

AVALIAÇÃO DE PAVIMENTOS INTELIGENTES: PAVIMENTOS QUE GERAM ENERGIA LIMPA

SMART PAVEMENTS EVALUATION: PAVEMENTS THAT GENERATE GREEN ENERGY

Danielle Denes dos Santos¹
Jeferson Cantelle Trevisan²
Raquel Pereira Batista³

RESUMO

A crescente demanda por soluções sustentáveis e a busca por alternativas que unem infraestrutura urbana e geração de energia têm impulsionado o desenvolvimento de pavimentos inteligentes. Entre os modelos de pavimentos inteligentes mais utilizados, destacam-se os pavimentos piezoelétricos, que geram energia elétrica quando submetidos a pressão ou vibração, os pavimentos fotovoltaicos, equipados com células solares que convertem energia solar diretamente em eletricidade, e os pavimentos termoelétricos, que se utilizam da diferença de temperatura entre a superfície da via e o subsolo para gerar eletricidade, sendo útil em locais com grandes variações de temperatura ao longo do dia. Esses sistemas surgem como uma alternativa inovadora para cidades que buscam por uma descarbonização de sua matriz energética. Curitiba, que já possui histórico de iniciativas em mobilidade urbana e sustentabilidade, tem grande potencial para aplicação desses sistemas inovadores, que representam uma nova oportunidade de geração de energia limpa e renovável em áreas urbanas. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo avaliar qual o modelo de pavimento inteligente mais vantajoso para geração de energia em Curitiba, identificando também as áreas do município que são mais adequadas para implantação desse sistema. Para responder a essa pergunta, este trabalho apresenta uma revisão bibliográfica, bem como um estudo comparativo de casos, em que foi realizado um diagnóstico dos diversos modelos de pavimentos inteligentes utilizados no mundo, de forma a identificar a solução mais compatível com os aspectos urbanos da cidade de Curitiba. A revisão da literatura indica que, por utilizarem uma tecnologia já consolidada no mercado, os pavimentos fotovoltaicos apresentaram maior potencial de geração de energia. No entanto, existem outras tecnologias disponíveis que, quando aplicadas nos locais adequados, podem trazer um impacto positivo mais amplo para a sociedade. Nesse sentido, este estudo identifica os pavimentos piezoelétricos, eletromecânicos e hidráulicos como sistemas com potencial de implantação em Curitiba, tendo em vista que além dos benefícios energéticos esperados, a decisão sobre qual tecnologia adotar deve considerar também as condições específicas da cidade e suas características urbanas.

Palavras-chave: energia limpa; sustentabilidade; pavimento inteligente.

¹ Doutora em Administração pela Universidade Positivo com doutorado sanduíche pela TU DELFT (Faculty of Technology, Policy and Management) na Holanda. Estágio pós doutoral em Políticas para Tecnologia no Technion (Israel Institute of Technology) em Israel. Mestre em Administração pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). É professora da escola de negócios da PUCPR (Pontifícia Universidade Católica do Paraná). Professora da Escola de Administração Pública do IMAP.

² Engenheiro civil (Unioeste/2018), especialista em Estruturas de Concreto e Fundações (Unipar/2020), engenheiro civil na Secretaria Municipal de Obras Públicas da Prefeitura Municipal de Curitiba.

³ Engenheira de Produção Civil (Cefet-MG/2016) e engenheira de Segurança do Trabalho (Ucam/2023), especialista em Engenharia de Produção e Gerenciamento de Projetos (Funip/2019), mestre em Engenharia Civil (Cefet-MG/2018), engenheira civil na Secretaria Municipal de Política Urbana da Prefeitura de Belo Horizonte.

ABSTRACT

The increasing demand for sustainable solutions and the search for alternatives that combine urban infrastructure and energy generation have driven the development of smart pavements. Among the most widely adopted smart pavement models are piezoelectric pavements, which generate electrical energy when subjected to pressure or vibration; photovoltaic pavements, equipped with solar cells that convert solar energy directly into electricity; and thermoelectric pavements, which use the temperature difference between the road surface and the subsoil to generate electricity, proving to be especially useful in areas with large temperature variations throughout the day. These systems emerge as an innovative alternative for cities seeking to decarbonize their energy matrix. Curitiba, which already has a history of initiatives in urban mobility and sustainability, has great potential for the application of these innovative systems, which represent a new opportunity for generating clean and renewable energy in urban areas. In this context, this study aims to evaluate which smart pavement model is most advantageous for generating energy in Curitiba, also identifying which areas of the city are most suitable for implementing this system. To answer this question, this paper presents a literature review, as well as a comparative case study, providing an assessment of various smart pavement models used worldwide, in order to identify the solutions that are most compatible with the urban aspects of the city of Curitiba. The literature review indicates that, because they use a technology already consolidated in the market, photovoltaic pavements have shown greater potential for energy generation. However, there are other technologies available that, when applied in the appropriate places, can have a broader positive impact on society. In this sense, this study identifies piezoelectric, electromechanical and hydraulic pavements as systems with potential for implementation in Curitiba, considering that in addition to the expected energy benefits, the decision on which technology to adopt must also consider the specific conditions of the city and its urban characteristics.

Keywords: green energy; sustainability; smart pavement.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, cerca de metade da população mundial vive em áreas urbanas e a Organização das Nações Unidas estima que esse número chegue a cerca de 70% até 2050. Nesse cenário, o futuro das cidades deve ser pensado sob a ótica do desenvolvimento urbano sustentável. De acordo com o Relatório Mundial das Cidades disponibilizado em 2024 pelo Programa das Nações Unidas para Assentamentos Humanos (UN-Habitat), os centros urbanos são as principais áreas emissoras de gases do efeito estufa, mas devem ser vistos também como parte da solução para se enfrentar o desafio da crise climática global, por meio de ações de resiliência urbana e de mitigação direta (UN-HABITAT, 2024).

O planejamento urbano deve promover a sustentabilidade por meio de estratégias como o uso de tecnologias inovadoras, fontes de energia renováveis, meios de transporte integrados, soluções construtivas eficientes e infraestrutura resiliente. Dessa forma, a infraestrutura urbana deve ser pensada não apenas para resistir às mudanças climáticas, mas também para reduzir as vulnerabilidades sociais e ambientais presentes nas cidades (UN-HABITAT, 2024).

No âmbito da engenharia civil aplicada ao espaço público urbano, a adoção de pavimentos sustentáveis tem ganhado espaço como uma solução ecológica. Entre os principais tipos de asfaltos sustentáveis, pode-se citar os asfaltos reciclados (RAP), em que o pavimento deteriorado é reaproveitado na recomposição da camada de rolagem; os asfaltos mornos, compactados a baixas temperaturas; os asfaltos borracha, produzidos com a incorporação da borracha proveniente de pneus reciclados; os pavimentos fotocatalíticos, que possuem dióxido de titânio (TiO₂) em sua composição e, por isso, são capazes de absorver gases poluentes da atmosfera; os asfaltos permeáveis, que funcionam como um sistema de drenagem, captando a água da chuva e destinando-a às galerias de águas pluviais, contribuindo para o aumento da aderência dos pneus dos automóveis, evitando aquaplanagem; e os pavimentos que geram energia, tais como os pavimentos piezoelétricos, fotovoltaicos e termoelétricos (BBC, 2013; Kennepohl, 2008).

Os pavimentos capazes de gerar energia se mostram particularmente interessantes no contexto de diversificação da matriz energética e adoção de fontes de energia renováveis, uma vez que podem ser encarados como alternativas sustentáveis para geração de energia, sem dependência direta do sistema natural. Os pavimentos piezoelétricos, por exemplo, permitem a geração de energia elétrica a partir da conversão da energia mecânica gerada pelo tráfego dos veículos sobre o pavimento, enquanto os pavimentos fotovoltaicos convertem a energia solar em energia elétrica (Mota; Barroso, 2021).

É importante lembrar que a matriz energética elétrica é hoje indispensável ao funcionamento dos diversos equipamentos utilizados diariamente no espaço urbano, porém é extremamente dependente da natureza, independentemente da forma de conversão utilizada. No Brasil, em que a principal fonte de energia provém das hidrelétricas, os efeitos dessa dependência foram sentidos nos apagões de 2001 e 2018, e desde então a busca por fontes alternativas de energia tem sido impulsionada no país. Assim, a microgeração de energia vem ganhando força ao se propor a aproveitar o potencial energético de variáveis presentes no ambiente e que antes eram desperdiçadas, tais como vibrações, gradientes de temperatura e radiações eletromagnéticas e fotônicas (ANTT, 2018).

Nesse contexto, este trabalho se propõe a analisar os tipos de pavimento que geram energia descritos na literatura, com o objetivo de identificar a tecnologia mais adequada para implantação na cidade de Curitiba.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esta pesquisa utilizou abordagem qualitativa e descritiva, com análise interpretativa conforme descrito por Strauss e Corbin (2008). Nesse sentido, foram empregados métodos exploratórios para entender os modelos de pavimento inteligentes existentes na atualidade e determinar a solução mais indicada para a realidade de Curitiba. A metodologia adotada foi composta por pesquisa bibliográfica, conforme recomendado por Cresswell (2007), com levantamento de literatura sobre pavimentos inteligentes. Além disso, foram analisados casos específicos de aplicação dessa tecnologia em todo o mundo, com foco nas condições de implantação, resultados obtidos, desafios e boas práticas.

Por fim, foi realizada uma análise comparativa entre os casos disponíveis na literatura e as condições de implantação e demandas do município de Curitiba, de forma a identificar padrões e divergências que permitam estabelecer qual a melhor tecnologia para atender à realidade de Curitiba.

3 SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA EM PAVIMENTOS

O tráfego de veículos é uma das principais fontes geradoras de poluição atmosférica nos centros urbanos, mas pode representar também uma alternativa para geração de energia renovável, reduzindo assim o impacto da circulação de veículos nesses ambientes. Isso porque a superfície das vias está constantemente exposta a carregamentos de veículos e à radiação solar, que geram vibrações mecânicas e gradientes de temperatura no pavimento, formas de energia que são geralmente desperdiçadas, mas podem ser convertidas em energia elétrica para diferentes aplicações (Wang et al., 2018).

Para isso, os sistemas de geração de energia podem ser instalados no próprio pavimento, utilizando desde fontes solares ou eólicas até a pressão exercida pelos pneus dos

veículos na superfície para a geração de energia elétrica ou térmica. Dessa forma, o pavimento deixa de ter uma função meramente estrutural, assumindo também um caráter sustentável, em que a energia gerada pode ser utilizada na própria infraestrutura da via, em sistemas de iluminação e de gestão do tráfego por semáforos, ou até mesmo injetada na rede de distribuição de energia das cidades. Os pavimentos geradores de energia podem ser divididos em dois grandes grupos, de acordo com a fonte que utilizam para a geração de energia elétrica: a energia cinética do tráfego dos veículos ou a incidência de luz solar na via (Santos, 2014).

3.1 PROJETO DE INOVAÇÃO

Os pavimentos podem converter a energia mecânica dissipada no tráfego dos veículos em energia elétrica por meio de sistemas piezoelétricos, eletromecânicos ou hidráulicos (Santos, 2014).

3.1.1 Pavimentos piezoelétricos

Os pavimentos piezoelétricos são uma solução inovadora para a captação de energia mecânica dissipada pelo tráfego, convertendo-a em eletricidade por meio do efeito piezoelétrico. Esse efeito ocorre quando certos materiais, como o quartzo e algumas cerâmicas, geram uma diferença de potencial elétrico quando submetidos a deformações mecânicas. Dessa forma, ao instalar sensores piezoelétricos na estrutura do pavimento, é possível converter a pressão exercida nos módulos piezoelétricos em energia elétrica. Esse sistema pode ser utilizado não apenas em pavimentos rodoviários, mas também em ferrovias e em locais destinados ao tráfego de pessoas (Santos, 2014). Em função de sua elevada eficiência na conversão de energia, o interesse por essa tecnologia cresceu nos últimos anos (Wang et al., 2018).

O funcionamento do sistema piezoelétrico depende de diversos fatores, como a carga aplicada, a rigidez do pavimento e o tipo de sensor utilizado. Os sensores piezoelétricos são geralmente posicionados entre as camadas do pavimento, sendo ativados pela deformação causada pelo contato com os pneus dos veículos. O nível de energia gerado está diretamente relacionado à magnitude da pressão exercida no pavimento, à frequência das cargas e à eficiência da conversão eletromecânica do material. Para otimizar a captação de energia, é fundamental que o módulo piezoelétrico esteja adequadamente calibrado em termos de espessura e disposição dentro da estrutura do pavimento (Santos, 2014).

Como exemplo de aplicação do pavimento piezoelétrico pelo mundo, pode-se citar a empresa britânica Pavegen, que desenvolveu um piso capaz de transformar os passos das pessoas em energia elétrica. A placa piezoelétrica da Pavegen já foi aplicada em mais de 270 projetos ao redor do mundo, inclusive no Brasil. Os módulos possuem formato triangular, resultado da otimização realizada ao longo de anos de pesquisas, e cada pisada gera entre 3 e 5 joules de energia, valor suficiente para alimentar uma lâmpada por alguns segundos (Inglis, 2024).

No Brasil, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) fomentou a implantação de um sistema piezoelétrico em uma praça de pedágio em Gravataí, no Rio Grande do Sul, administrada pela concessionária Concepa (Conselho de Consumidores de Energia Elétrica do Pará). O estudo concluiu que os sistemas piezoelétricos apresentam potencial de geração de energia elétrica satisfatório, no entanto a implantação dessa tecnologia ainda apresenta alto custo, que inviabiliza sua aplicação. Porém, os pesquisadores ressaltam que

avanços nos estudos sobre essa tecnologia podem melhorar seu custo-benefício, a exemplo de outras tecnologias renováveis já desenvolvidas, como é o caso da energia fotovoltaica (ANTT, 2018).

Os estudos indicam que o tempo de retorno do investimento de sistemas piezoelétricos varia bastante conforme sua aplicação. De acordo com Silva (2014), os fabricantes de placas piezoelétricas para rodovias apresentam tempo de retorno estimado em dois anos, enquanto simulações realizadas por Mota e Barroso (2021) na Universidade Federal do Ceará apontaram retorno financeiro após 25 anos. Já no caso de um projeto de instalação de placas piezoelétricas nos acessos e saídas das escadas rolantes de uma estação de metrô em São Paulo, Oliveira e Lapenna Júnior (2023) estimaram um tempo de retorno de sete anos.

Quanto às condições para instalação do sistema piezoelétrico, Mota e Barroso (2021) concluíram que vias com alto volume de tráfego em alta velocidade, tais como vias expressas e rodovias interestaduais, são as opções ideais, uma vez que a principal variável para geração de energia nesse caso é o fluxo usual sobre a estrutura. Já Santos (2014) indica também como um dos principais fatores que influenciam na captação e dissipação de energia, além da velocidade de circulação e do peso dos veículos, o deslocamento vertical sofrido pela superfície do pavimento e o comprimento da superfície. No entanto, é importante considerar que a eficiência do sistema também depende de outros fatores, como a constante aplicação de carga e a durabilidade do material piezoelétrico (Wang et al., 2018).

Uma das grandes vantagens dos pavimentos piezoelétricos é sua independência de fatores ambientais, diferentemente das tecnologias solares e eólicas, além da possibilidade de aplicação em locais cobertos. Além disso, esse sistema aproveita energia que geralmente é desperdiçada. Porém, entre os desafios técnicos à implantação dessa tecnologia, destaca-se a necessidade de grande quantidade de sensores para que a energia produzida seja significativa, além da complexidade na manutenção da infraestrutura (Santos, 2014).

3.1.2 Pavimentos eletromecânicos

Os pavimentos eletromecânicos convertem a energia mecânica gerada pelo movimento de veículos e de pessoas em um movimento rotacional, por meio de um sistema mecânico que ativa um gerador. A quantidade de energia elétrica gerada depende da carga aplicada, da velocidade do veículo, do deslocamento vertical e da forma da superfície de aplicação da carga (Santos, 2014).

Os estudos de Duarte e Casimiro (2011) apontam que quanto maior for a carga aplicada sobre o pavimento eletromecânico, mais rapidamente o gerador é acionado e, portanto, maior será a quantidade de energia elétrica gerada. Com base nesses fatores, os locais mais adequados para sua instalação são regiões com velocidades reduzidas, tais como lombadas, faixas de pedestre, cruzamentos, estacionamentos e pontos de ônibus. Na mesma linha, Santos (2014) afirma que à medida que a velocidade aumenta, a energia captada pelos pavimentos eletromecânicos diminui acentuadamente, sendo otimizada para a circulação em torno de 10 km/h e não indicada para velocidades acima de 50 km/h.

Os estudos de Cravo (2014) indicam que o aumento na geração de energia é significativo para deslocamentos verticais de até 15 mm, nível em que ainda se mantém a segurança e o conforto na condução dos veículos. Da mesma forma, quanto maior a carga aplicada sobre os módulos, maior a quantidade de energia gerada. Já a velocidade de circulação dos veículos que otimiza a geração de energia, para esse autor, fica entre 30 km/h e 50 km/h.

Assim como os pavimentos piezoelétricos, os pavimentos eletromecânicos independem de fatores ambientais para a geração de energia e aproveitam uma fonte que geralmente é desperdiçada. Além disso, possuem baixo custo de manutenção e podem produzir quantidades consideráveis de energia elétrica. No entanto, possuem instalação mais complexa do que a dos pavimentos piezoelétricos (Santos, 2014).

3.1.3 Pavimentos hidráulicos

Os pavimentos hidráulicos se utilizam de um sistema de pistões hidráulicos para converter a pressão gerada pelos veículos em energia elétrica. Esse sistema é implantado na superfície do pavimento e pode funcionar como um redutor de velocidade em áreas escolares, cruzamentos e estacionamentos (Santos, 2014).

A empresa americana Kinergy Power desenvolveu um sistema de geração de energia elétrica por meio do aproveitamento do peso dos veículos e de sua velocidade de circulação. Os módulos desse sistema ocupam quase toda a largura da via e podem ser instalados em série, de acordo com o comprimento do pavimento onde se pretende captar a energia. O sistema tem uma superfície plana composta por vários módulos independentes, de forma a acompanhar o deslocamento vertical dos pistões hidráulicos (Cravo, 2014).

Com aplicação semelhante à do pavimento eletromecânico, os pavimentos hidráulicos possuem as mesmas vantagens e desvantagens desse sistema (Santos, 2014).

3.2 MECANISMOS DE CONVERSÃO DE ENERGIA SOLAR

Outra classe de pavimentos que geram energia se utiliza da luz solar para produzir energia elétrica ou térmica, por meio de sistemas fotovoltaicos, coletores solares ou geradores termoelétricos (SANTOS, 2014).

3.2.1 Pavimentos fotovoltaicos

Também conhecidos como estradas solares, os pavimentos fotovoltaicos são compostos por painéis solares estruturalmente projetados para serem interconectados e suportarem a carga dos veículos, gerando energia a partir da radiação solar incidente sobre o pavimento. Os painéis são instalados diretamente no pavimento, substituindo as primeiras camadas de revestimento convencional. Podem ainda contar com a incorporação de LEDs que substituem a pintura de sinalização horizontal da via. Estima-se que a geração de energia nesse sistema seja suficiente para abastecer 500 residências a cada 1,5 km de via, de forma que seria possível prever estações para recarregar a bateria de carros elétricos ao longo das estradas solares (Santos, 2014).

O emprego de painéis fotovoltaicos para geração de energia a partir da incidência de luz solar é uma tecnologia amplamente difundida. Seu emprego em pavimentos visa otimizar o sistema, suprimindo a demanda por espaço geográfico para a implantação dos painéis coletores (ANTT, 2018). A utilização dos painéis no pavimento demonstra ainda um efeito positivo na redução das ilhas de calor urbanas (Wang et al., 2018).

Entre os projetos de pavimentos fotovoltaicos já implementados ao redor do mundo, destaca-se o que foi executado em Tourouvre, na França, pela empresa Wattway, que englobou a construção de uma estrada de 1.000 metros de extensão e 3.000 metros quadrados de painéis solares. O sistema previa a geração de 767 quilowatts-hora (kWh) por dia, o que seria suficiente para alimentar toda a iluminação pública da cidade. No entanto, sete anos após a sua construção, procedeu-se a demolição da estrada, encerrando um projeto marcado por problemas técnicos e geração de energia insatisfatória (Mayer, 2024).

Outro exemplo de aplicação de pavimento fotovoltaico é o projeto SolaRoad, uma parceria público-privada da Organização Holandesa de Pesquisa Científica Aplicada (TNO) com a empresa de tecnologia Imtech. Trata-se da construção de uma ciclovia em módulos de concreto, cada um medindo 2,5 x 3,5 m, contendo em sua parte superior células solares protegidas por vidro temperado de aproximadamente 1 cm de espessura. Embora tenha apresentado captação acima do esperado nos primeiros anos, cerca de 70 kWh por ano a cada metro quadrado de ciclovia solar, a estrutura foi removida seis anos após sua inauguração, após danos extensivos terem afetado o pavimento (Almeida, 2017). Essa experiência demonstrou que os painéis planos aplicados na ciclovia geram apenas um terço da energia produzida pelos painéis aplicados em telhados, em função de sua angulação (Wang et al., 2018).

A empresa espanhola Onyx Solar desenvolve soluções fotovoltaicas destinadas a serem integradas nos espaços urbanos, sendo um de seus produtos o piso solar caminhável. Suportando até 400 kg por metro quadrado, cada peça pesa 23 kg, mede 75 x 75 cm e tem capacidade nominal de 75 W. Sendo adequado para calçadas, pátios e decks, o produto da Onyx Solar já é amplamente difundido no mercado e aplicado em diversas localidades ao redor do mundo, especialmente em cidades como Nova York, que possui leis locais que impulsionam o uso deste tipo de produto (Thompson, 2024).

A aplicação de painéis fotovoltaicos no pavimento tem como barreira a dificuldade de se manter a durabilidade do material, tendo em vista que ele é aplicado na camada de desgaste do pavimento, constantemente sujeita aos carregamentos do tráfego de veículos e às condições climáticas. Para que essa tecnologia se torne viável, é necessário desenvolver painéis compatíveis com as características esperadas para a superfície das vias (Wang et al., 2018).

Além disso, esse sistema tem como ponto negativo a dependência da incidência solar, de forma que condições climáticas adversas podem impactar a geração de energia. Essa tecnologia só se torna viável para aplicação em larga escala e necessita de manutenção constante (Santos, 2014).

3.2.2 Pavimentos coletores solares

Os pavimentos coletores solares consistem em um sistema em que a energia solar absorvida pelo pavimento asfáltico, geralmente de coloração escura, é convertida em energia térmica, que pode ser armazenada e transportada por meio de um sistema de tubos e bombas instalados no pavimento, permitindo o controle da temperatura da via. Esse é um dos tipos mais antigos de pavimento gerador de energia, tendo surgido na década de 1970 e sendo amplamente utilizado em países como Estados Unidos da América, Alemanha, Suíça e Japão, com o objetivo principal de impedir a formação de gelo no pavimento e de derreter a neve (Santos, 2014).

Uma das aplicações pioneiras dessa tecnologia ocorreu em uma rodovia na Suíça, com o sistema de derretimento de neve denominado SERSO, que entrou em operação em 1994 e provou a viabilidade de se armazenar a energia solar em sistemas subterrâneos de armazenamento de energia térmica (Wang et al., 2018).

Além de se aplicarem apenas a locais com condições climáticas extremas, sujeitos a ciclos de gelo/degelo dos pavimentos, os sistemas coletores solares não são capazes de converter a energia solar/térmica em energia elétrica, limitando-se a realizar o controle da temperatura do pavimento, podendo ser empregados também na redução de temperatura do pavimento, o que colabora com a diminuição das deformações permanentes na camada de

rolamento, assim como na mitigação dos efeitos da ilha de calor urbana. No entanto, esses sistemas são de difícil instalação, pois é necessário danificar o pavimento para a colocação dos tubos, o que torna seu custo de implantação elevado, além de limitar as técnicas de manutenção do pavimento e de haver o risco de vazamento do líquido presente no sistema de tubos (ANTT, 2018; Santos, 2014; Wang et al., 2018).

Ademais, os sistemas coletores solares têm foco na eficiência térmica e não na possibilidade de produção de eletricidade, de forma que poucos estudos exploram esse potencial, que necessitaria da incorporação de um gerador termoelétrico ou de uma turbina solar no sistema (ANTT, 2018).

3.2.3 Pavimentos termoelétricos

Os pavimentos termoelétricos se utilizam do gradiente térmico existente entre o leito do pavimento e sua superfície para gerar energia elétrica, empregando para isso módulos termoelétricos compostos por materiais semicondutores colocados entre substratos cerâmicos isolados (Santos, 2014). A capacidade de conversão direta de energia térmica em energia elétrica torna essa tecnologia uma das mais promissoras no ramo. Porém, sua principal desvantagem é a baixa eficiência, devido à perda de calor no sistema. Para reduzir a perda de energia causada pela condução e dissipação de calor, é necessário que sejam empregados materiais com baixa condutividade térmica e baixa resistividade elétrica (Wang et al., 2018).

De acordo com os estudos de Shaopeng et al. (2011), quanto maior o gradiente de temperatura entre o leito e a superfície do pavimento, maior será a eficiência do sistema. No entanto, os estudos mostraram que a eficiência do sistema é reduzida, tornando necessária a instalação de vários geradores termoelétricos. Assim, embora essa tecnologia seja teoricamente viável, é necessário que estudos futuros se concentrem na melhoria da eficiência do sistema por meio de um projeto estrutural aprimorado e de melhorias nas propriedades dos materiais utilizados (Wang et al., 2018).

3.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Voigt et al. (2003) compararam diferentes sistemas de geração de energia em pavimentos e concluíram que o mais eficiente é o sistema fotovoltaico. No entanto, esse sistema é extremamente dependente das condições climáticas e, em tempo nublado, sua eficácia decresce abruptamente. Já os pavimentos eletromecânicos e piezoelétricos, de acordo com esse estudo, apresentam desempenho similar.

Wang et al. (2018) também realizaram um estudo comparativo entre os diferentes sistemas de pavimentos que geram energia, classificando-os em função de sua capacidade de produzir energia, custo de implementação, relação custo-benefício e nível de maturidade da tecnologia. Para comparar os diferentes sistemas em termos de custos e de produção de energia, adotou-se como padrão o trecho correspondente a uma milha (1,609 km) de cada pavimento, na largura de uma faixa de rolagem. Os resultados encontrados por Wang et al. (2018) são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1: Comparação entre os diferentes pavimentos que geram energia

Tecnologia	Energia Produzida (kWh/faixa-milha)	Custo (dólares/faixa-milha)	Custo relativo (\$/kWh)	Nível de maturidade do sistema
Piezoelétrica	188	7,5 milhões	106,387	4
Fotovoltaica	1781 x 10 ³	4,4 milhões	0,45	9
Coletor Solar	588,634 (para degelo)	9,812 milhões	4,21	4
Termo elétrica	0,748	12,781 milhões	95,74	3

Fonte: Adaptado de Wang et al. (2018).

O nível de maturidade do sistema foi avaliado em uma escala que varia de 1 a 9, sendo 1 o nível mais baixo de maturação tecnológica, indicando a existência de pesquisas científicas básicas, com observações e relatórios, enquanto o nível 9 indica a implementação da nova tecnologia em um sistema existente. Os coletores solares, sistemas termoeletrônicos e piezoelétricos variam entre 3 e 4, o que significa que pesquisas estão em desenvolvimento e componentes tecnológicos básicos estão sendo montados para estabelecer o sistema. O único tipo de pavimento com nota máxima foi o sistema fotovoltaico, uma vez que essa tecnologia já é consolidada no mercado para outras aplicações (Wang et al., 2018).

Para analisar os resultados evidenciados no Quadro 1, é importante realizar algumas considerações: embora o sistema fotovoltaico apresente elevada capacidade energética, a produção de energia só é maximizada sob radiação solar direta, o que restringe o período de produção de energia ao longo do dia e, ainda, pode ser prejudicada por condições climáticas adversas. Assim, considerando esses aspectos, os sistemas piezoelétricos podem ser considerados mais eficientes (Wang et al., 2018).

O Quadro 2 compara as vantagens e desvantagens de cada um dos sistemas estudados.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens de cada tipo de pavimento que gera energia

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Piezoelétrica	Pode ser empregado tanto para geração de energia quanto para sensores de contagem de tráfego de veículos, pedestres ou ciclistas; não depende das condições climáticas; aproveita a energia mecânica normalmente desperdiçada; é de fácil instalação.	Baixa produção de energia para cada módulo individualmente; elevado custo para o conjunto de transdutores necessários a uma elevada geração de energia; baixa área de influência; baixa resistência a cargas elevadas; produção de energia depende do tráfego de veículos, pedestres ou ciclistas e de sua massa; manutenção complexa.
Eletromecânica	Não depende das condições climáticas; aproveita a energia mecânica normalmente desperdiçada; permite a monitorização do tráfego de veículos, pedestres e ciclistas; elevada produção de energia; elevada resistência a grandes carregamentos; baixo custo de manutenção.	Difícil instalação; limitações para implementação (zonas de desaceleração / baixas velocidades); produção de energia depende do tráfego de veículos, pedestres ou ciclistas e de sua massa.

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Hidráulica	Não depende das condições climáticas; aproveita a energia mecânica normalmente desperdiçada; permite a monitorização do tráfego de veículos, pedestres e ciclistas; elevada produção de energia; elevada resistência a grandes carregamentos; baixo custo de manutenção.	Difícil instalação; limitações para implementação (zonas de desaceleração / baixas velocidades); produção de energia depende do tráfego de veículos, pedestres ou ciclistas e de sua massa.
Fotovoltaica	Elevada produção de energia; mitigação de efeitos de ilhas de calor urbanas; pode ser empregado em larga escala; permite a monitorização do tráfego de veículos, pedestres e ciclistas; podem incorporar LEDs, substituindo a sinalização horizontal das vias; possibilita a recarga de carros elétricos.	Necessita de manutenções frequentes, com custo elevado; fragilidade ao carregamento do tráfego; pouca resistência à derrapagem; elevada dependência do clima; eficiência depende das condições de limpeza e manutenção das placas; o movimento dos veículos sobre as placas provoca períodos sem radiação solar.
Coletor Solar	Elevado rendimento energético; aproveita a energia solar; reduz a temperatura do pavimento; promove o descongelamento do pavimento; aumenta o ciclo de vida do pavimento; promove condições de segurança na via; já existe uma vasta quantidade de sistemas implantados em diversos países.	Elevado custo de implementação; difícil instalação; elevada dependência do clima; não produz energia elétrica diretamente, sendo necessário para isso a incorporação de gerador termoeletrico ou de turbina solar no sistema.
Termoeletrica	Ampla aplicabilidade; facilmente combinável com outras tecnologias; produz energia suficiente para o funcionamento do sistema.	Baixa eficiência; elevado custo por unidade; faltam estudos sobre essa tecnologia.

Fonte: Adaptado de Cravo (2014), Santos (2014) e Wang et al. (2018).

4 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA VIÁRIO DE CURITIBA

O município de Curitiba, capital do estado do Paraná, tem 435.277 km² de área, com extensão norte-sul de 35 km e leste-oeste de 20 km, com população estimada de 1.829.225 habitantes. A temperatura média no verão é de 21°C e no inverno de 13°C (Curitiba, 2025). A capital paranaense fica a uma altitude de 945 metros e sua distância dos trópicos torna a incidência de raios solares menor no inverno, uma vez que a inclinação da Terra deixa a região sul mais distante do sol durante esse período (Viaje Paraná, 2024).

A frota de veículos do município é composta por 1.824.825 veículos, dos quais 1.163.277 são automóveis, 219.033 motocicletas, 44.183 caminhões, 4.308 micro-ônibus e 7.791 ônibus (IBGE, 2025). De acordo com dados do governo do Paraná, a cidade de Curitiba conta com uma malha viária urbana com extensão total de 5.169 km, dos quais 60,98% são vias asfaltadas, 27,68% são vias em anti-pó, 0,75% são de pavimento rígido (concreto) e o restante em lajota sextavada, paralelepípedo, pedra irregular, Petit Pavet ou leito natural. Dessas vias, 4.052 km são compostos por vias locais, 574 km por vias coletoras, 258 km por vias setoriais, 82 km por vias centrais, 47 km por vias prioritárias e o restante por outras vias (Paraná Interativo, 2025). O sistema viário do município se baseia em vias estruturais que tangenciam o centro e contam com cinco grandes eixos: norte-sul, ligando o bairro Santa Cândida ao Pinheirinho, leste-oeste, ligando o Capão da Imbuia ao Cajuru, e boqueirão, ligando o bairro de

mesmo nome ao Centro. As vias estruturais contam com um sistema trinário, formado por três grandes avenidas. Na avenida central, há um corredor exclusivo para ônibus e duas vias de tráfego lento que operam em sentidos opostos (centro-bairro e bairro-centro). O sistema trinário é composto ainda por duas outras vias paralelas, situadas à direita e à esquerda da rua principal, que operam com tráfego rápido e contínuo em sentidos opostos. O sistema viário é complementado pelas vias conectivas, coletoras, de ligação prioritária, de ligação interbairros, anel central de tráfego lento e vias de ligação rodoviária. A cidade conta ainda com a Linha Verde, que se consolidou como um eixo de ligação entre Pinheirinho e Atuba (Curitiba, 2015).

A lei de zoneamento, uso e ocupação do solo de Curitiba, Lei nº 15.511/2019, classifica o sistema viário básico em vias setoriais, coletoras, prioritárias e normais. As vias setoriais são aquelas de longa extensão, que ligam diversas regiões da cidade e também a região metropolitana. As coletoras possuem média extensão e concentram o tráfego local e de passagem, preservando a tranquilidade no miolo das zonas residenciais atravessadas. As vias prioritárias são corredores com grande volume de tráfego, que ligam os eixos estruturais e vias importantes do sistema viário, priorizando a fluidez do tráfego e desestimulando o estacionamento na via. As vias normais são aquelas predominantemente de acesso local (Curitiba, 2019). As vias de Curitiba têm suas velocidades máximas definidas em conformidade com o código de trânsito brasileiro, tendo as vias arteriais (setoriais e prioritárias) limites de velocidade entre 50 e 70 km/h, as vias coletoras 40 km/h e as vias locais, que atendem principalmente regiões residenciais, 30 km/h (Curitiba, 2022).

A administração pública de Curitiba é reconhecida por suas iniciativas inovadoras, adotando políticas públicas de vanguarda que visam à sustentabilidade ambiental e à melhoria da qualidade de vida de seus cidadãos. Entre os projetos que trazem esse reconhecimento à cidade, pode-se citar a Pirâmide Solar e o Bairro Novo da Caximba, o Vale do Pinhão, o Fab Lab Cajuru, a Fazenda e as Hortas Urbanas, o Aplicativo Saúde Já e o BRT Urbano (Curitiba, 2024a).

No que diz respeito à pavimentação das vias, Curitiba também incorpora soluções inovadoras, como a reciclagem do pavimento asfáltico e o emprego do asfalto borracha no recapeamento das vias urbanas (Curitiba, 2024b). Além disso, a cidade já realizou testes com pavimento piezoelétrico em trecho da ciclovia e pista de caminhada que margeiam o Rio Belém, no Centro Cívico, em parceria com a empresa japonesa Soundpower (Silveira, 2018), embora os resultados dessa pesquisa não tenham sido divulgados até o momento.

5 ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO MUNICÍPIO DE CURITIBA

A avaliação das características de cada um dos tipos de pavimentos geradores de energia descritos na literatura permite inferir que nem todos são aplicáveis à realidade da cidade de Curitiba, seja por ainda não apresentarem um nível de maturidade tecnológica suficiente para serem analisados em um projeto piloto, ou por seu grau de adequação ao contexto geográfico do município.

Embora Curitiba seja conhecida como “a capital mais fria do país”, a ocorrência de neve é pouco provável, tendo sido registrada apenas em 1928 e 1975 (Viaje Paraná, 2024). Nesse contexto, os pavimentos coletores solares se mostram como uma opção que não supre as necessidades do município, uma vez que não há necessidade de degelo do pavimento. Da mesma forma, o pavimento fotovoltaico, por sua intrínseca dependência de condições climáticas favoráveis à geração de energia, não parece ser a opção mais adequada para a cidade

de Curitiba, conhecida por seu clima chuvoso e por elevadas amplitudes térmicas, além de baixa incidência solar no período de inverno.

Outro aspecto relevante a ser considerado no caso da captação de energia por meio do pavimento fotovoltaico é a impossibilidade de se otimizar a inclinação das placas, diferentemente do que ocorre com os painéis solares convencionais, como os que foram instalados na Pirâmide Solar da Caximba, em Curitiba. Isso ocorre porque a inclinação do pavimento deve ser mantida conforme o projeto da via e, no caso do pavimento fotovoltaico, as placas solares são instaladas diretamente no pavimento. Além disso, a exposição à luz solar é reduzida devido à passagem constante de veículos, que podem sombrear a superfície. Diante disso, constata-se que a implementação do pavimento fotovoltaico somente se justificaria em cenários onde houvesse escassez de espaços urbanos adequados para a instalação de painéis solares tradicionais.

Já os pavimentos termoelétricos apresentam como principais entraves à aplicação em Curitiba seu baixo grau de maturidade tecnológica e reduzida eficiência energética, aliados ao alto custo e à dificuldade de implementação do sistema. Dessa forma, antes de implantar esse sistema de geração de energia, seria mais interessante e menos custoso ao município fomentar novos estudos sobre essa tecnologia.

No que se refere ao pavimento piezoelétrico, devido à baixa resistência dos módulos à carga elevada dos veículos, os locais mais adequados para sua implantação parecem ser as calçadas e ciclovias. Nesses espaços, apesar de a capacidade de geração de energia ser menor do que nas áreas destinadas ao tráfego de veículos, a instalação e manutenção dos módulos se dá de forma mais simples do que nas vias urbanas. Além disso, essa tecnologia se destaca pela interatividade que proporciona aos usuários, permitindo que eles participem ativamente do processo de geração de energia e despertando maior conscientização sobre fontes de energia limpa. Nesse sentido, seria interessante que Curitiba ampliasse os testes para implantação dessa tecnologia nas ciclovias e pistas de caminhada da cidade, como já ocorreu no parque linear Rio Belém, conforme relatado por Silveira (2018). Outra aplicação interessante poderia ser nas emblemáticas estações-tubo da cidade, aproveitando a alta circulação de pedestres para potencializar a eficiência na geração de energia e engajar os cidadãos no tema da sustentabilidade energética.

Por outro lado, os pavimentos que geram energia por processos eletromecânicos e hidráulicos podem ser soluções interessantes para aplicação nas vias urbanas com tráfego elevado, já que além de possuírem capacidade de suportar grandes carregamentos, a quantidade de energia gerada nesses sistemas é proporcional ao fluxo de veículos. Embora a instalação desse tipo de pavimento exija um planejamento cuidadoso devido à sua complexidade, sua aplicação em áreas de desaceleração no Centro e em regiões próximas aos terminais de ônibus poderia ser extremamente benéfica, não apenas em relação ao quesito energético, mas também no controle do tráfego, já que esses sistemas funcionam também como redutores de velocidade.

A decisão sobre qual tipo de pavimento inteligente adotar em Curitiba deve considerar uma série de fatores, como as características climáticas, a densidade do tráfego, a disponibilidade de espaço e a viabilidade técnica de cada solução. Conforme apresentado, cada tecnologia possui não só suas vantagens e desvantagens, mas também os locais mais adequados para sua aplicação. Dessa forma, a escolha de uma dessas tecnologias dependerá de um equilíbrio entre a necessidade de geração de energia, a facilidade de implementação, os custos envolvidos e o impacto esperado na sociedade e na paisagem urbana.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os pavimentos inteligentes, ao aproveitarem a energia térmica ou a gerada pelo tráfego de veículos, podem contribuir com o desenvolvimento sustentável, nas vertentes ambiental e econômica, das cidades inteligentes. No entanto, a revisão da literatura apresenta poucos relatos de implantação desses sistemas de forma eficaz, demonstrando que o tema ainda precisa ser estudado e desenvolvido para se tornar uma solução viável.

Para ser efetiva, essa tecnologia precisa aliar a eficiência energética do sistema a parâmetros de conforto e segurança dos usuários do sistema viário. Por esse motivo, é importante que sejam testados protótipos dos módulos nas vias em que se pretende implantar o sistema, de modo a identificar a solução que efetivamente atende às demandas para a aplicação desejada.

É importante salientar que os órgãos governamentais, juntamente com a indústria e as universidades, são entidades críticas no fomento ao desenvolvimento de novas tecnologias, de modo que a implementação de projetos pilotos de pavimentos inteligentes no município de Curitiba pode contribuir para a consolidação desses sistemas na realidade brasileira.

Isso porque, conforme mencionado por Mota e Barroso (2021), as pesquisas realizadas na última década sobre pavimentos capazes de gerar energia ainda não apresentam todos os parâmetros necessários a uma avaliação técnica, econômica e financeira completa e faltam na literatura dados a respeito da eficiência de conversão ou da energia captada, embora o número de estudos tenha aumentado nesse período. É importante ressaltar também que além dos benefícios energéticos, os pavimentos inteligentes podem trazer impactos positivos significativos à sociedade. Ao serem incorporadas ao ambiente urbano, essas tecnologias têm a capacidade de transformar ruas e calçadas em espaços mais dinâmicos e atraentes, por meio de seu design inovador e de suas funcionalidades, como pela interatividade com os usuários, promovendo uma integração entre a sociedade e a sustentabilidade. Essa participação ativa da sociedade na geração de energia limpa promove um comportamento mais engajado por parte da população na adoção de práticas sustentáveis no dia a dia. Além disso, o uso desses pavimentos pode trazer benefícios também para o turismo de Curitiba, consolidando a cidade como exemplo de inovação tecnológica e ambiental.

Por fim, depreende-se que embora existam estudos na literatura indicando que o pavimento fotovoltaico possui um maior potencial de geração de energia, uma análise holística das tecnologias existentes pode levar a conclusões diferentes. A escassez de dados consolidados sobre a energia gerada nos projetos implantados ao redor do mundo e as dificuldades para estimar a capacidade energética de cada tecnologia, tendo em vista os diversos fatores que influenciam seu desempenho, tornam inviável a adoção de uma solução sem uma análise mais aprofundada das particularidades de cada cenário. Assim, a decisão sobre qual tecnologia adotar em Curitiba deve considerar não apenas a eficiência energética, mas também as condições específicas do município, como o clima, o tráfego e as características urbanas, a fim de garantir que a escolha seja a mais adequada para as necessidades da cidade.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. **SolaRoad: A primeira ciclovia solar do mundo**. Blog Tesla Júnior. Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ, 2017. Disponível em: <https://teslajunior.com.br/?p=76>. Acesso em 17. fev. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES TERRESTRES. **Estratégias de eficiência energética em praças de pedágio rodoviário: Relatório Final de Pesquisa RDT - ANTT - Triunfo/CONCEPA**. Brasília, DF, 2018.

BBC News Brasil. **Holandeses inventam pavimento que absorve poluição**. BBC News Brasil. São Paulo, SP, 2013. Disponível em: https://www.bbc.com/portuguese/videos_e_fotos/2013/07/130716_pavement_catalitico_rp. Acesso em 26 jan. 2025.

CRAVO, L. S. **Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2014.

CRESWELL, J. **Projeto de pesquisa: métodos qualitativo, quantitativo e misto**. 2a ed. Porto Alegre: Bookman, 007.

CURITIBA. **Sistema viário organizou a cidade e induziu o desenvolvimento de Curitiba**. Prefeitura Municipal de Curitiba, 2015. Disponível em <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/sistema-viario-organizou-a-cidade-e-induziu-o-desenvolvimento-de-curitiba/37925>. Acesso em 15 mar. 2025.

CURITIBA. **Lei Municipal nº 15.511, de 10 de outubro de 2019**. Dispõe sobre o zoneamento, uso e ocupação do solo no Município de Curitiba e dá outras providências.

CURITIBA. **Por que as ruas têm velocidades diferentes?** Prefeitura Municipal de Curitiba, 2022. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/por-que-as-ruas-tem-velocidades-diferentes/62371#:~:text=Al%C3%A9m%20daquelas%20que%20s%C3%A3o%20conhecidas,Franco%20e%20da%20Linha%20Verde..> Acesso em 16 mar. 2025.

CURITIBA. **Inovação torna Curitiba a cidade mais inteligente do mundo, capital mais igualitária e com a melhor qualidade de vida do País**. Prefeitura Municipal de Curitiba, 2024a. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/inovacao-torna-curitiba-a-cidade-mais-inteligente-do-mundo-capital-mais-igualitaria-e-com-a-melhor-qualidade-de-vida-do-pais/75436>. Acesso em 16 mar. 2025.

CURITIBA. **Zelo pela mobilidade: Prefeitura transforma 11 ruas no entorno de escola e unidade de saúde**. Prefeitura Municipal de Curitiba, 2024b. Disponível em: <https://www.curitiba.pr.gov.br/noticias/zelo-pela-mobilidade-prefeitura-transforma-11-ruas-no-entorno-de-escola-e-unidade-de-saude/72540>. Acesso em: 24 mar. 2025.

CURITIBA. **Perfil da Cidade de Curitiba**. Prefeitura Municipal de Curitiba, 2025. Disponível em <https://www.curitiba.pr.gov.br/conteudo/perfil-da-cidade-de-curitiba/174>. Acesso em 15 mar. 2025.

DUARTE, F.; CASIMIRO, F. **Pavimento sustentável para geração de energia elétrica a partir do movimento de pessoas e veículos**. Patente PT 105126. Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Covilhã, Portugal, 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **IBGE Cidades - Curitiba**. IBGE. Brasília, DF, 2025. Disponível em <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pr/curitiba/panorama>. Acesso em 15 mar. 2025.

INGLIS, B. **These high-tech tiles generate energy from our footsteps — and they could change how we power our cities**. The Cool Down Company, 2024. Disponível em: <https://www.thecooldown.com/green-tech/pavegen-tiles-walk-kinetic-energy-step/>. Acesso em 08 fev. 2025.

KENNEPOHL, G. J. A. **ASPHALT PAVEMENTS and the ENVIRONMENT**. Notas da palestra apresentada no ISAP International Symposium on Asphalt Pavements and Environment. Zurique, Suíça, 2008.

MAYER, N. **Fiasco de la route solaire: la démolition a commencé**. Révolution Énergétique. Strasbourg, França, 2024. Disponível em: <https://www.revolution-energetique.com/fiasco-de-la-route-solaire-la-demolition-a-commence/>. Acesso em 08 fev. 2025.

MOTA, B. C.; BARROSO, S. H. A. **O uso do pavimento para geração de energia e desenvolvimento sustentável de cidades inteligentes**. Revista Transportes, 29, (2), p. 2380–2394. Rio de Janeiro, RJ: Associação Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET), 2021.

OLIVEIRA, S. G. L.; LAPENNA JÚNIOR, S. O uso de placas piezoelétricas na estação de metrô Sé. In: FREITAS, L. C. **Engenharia elétrica e de computação: docência, pesquisa e inovação tecnológica 2**. Ponta Grossa, PR: Atena, 2023.

PARANÁ INTERATIVO. **Classificação do Sistema Viário**. Secretaria das Cidades, Governo do Paraná. Curitiba, PR, 2025. Disponível em: <https://paranainterativo.pr.gov.br/portal/apps/webappviewer/index.html?id=df48e7ce07d648359a39cc3673dcb48e>. Acesso em 15 mar. 2025.

SANTOS, V. C. **Aplicação de Sistemas de Geração de Energia nos Pavimentos Rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra. Coimbra, Portugal, 2014.

SHAOPENG, W.; MINGYU, C.; JIZHE, Z. **Laboratory investigation into thermal response of asphalt pavements as solar collector by application of small-scale slabs**. Applied Thermal Engineering, 31 (10), p. 1582–1587. Londres, Reino Unido: Elsevier, 2011.

SILVEIRA, A. **Curitiba testa 'ciclovía do futuro' no Centro Cívico**. Tribuna do Paraná. Curitiba, Paraná, 2018. Disponível em: <https://www.tribunapr.com.br/noticias/curitiba-regiao/curitiba-testa-ciclovía-do-futuro-no-centro-cívico/>. Acesso em 08 fev. 2025.

STRAUSS, A.; CORBIN, J. **Pesquisa qualitativa: técnicas e procedimentos para o desenvolvimento de teoria fundamentada**. 2a ed. Porto Alegre: Artmed, 2008.

THOMPSON, V. **Onyx Solar launches walkable PV tiles**. PV Magazine. Londres, Reino Unido, 2024. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2024/11/28/onyx-solar-launches-walkable-pv-tiles/>. Acesso em 26 jan. 2025.

UN-HABITAT. **Cities and Climate Action - World Cities Report 2024**. United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). Nairóbi, Quênia, 2024. Disponível em https://unhabitat.org/sites/default/files/2024/11/wcr2024_-_full_report.pdf. Acesso em 08 fev. 2025.

VIAJE PARANÁ. **Curitiba, a capital mais fria do Brasil**. Secretaria do Turismo, Governo do Paraná. Curitiba, PR, 2024. Disponível em https://www.viajeparana.com/InvernoNoParana_Curitiba#:~:text=Curitiba%20a%20capital%20mais%20fria%20do%20Brasil%202023,05%2F2024%20%2D%2017%3A00&text=Faz%20tanto%20frio%20em%20Curitiba,tanto%20frio%20na%20capital%20paranaense%3F. Acesso em 15. mar. 2025.

VOIGT, T.; RITTER, H.; SCHILLER, J. **Utilizing solar power in wireless sensor networks**. Anais da 28a Conferência Internacional Anual do IEEE sobre Redes Locais de Computadores, p. 416–422. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Bonn/Königswinter, Alemanha, 2003.

WANG, H.; JASIM, A.; CHEN, X. **Energy harvesting technologies in roadway and bridge for different applications - A comprehensive review**. Applied Energy. 212, p. 1083–1094. Londres, Reino Unido: Elsevier, 2018.