B.; PALERMO, S. A.; TURCO, M. Improving the Efficiency of Green Roofs Using Atmospheric Water Harvesting Systems (An Innovative Design). **Water**, 13, n. 4, 20 Fevereiro 2021.
- SHAFIQUE, M.; LUO, X.; ZUO, J. Photovoltaic-green roofs: A review of benefits, limitations, and trends. **Solar Energy**, 15 Maio 2020. 485-497.