

AJC

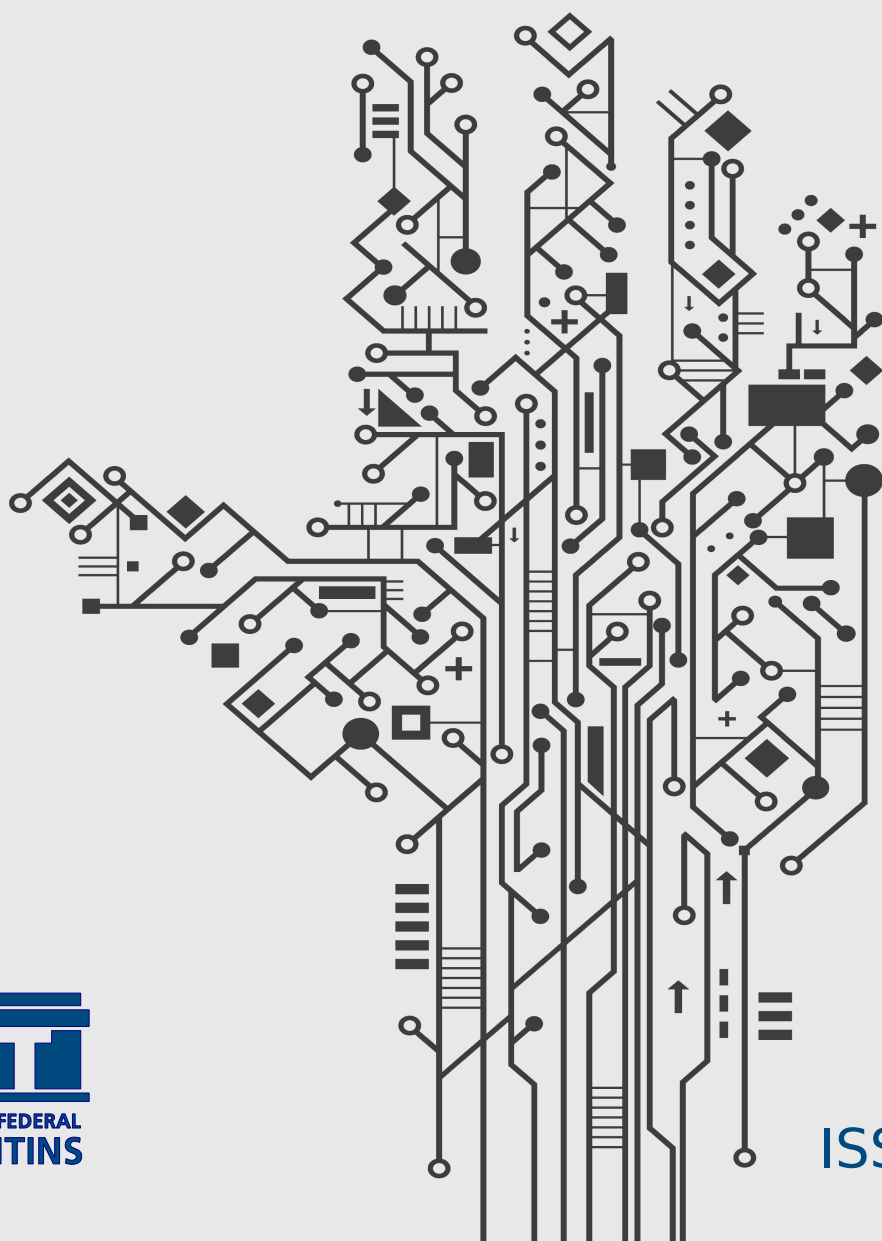
Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics

EAM

2026

Volume 7 Issue 3

Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics



Universidade Federal do Tocantins

Reitor

Profa. Dra. Maria Santana Ferreira dos Santos

Vice-Reitor

Prof. Dr. Marcelo Leineker Costa

Pró-Reitoria de Graduação

Profa. Dra. Valdirene Gomes dos Santos de Jesus

Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação

Profa. Dra. Flávia Lucila Tonani

Pró-Reitoria de Extensão e Cultura

Bruno Barreto Amorim Campos

Pró-Reitoria de Administração e Finanças

Me. Carlos Alberto Moreira de Araújo Júnior

Pró-Reitoria de Assuntos Estudantis e Comunitários

Prof. Dr. Kherlley Caxias Batista Barbosa

Pró-Reitoria de Avaliação e Planejamento

Prof. Dr. Eduardo Andrea Lemus Erasmo

Pró-reitoria de Gestão e Desenvolvimento de Pessoas

Dra. Michelle Matilde Semiguel Lima Trombini Duarte

Pró-Reitoria de Tecnologia da Informação e Comunicação

Olívia Tozzi Bittencourt

Direção do Campus de Palmas

Prof. Dr. Moisés de Souza Arantes Neto

Coordenação do Curso de Ciência da Computação

Prof. Dr. Ary Henrique Moraes de Oliveira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics (AJCEAM) [recurso eletrônico] / Universidade Federal do Tocantins, Curso de Ciência da Computação. – vol. 07, n. 03 ([april/september], 2026) – Palmas - TO, UFT, 2026. ISSN nº 2675-3588.

Quadrimestral no primeiro ano de publicação 2020

Semestral.

Disponível em:

<https://sistemas.uft.edu.br/periodicos/index.php/AJCEAM/index>

1. Ciência da Computação - periódico. 2. Matemática Aplicada. 3. Computação Aplicada. 4. Engenharias. 5. Ciências Exatas. I. Universidade Federal do Tocantins.

CDD 22.ed. 004

Ficha Catalográfica elaborada por Edson de Sousa Oliveira – CRB/2 – 1069.

Expediente

Editor-Chefe

Me. Tiago da Silva Almeida (UFT), Brasil

Editores

Dr. Edeilson Milhomem Silva (UFT), Brasil

Dr. Marcos Antônio Estremeto (ETEC-SP), Brasil

Dr. Rafael Lima de Carvalho (UFT), Brasil

Dr. Tanilson Dias dos Santos (UFT), Brasil

Me. Tiago da Silva Almeida (UFT), Brasil

Dr. Warley Gramacho da Silva (UFT), Brasil

Realização

Fundação Universidade Federal do Tocantins (UFT)

Quadra 109 Norte, Avenida NS-15, ALCNO-14 | Bloco III | sala 214 | Plano Diretor Norte | 77001-090 | Palmas / TO | Brasil

Periodicidade

Este periódico possui periodicidade semestral e utiliza a Licença Creative Commons 4.0 - CC BY-NC 4.0. Contudo, a publicação dos artigos em modalidade avançada ou ahead of print, ou seja, tão logo os manuscritos aprovados sejam editados para publicação, é possível. O AJCEAM não possui taxas de publicação, tanto pouco de submissão de manuscritos, sendo totalmente gratuita para autores e leitores.

Indexadores

Google Acadêmico, desde 9 de maio de 2020

International Standard Serial Number – ISSN, desde 28 de maio de 2020

Crossref, desde 7 de junho de 2020

Revistas de Livre Acesso – LivRe, desde 24 de junho de 2020

Diretório das revistas científicas eletrônicas brasileiras – Miguilim, desde novembro de 2022

Sumário

1	Electrical Engineering Contributions to the Energy Transition	1
	SOUSA	
2	The use of Bluetooth Low Energy (BLE) Beacons for attendance at the Superior da Magistratura Tocantinense school (ESMAT)	13
	CARMO AND SILVA	
3	Legal Document Classification Using Generative AI: A Retrieval-Augmented Generation (RAG) and Gemini Approach	19
	SANTANA AND ROCHA	
4	Cost-Benefit Analysis of Precision Agriculture Technologies in Greenhouses	25
	BARBOSA	
5	Low-Cost Environmental Monitoring System with IoT Sensors, Mobile Data Collection and Spatial Analysis of Urban Islands	35
	FREITAG	

Contribuições da Engenharia Elétrica no Contexto da Transição Energética

Electrical Engineering Contributions to the Energy Transition

Kauê Henrique de Sousa¹, Stefani Caroline Leal de Freitas¹, Adelicio Maximiano Sobrinho¹ e Viviane Fernandes Moreira¹

¹ Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, Tocantins, Brasil

Data de recebimento do manuscrito: 24/11/2025

Data de aceitação do manuscrito: 25/03/2026

Data de publicação: 02/04/2026

Resumo— A transição energética global exige soluções inovadoras para integrar fontes renováveis, aumentar a eficiência energética e modernizar a infraestrutura. No Brasil, a engenharia elétrica desempenha um papel fundamental no avanço dessa transição, aproveitando os abundantes recursos renováveis do país e as tecnologias emergentes. Este artigo explora as principais contribuições da engenharia elétrica no contexto brasileiro, com foco na geração sustentável de energia (solar, eólica, biomassa), sistemas de armazenamento de energia, implantação de redes inteligentes (*smart grids*), eletrificação do transporte e áreas das telecomunicações como a utilização de redes ópticas e estrutura 5G para pontos de conexão dessas estruturas interconectadas. Estudos de caso, como usinas solares de grande escala no contexto óptica e projetos de redes inteligentes em centros urbanos, ilustram aplicações práticas. Desafios como a intermitência da rede, altos custos de armazenamento e disparidades regionais são analisados, juntamente com oportunidades para inovação em políticas públicas, privadas e desenvolvimento de mão de obra. Ao abordar dimensões técnicas, econômicas e regulatórias, este trabalho destaca o potencial do Brasil para liderar a inovação em energias renováveis, promovendo um futuro energético resiliente e promissor.

Palavras-chave— Engenharia Elétrica, Transição energética, Telecomunicações

Abstract— The global energy transition demands innovative solutions to integrate renewable sources, enhance energy efficiency, and modernize infrastructure. In Brazil, electrical engineering plays a key role in driving this transition by leveraging the country's abundant renewable resources and emerging technologies. This article explores the main contributions of electrical engineering in the Brazilian context, focusing on sustainable energy generation (solar, wind, biomass), energy storage systems, the deployment of smart grids, transportation electrification, and telecommunications applications, such as optical networks and 5G infrastructure for interconnection points. Case studies, including large-scale solar power plants and smart grid projects in urban centers, illustrate practical applications. Challenges such as grid intermittency, high storage costs, and regional disparities are analyzed, along with opportunities for innovation in public and private policy and workforce development. By addressing technical, economic, and regulatory dimensions, this study highlights Brazil's potential to lead innovation in renewable energy, fostering a resilient and promising energy future.

Keywords— Electrical Engineering, Energy Transition, Telecommunications

I. INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas, intensificadas nas últimas décadas pelo acúmulo de gases de efeito estufa derivados da queima de combustíveis fósseis, representam uma ameaça crítica à estabilidade ambiental e socioeconômica global [1]. Diante desse cenário, a transição energética surge como um imperativo estratégico, caracterizado pela substituição progressiva de fontes poluentes por energias renováveis e pela promoção da

eficiência energética [2, 3]. Essa transformação transcende a mera diversificação da matriz energética, abrangendo a eletrificação de setores como transporte e indústria, além da modernização de infraestruturas [4, 5]. Nesse contexto, a Engenharia Elétrica assume papel central, viabilizando soluções tecnológicas para integração de fontes intermitentes, otimização de redes e armazenamento de energia.

Internacionalmente, o Acordo de Paris reforça a urgência da descarbonização, incentivando países a adotarem políticas alinhadas à sustentabilidade [1]. O Brasil destaca-se como protagonista nesse movimento, com uma matriz elétrica composta por 84% de fontes renováveis, como hidrelétricas, eólica, solar e biomassa [6]. A liderança

histórica em energia hidroelétrica é complementada pelo crescimento acelerado de parques eólicos no Nordeste e usinas solares no Centro-Oeste, regiões beneficiadas por recursos naturais abundantes [7]. A biomassa, especialmente a derivada da cana-de-açúcar, consolida-se como fonte complementar, garantindo flexibilidade e resiliência ao sistema elétrico nacional [8].

A integração de tecnologias de telecomunicações desempenha um papel estratégico na consolidação da transição energética, ao viabilizar a modernização e automação dos sistemas elétricos. Ferramentas como a Internet das Coisas (IoT), redes de fibra óptica e comunicações dedicadas tornam possível a criação de redes elétricas inteligentes, capazes de monitorar e controlar, em tempo real, diferentes componentes do sistema energético. Esse nível de conectividade permite a gestão precisa de micro redes, a resposta rápida a variações na geração e demanda, e a integração eficiente de fontes intermitentes, como solar e eólica [9, 10]. Além disso, a utilização de infraestrutura de telecomunicações avançada garante a transmissão segura e contínua de dados essenciais à operação do sistema, contribuindo para a redução de perdas técnicas, o aumento da confiabilidade da rede e a otimização do consumo energético [11]. Dessa forma, a convergência entre Engenharia Elétrica e tecnologias de comunicação constitui um alicerce fundamental para alcançar maior eficiência, sustentabilidade e resiliência no setor energético [12].

A escolha do tema “Contribuições da Engenharia Elétrica no Contexto da Transição Energética” justifica-se pela relevância estratégica do Brasil, que possui potencial para se consolidar como modelo global de energia limpa. Contudo, desafios técnicos persistem, como a integração de fontes intermitentes (solar e eólica) à rede, a necessidade de modernização de sistemas de distribuição e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento. A Engenharia Elétrica responde a essas demandas por meio de redes inteligentes, sistemas de baterias e programas de eficiência energética, como o coordenado pela ANEEL, que reduz perdas e incentiva o consumo consciente [4, 5]. Além disso, a eletrificação de veículos, a integração de micro redes e a aplicação de sistemas de automação com tecnologias de IoT e inteligência artificial reforçam a sinergia entre inovação técnica e sustentabilidade [8].

Este trabalho analisa as contribuições da Engenharia Elétrica para a transição energética no Brasil, explorando o papel das tecnologias de geração renovável, redes inteligentes, armazenamento, eletrificação do transporte e integração com telecomunicações. Aborda o panorama atual da matriz, os desafios técnicos e regulatórios, casos de sucesso nacionais e recomendações para políticas e investimentos que acelerem uma matriz energética sustentável e resiliente [6, 7].

Este trabalho adota uma abordagem de revisão bibliográfica exploratória e explicativa, orientada pela pergunta de pesquisa central: Como a Engenharia Elétrica contribui para viabilizar a transição energética no Brasil, considerando tecnologias de geração renovável, redes inteligentes, armazenamento de energia, eletrificação do transporte e integração com telecomunicações?

A busca foi realizada em bases acadêmicas (SciELO,

Google Scholar) e repositórios oficiais (EPE, ONS, ANEEL), utilizando combinações de termos relacionados à transição energética, engenharia elétrica, matriz renovável brasileira, *smart grids*, armazenamento de energia, eletrificação do transporte e telecomunicações aplicadas ao setor elétrico. Foram priorizadas publicações de 2018 a 2025, com ênfase em fontes oficiais brasileiras e estudos que apresentassem casos nacionais. A seleção privilegiou trabalhos de relevância direta ao tema e caráter técnico ou regulatório, excluindo publicações puramente internacionais sem conexão com o contexto brasileiro ou anteriores a 2018 (exceto referências clássicas). A literatura selecionada foi analisada para identificar convergências, lacunas e oportunidades, permitindo uma síntese crítica das contribuições da Engenharia Elétrica no avanço da transição energética no país.

Assim, este artigo será organizado da seguinte forma: a Seção II aborda o panorama da transição energética no Brasil, destacando a evolução da matriz renovável e políticas públicas. A Seção III explora as contribuições da Engenharia Elétrica, com ênfase em redes inteligentes, armazenamento de energia e eletrificação dos transportes. A Seção IV discute desafios técnicos e oportunidades socioeconômicas, enquanto a Seção V analisa estudos de caso nacionais. Por fim, a Seção VI apresenta conclusões e recomendações para acelerar a transição energética, alinhando desenvolvimento tecnológico e sustentabilidade.

II. PANORAMA DA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA NO BRASIL

A transição energética global, impulsionada pela necessidade premente de mitigar as mudanças climáticas e garantir a segurança do suprimento energético, encontra no Brasil um cenário particular e complexo. O país se destaca internacionalmente pela elevada participação de fontes renováveis em suas matrizes, mas enfrenta desafios significativos para consolidar um modelo energético de baixo carbono que seja, ao mesmo tempo, seguro, acessível e sustentável. Esta seção se dedica a analisar o panorama da transição energética no contexto brasileiro, abordando a composição de sua matriz energética e elétrica no contexto brasileiro e mundial, o papel das políticas públicas e regulamentações como indutoras desse processo e os desafios técnicos e regionais que emergem com a crescente integração de novas fontes e tecnologias.

a. Matriz Energética e Elétrica: Panorama Brasileiro

A transição energética no Brasil se destaca no cenário global pela alta participação de fontes renováveis. Em 2023, as fontes renováveis representaram 49,1% da Oferta Interna de Energia (OIE) brasileira, segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) [13]. Esse percentual é significativamente superior à média global de 14,7% registrada em 2022 [14, 13, 15], refletindo o papel central das renováveis em setores como transportes, indústria, uso residencial e geração elétrica.

Dentre as fontes renováveis que compõem a matriz energética nacional, destacam-se os derivados da cana-de-açúcar (16,9%), a energia hidráulica (12,1%), a

Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) 2023

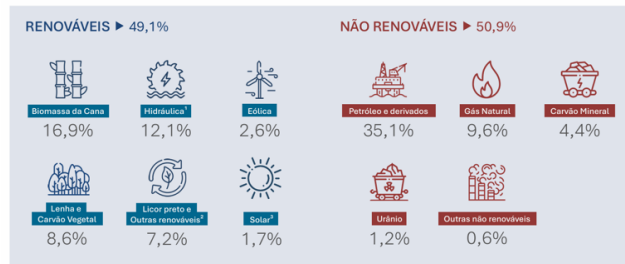
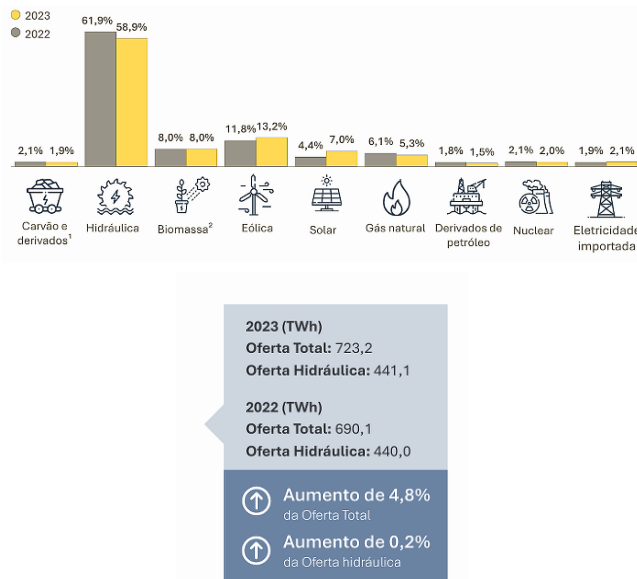


Figura 1: Repartição da Oferta Interna de Energia (OIE) em 2023 [17, 18].



A matriz elétrica brasileira em 2023 apresentou mudanças em função da estabilidade do regime hídrico associada ao aumento da geração eólica e solar.

Figura 2: Matriz Elétrica Brasileira em 2023 [17, 18].

lenha e o carvão vegetal (8,6%), além de outras fontes como o licor preto (7,2%), a energia eólica (2,6%) e a solar (1,7%) [13]. Apesar da robusta presença de renováveis, os combustíveis fósseis ainda representam 50,9% da matriz energética, com destaque para o petróleo e seus derivados (35,1%) e o gás natural (9,6%) [13]. O setor de transportes é o principal responsável por essa permanência dos fósseis na matriz. A Figura 1 ilustra a Repartição da Oferta Interna de Energia em 2023.

A matriz elétrica brasileira apresenta um perfil fortemente renovável. Em 2023, 89,2% da eletricidade gerada no país veio de fontes renováveis, bem acima da média global de 30% registrada em 2022 [14, 13, 16]. A energia hidráulica, tradicionalmente a base do sistema, respondeu por 58,4% da geração elétrica, enquanto as fontes eólicas (13,8%), biomassa (8,4%) e solar (8,2%) continuaram a ganhar espaço [13]. A energia nuclear representou 1,2% e as fontes não renováveis (como gás natural e carvão mineral) somaram 11% [13]. De modo que a Figura 2 detalha a Matriz Elétrica Brasileira em 2023.

De acordo com o Balanço Energético Nacional 2024 da EPE, a matriz elétrica brasileira em 2023 contou com as seguintes participações: hidráulica com 58,9%, eólica com 13,2%, biomassa com 8,0%, solar com 7,0%, gás natural com 5,3%, eletricidade importada com 2,1%, nuclear com

2,0%, carvão e derivados com 1,9% e derivados de petróleo com 1,5% [13]. A oferta total de eletricidade atingiu 723,2 TWh, com a hidráulica representando 441,1 TWh, o que significou um aumento de 4,8% na oferta total e 0,2% na oferta hidráulica em relação a 2022 [13].

Esse avanço foi impulsionado por uma expansão recorde em 2024, quando o Brasil adicionou 10,9 GW à sua capacidade instalada, dos quais mais de 91% vieram de novas usinas eólicas e solares [19]. Com isso, a capacidade instalada total do país alcançou 230,5 GW, sendo 84,5% de fontes renováveis, distribuídas principalmente entre hidrelétricas (46,9%), eólicas (14%), solares (9%) e biomassa (7,2%) [14, 20, 19].

Destaca-se também o crescimento da micro e mini-geração distribuída (MMGD), predominantemente solar fotovoltaica. Ao final de 2024, essa modalidade ultrapassou os 33 GW de potência instalada, representando cerca de 22% da capacidade total do país, com projeções para alcançar 49 GW até 2029, tornando-se a segunda maior fonte do Sistema Interligado Nacional (SIN) [20].

As projeções do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) apontam que, até 2029, a capacidade instalada combinada de biomassa, eólica e solar centralizada deverá superar a da fonte hidráulica, representando mais de 51% da capacidade total do Sistema Interligado Nacional (SIN) [8, 9]. Até 2028, as fontes eólicas e solar centralizadas devem alcançar 79,8 GW de capacidade [15]. Esse cenário reflete as características singulares da transição energética brasileira, marcada pela expressiva participação de renováveis tanto na matriz energética quanto na matriz elétrica.

A elevada participação de renováveis confere ao setor elétrico brasileiro uma das menores intensidades de emissões de carbono do mundo, com 55,1 kg de CO₂ equivalente por MWh gerado em 2023, nível inferior ao de muitos países desenvolvidos [7]. Essa vantagem coloca o Brasil em posição estratégica na agenda global de mitigação das mudanças climáticas.

No entanto, desafios persistem. A histórica dependência da hidroeletricidade torna o sistema vulnerável a crises hídricas, exigindo diversificação contínua. Além disso, a descarbonização integral da matriz energética depende de avanços na eletrificação do transporte, maior uso de biocombustíveis e fortalecimento de políticas públicas para expandir o uso de fontes limpas em setores ainda intensivos em combustíveis fósseis [14, 21, 22].

b. Políticas Públicas e Regulamentações como Vetores da Transição

Desde o início dos anos 2000, a transição energética brasileira vem sendo impulsionada por um sólido conjunto de políticas públicas e regulação. Nessa estrutura, a ANEEL normatiza incentivos, leilões e tarifas que configuram tanto o ambiente regulado (ACR) quanto o livre (ACL) [23]; o MME, assistido pela EPE, desenvolve estudos estratégicos como o Balanço Energético Nacional (BEN) e o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) para estabelecer metas de capacidade e a composição do mix energético até 2033 [23]; e o ONS coordena a operação do Sistema Interligado Nacional (SIN), garantindo a estabilidade e a

confiabilidade do despacho de geração [24].

Programas de fomento direto foram determinantes nessa trajetória, tendo o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica) se destacado como marco inicial. Criado em 2002, o programa contratou 3,3 GW de usinas distribuídos igualmente entre PCHs, biomassa e eólica gerando aproximadamente 150 mil empregos e reduzindo cerca de 2,5 MtCO₂ eq/ano [24]. Em 2024, a ANEEL aprovou as quotas de custeio do PROINFA para 2025, determinando um custo médio de R\$ 543,56/MWh e assegurando a continuidade dos contratos e a estabilidade econômica do programa [25].

Desde 2007, leilões voltados para fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa, têm garantido contratos de 20 anos a preços competitivos. Em 2024, verificou-se que mais de 91 % dos 10,9 GW contratados em leilões de energia nova referiam-se a parques eólicos e solares, de maneira que a Figura 3 representa a Expansão da Matriz Energética Brasileira evidenciando o crescimento expressivo dessas fontes na matriz elétrica [26].

A micro e mini-geração distribuída (MMGD) ganhou nova relevância com a Resolução ANEEL nº 482/2012, que possibilitou a compensação dos excedentes de pequenos geradores na conta de energia [27]. Esse arcabouço normativo foi fortalecido pela Lei nº 14.300/2022 (Marco Legal da GD), que definiu as tarifas de uso da rede (TUST/TUSD) e estabeleceu prazos de transição para manter os incentivos até 2045, buscando equilibrar subsídios e sustentabilidade do sistema. Além disso, a Resolução Normativa ANEEL 1.076/2023 complementou essas medidas ao exigir critérios de suportabilidade para os geradores distribuídos, prevenindo riscos de desconexões em massa durante eventos de instabilidade [28].

Como complemento às políticas já citadas, incentivos fiscais como descontos nas tarifas de uso dos sistemas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) para projetos renováveis estão em revisão para manter a competitividade sem onerar o consumidor [29].

Paralelamente, o governo anunciou, para 2025, a realização de leilões específicos para soluções de armazenagem de energia (baterias) e a condução de estudos de viabilidade para o hidrogênio verde, iniciativas que abrem novos mercados e enfrentam os desafios da intermitência das fontes eólica e solar [29].

c. Desafios Técnicos e Regionais na Consolidação da Transição

A transição energética brasileira é impulsionada por políticas públicas, planejamento técnico e regulação, com apoio da ANEEL, MME/EPE e ONS, que coordenam o Sistema Interligado Nacional (SIN). Programas como o PROINFA e leilões temáticos incentivam fontes renováveis, como eólica, solar e biomassa [14, 21, 24]. Além disso, o país oferece incentivos fiscais, como descontos nas tarifas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) para projetos renováveis, e planeja leilões para baterias e hidrogênio verde [20, 24]. A Figura 4 demonstra a Matriz de Energia Elétrica no SIN em 2024 e 2028 a partir disso o Plano Decenal de Expansão de Energia e o PAR/PEL 2024 projetam que, até 2029, eólica, solar e biomassa superarão a

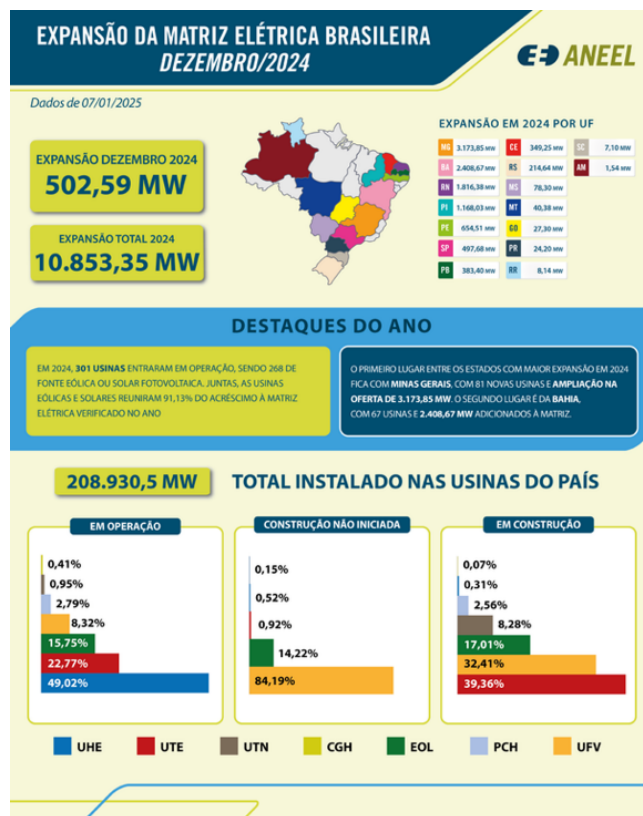


Figura 3: Expansão da Matriz Energética Brasileira [14].

capacidade hidráulica no SIN [14, 21, 26].

Desafios intrínsecos técnicos e regionais interseccionam a consolidação da transição como os Sistemas Isolados, concentrados no Norte, Mato Grosso e Fernando de Noronha, consomem cerca de 3,7 milhões de MWh anuais, operando com termelétricas a diesel, que geram altos custos e impactos ambientais [25]. Parte desses custos é coberta pela Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), que representa R\$ 1,5 bilhão ao ano em Manaus [25]. A Conta de Desenvolvimento Energético (CDE) também subsidia até 100% dos custos de interligação desses sistemas ao SIN, substituindo o diesel por fontes mais limpas e econômicas, via sub-rogação [30]. Estudos da EPE sugerem que interligar localidades como Nhamundá (AM), Faro (PA) e Terra Santa (PA) pode evitar até 640 mil toneladas de CO₂ entre 2028 e 2042, enquanto conectar comunidades no Acre pode reduzir custos em 20% [31].

A Amazônia Legal enfrenta desafios para universalizar o acesso à energia, com 990 mil pessoas sem eletricidade e 62 hidrelétricas ainda fora do SIN. Inovações como solar flutuante em Tucuruí, que reduziu a área alagada em 12%, e sistemas off-grid com baterias de lítio para 83 comunidades ribeirinhas avançam nessa direção [29]. No Nordeste, R\$ 120 bilhões foram investidos para escoar 18 GW de excedentes, usando tecnologias como STATCOM e linhas HVDC de 800 kV para estabilizar a rede [26].

A integração de fontes intermitentes no SIN exige melhorias para lidar com variações de 70% na eólica e 100% no solar. Inteligência artificial, com dados de 487 estações meteorológicas, reduziu erros de previsão para 3,2%, enquanto 2,4 GW em baterias para controle de frequência garantem 89% de renováveis em 2024, com

MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA

CAPACIDADE INSTALADA NO SIN EM 2024 E 2028

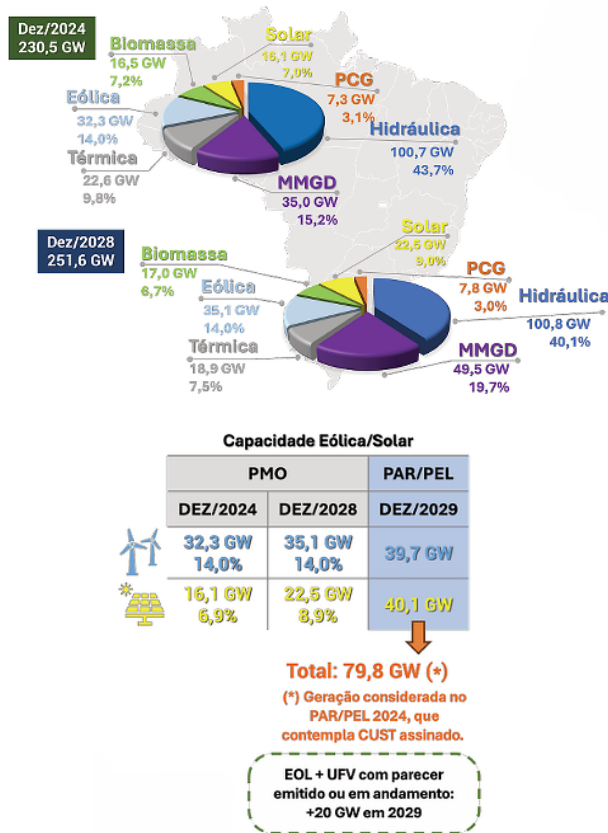


Figura 4: Matriz de Energia Elétrica no SIN em 2024 e 2028 [13].

99,7% de disponibilidade [24, 27].

A modernização da infraestrutura de transmissão no Brasil é essencial para integrar fontes intermitentes e garantir a qualidade e confiabilidade do fornecimento, exigindo investimentos em redes inteligentes, sistemas de armazenamento e tecnologias digitais para monitoramento em tempo real [32]. Essa atualização é crucial para flexibilizar o sistema, assegurar a segurança no fornecimento e expandir o acesso a fontes renováveis [32]. Além disso, a integração dessas tecnologias e a adaptação regulatória para geração distribuída são fundamentais para tornar o sistema energético mais resiliente e sustentável.

III. CONTRIBUIÇÕES DA ENGENHARIA ELÉTRICA

A Engenharia Elétrica desempenha papel central na transição energética brasileira por meio da ampliação de fontes renováveis, como solar, eólica, biomassa e PCHs, além da inserção de sistemas de armazenamento em regiões isoladas. Avanços em automação com *smart grids*, IoT e inteligência artificial modernizam a gestão da energia, enquanto a expansão da transmissão, a eletrificação dos transportes e os programas de eficiência energética promovem um sistema mais limpo, seguro e sustentável.

a. Geração de Energia Sustentável no Brasil

A região Nordeste consolidou-se como polo estratégico para a geração solar fotovoltaica, com crescimento de 48% entre 2022 e 2024, alcançando 18 GW de capacidade instalada. O Complexo Solar de São Gonçalo (PI), maior da América Latina, contribuiu com 1,2 GW, utilizando inversores modernos e sistemas bifaciais com rastreamento solar, que aumentam a eficiência em 22% [33].

No mesmo período, o Rio Grande do Norte liderou a geração eólica *offshore*, com 13 novos parques totalizando 2,3 GW, utilizando turbinas de 8 MW e torres hibridizadas para resistência a ventos de até 45 m/s [34]. A conexão dessas usinas à rede foi viabilizada por subestações flutuantes e cabos submarinos de 500 kV, que reduziram perdas de transmissão para 3,5% [35].

A cogeração a partir de biomassa alcançou 21,4 TWh em 2024, com destaque para a usina de Lençóis Paulista (SP), equipada com caldeiras de leito fluidizado circulante de 80 MW. Essas permitem o uso combinado de diferentes tipos de biomassa, com eficiência térmica de 85% e redução de 40% nas emissões de particulados [36]. A usina utiliza controle PID para otimização em tempo real da combustão [37].

As Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), com potência entre 1 MW e 30 MW, representam 4,7% da capacidade hidráulica nacional, com 127 unidades em operação em Minas Gerais [38]. Avanços técnicos incluem turbinas Kaplan de velocidade variável e geradores de ímã permanente acoplados a conversores *full-scale*, que aumentam a eficiência e reduzem a necessidade de bancos de capacitores em 75% [39]. Apesar disso, o licenciamento ambiental ainda é um entrave, com tempo médio de 8,2 anos [40].

b. Armazenamento de Energia no Contexto Brasileiro

Até 2024, o programa “Energia Sustentável na Amazônia” implantou 34 micros redes híbridas, com painéis fotovoltaicos de 5 MWp e baterias LiFePO4 de 12 MWh. Em Maués (AM), a solução reduziu o consumo de diesel em 87% por meio de algoritmos preditivos LSTM (*Long Short-Term Memory*) com acurácia de 92% [41]. Essas redes utilizam barramentos DC de 1500 V e conversores bidirecionais, integrando baterias e geradores emergenciais. O Programa Energias da Amazônia, com R\$ 820 milhões previstos em investimentos, incluirá um leilão de 49 MW em sistemas isolados com 22% mínimo de fontes renováveis [41].

Segundo a ABSAE, o LCOE (*Levelized Cost of Energy*) de baterias deve cair 28% até 2030, alcançando R\$ 240/MWh, impulsionado por ganhos de escala na produção de células Li-Ion e sistemas de gestão térmica passiva [42]. Modelagens com sistemas de 100 MW/400 MWh projetam receitas adicionais de R\$ 18/MWh via arbitragem temporal no mercado ACR [42]. Análises de fluxo de potência ótimo (OPF) indicam que o armazenamento pode adiar R\$ 2,3 bilhões em investimentos em transmissão na região Norte até 2035 [43].



Figura 5: “Cidades do Futuro” da Cemig (Sete Lagoas - MG) [46].

c. Automação e Controle de Sistemas Energéticos

As *smart grids* brasileiras evoluem com a integração de dispositivos digitais, comunicação bidirecional e algoritmos, incluindo IA, para otimizar a operação do sistema elétrico, com previsão de carga, detecção de falhas e reconfiguração automatizada [44]. Projetos como o “Cidades do Futuro” da Cemig (Sete Lagoas - MG), Figura 5, demonstram ganhos com 5.000 medidores inteligentes e 46 pontos de automação *self-healing*, suportados por redes de fibra óptica [45].

As *smart grids* permitem fluxo bidirecional de energia e dados, promovendo eficiência energética, integração de renováveis, redução de perdas e maior participação do consumidor por meio da geração distribuída (GD) e resposta à demanda [44, 47]. Tecnologias como medidores inteligentes, AMI (Infraestrutura de Medição Avançada), sensores, automação da distribuição, SEM (Sistema de Gerenciamento de Energia), comunicação robusta (fibra, RF, PLC) e armazenamento suportam essa transformação [44, 48].

Desafios para ampliação incluem custos iniciais, padronização, cibersegurança, interoperabilidade e engajamento do consumidor [49]. O projeto “Energia do Futuro” da Enel GO (Equatorial) também evidenciou melhorias com uso de *smart meters* e religadores automáticos [35].

A IoT e a IA complementam essas redes em cidades inteligentes, otimizando consumo, previsão da GD e monitoramento [50]. A engenharia elétrica contribui com sensores, comunicação (5G, LoRaWAN), plataformas de gestão e algoritmos para análise de dados [36].

d. Transmissão e Distribuição de Energia no Brasil

A infraestrutura de transmissão e distribuição é essencial para transportar a energia gerada até os centros de carga. No contexto da transição energética, a integração de fontes renováveis, muitas vezes distantes dos centros consumidores, exige soluções inovadoras da engenharia elétrica.

A inserção de eólica e solar no Nordeste e Norte requer a expansão da malha de transmissão. O PDE 2033 inclui projetos como o bipolo de 800 kV Silvânia – Graça Aranha, conectando o norte de Goiás ao SIN, e a ampliação de subestações (ex.: Luziânia 500/138 kV) [47]. No Norte, linhas de 500 kV interligarão usinas como Belo Monte e hidrelétricas de Rondônia ao eixo Norte-Sul, aumentando a

confiabilidade e levando energia limpa ao Centro-Sul [47].

Em 2023, as perdas elétricas chegaram a 14,1% da energia injetada, com 7,3% técnicas (42,0 TWh) e 6,7% não técnicas (38,2 TWh). As perdas técnicas decorrem do transporte e transformação de energia (efeito Joule, perdas em transformadores, etc.), sendo influenciadas por resistência dos materiais, carregamento e condições ambientais [51, 47]. A engenharia contribui com redes otimizadas, troca de equipamentos obsoletos, bancos de capacitores, modernização da infraestrutura (transformadores mais eficientes, substituição de cabos antigos), do uso de monitoramento digital com sensores e IoT e do planejamento otimizado da rede (melhoria de trajetos e distâncias) [51, 47].

As perdas não técnicas são causadas por furtos, fraudes e erros de leitura. A redução envolve medidores inteligentes, IA para análise de consumo e tecnologias de inspeção [47]. A gestão dessas perdas é vital para a sustentabilidade das distribuidoras e modicidade tarifária.

e. Eletrificação dos Transportes

A mobilidade elétrica global tem crescido rapidamente. Em 2024, a frota mundial de veículos elétricos (VEs), incluindo os modelos totalmente elétricos (BEV) e híbridos *plug-in* (PHEV), em números totais, os modelos eletrificados superaram 17 milhões de unidades emplacadas em todo o mundo, um salto substancial de 25,6% em relação a 2023 [52]. No Brasil, a participação ainda é modesta, mas crescente. Em 2024, a frota veicular brasileira atingiu 123,97 milhões, sendo cerca de 170 mil VEs emplacados, dos quais mais de 70% eram BEVs ou PHEVs. O número de eletropostos cresceu de 4,3 mil para 12,1 mil entre 2023 e 2024 [53].

Esse avanço reflete a articulação entre o setor privado e as políticas públicas. A engenharia elétrica desempenha papel essencial ao desenvolver carregadores rápidos (DC) e ultrarrápidos. Para carregar 80% da bateria em 30 minutos, são necessárias potências de até 100 kW por ponto de recarga. Exemplos como o EFAPOWER EV QC 45, instalado em Vitória-ES, demandam planejamento adequado da rede elétrica para absorver a carga adicional [54].

A integração em larga escala dos VEs pode gerar impactos como sobrecargas, quedas de tensão e distorções harmônicas. Por outro lado, abre oportunidades como a gestão inteligente da demanda, a aplicação de soluções V2G (*Vehicle-to-Grid*), melhoria na qualidade da energia e sinergia com fontes renováveis [54].

Capitais brasileiras têm implementado iniciativas para eletrificar o transporte coletivo. Em São Paulo, o orçamento de 2025 destinou R\$ 2,5 bilhões à eletrificação da frota de ônibus, com decreto municipal exigindo comprovação de viabilidade econômica. A SPTrans prevê a entrega de 100 novos ônibus elétricos no primeiro semestre de 2025. Em Curitiba, um projeto de lei sancionado prevê a aquisição de 70 ônibus elétricos com investimento de R\$ 317 milhões, com operação prevista para iniciar em 2024. Emendas viabilizam receitas extra tarifárias, como publicidade, para reduzir os custos operacionais [55].

Essas iniciativas demonstram o papel ativo dos governos locais na transição energética, com apoio da engenharia

elétrica para especificação técnica, integração à infraestrutura existente e avaliação de viabilidade [53, 55].

f. Eficiência Energética no Brasil

A eficiência energética é um pilar estratégico da transição energética brasileira, com impacto direto na redução da demanda, da tarifa e das emissões. O Programa de Eficiência Energética (PEE), regulado pela ANEEL, exige que distribuidoras invistam 0,5% da receita operacional líquida em projetos de eficiência. Com cerca de R\$ 570 milhões aplicados anualmente, o programa apoiou 1.485 projetos entre 2008 e 2022, gerando 1.776 GWh/ano em economia [56].

Casos de destaque incluem o Pequeno Cotelengo (Curitiba), que reduziu 40% do consumo com energia solar, e várias indústrias que modernizaram iluminação, motores e sistemas de climatização, alcançando economias de 20% a 50%. Em edifícios comerciais, medidas como sensores, HVAC eficientes e gestão automatizada têm gerado resultados consistentes [50, 57].

No setor privado, o Grupo Casas Bahia economizou mais de R\$ 2 milhões/ano com sistemas eficientes em Jundiaí (SP), reduzindo 45% do consumo (6,5 GWh) e 270 tCO₂. A Ecogen opera a maior planta de cogeração em edifício comercial do país [56]. A padaria Kim Pães alcançou 27% de economia em iluminação e R\$ 50 mil/ano. PMEs apoiadas pelo PotencializEE também apresentaram retornos rápidos [58].

Tecnologias digitais como BMS, IoT, IA e Big Data ampliam a eficiência, permitindo controle em tempo real e tomada de decisão baseada em dados. Segundo projeções da IEA, essas soluções podem reduzir o consumo energético de edifícios em até 10% entre 2017 e 2040 [59].

Portanto, a engenharia elétrica desempenha papel central na concepção, execução e avaliação técnica desses projetos, contribuindo com conhecimento em sistemas de potência, conversores eletrônicos, controle e instrumentação para uma matriz elétrica mais eficiente e sustentável.

IV. DESAFIOS E OPORTUNIDADE NO BRASIL

A transição energética brasileira enfrenta barreiras significativas, como custos elevados de tecnologias críticas, deficiências tecnológicas em regiões isoladas e déficit de mão de obra especializada. Simultaneamente, o país dispõe de vantagens competitivas substanciais, com elevado potencial solar, políticas públicas de eficiência energética e crescente oportunidade de exportação de tecnologia renovável.

a. Desafios

Um dos principais desafios da transição energética no Brasil é o alto custo e a ausência de um marco regulatório para o armazenamento de energia (*BESS – Battery Energy Storage Systems*). Apesar da queda de 85% nos preços das baterias de íon-lítio entre 2010 e 2023, atingindo cerca de US\$ 115/kWh em 2024, a elevada carga tributária, que pode chegar a 85% do valor do produto, torna projetos economicamente inviáveis [60]. Além disso, a consulta pública da ANEEL (CP 39/2023) e a falta de leilões

específicos para baterias criam insegurança jurídica e atrasam a adoção em larga escala. Estima-se que as perdas associadas ao *curtailment* já somam R\$ 4,8 bilhões desde 2020, montante que poderia ser mitigado pelo uso de armazenamento [61].

A intermitência das fontes renováveis e a limitação da infraestrutura de transmissão também são críticas. A concentração da geração solar e eólica no Nordeste, distante dos centros consumidores, levou o ONS a restringir até 28% da geração solar centralizada. Projeções indicam que o *curtailment* poderá atingir média de 8% no país até 2035, chegando a 11% no Nordeste [61]. Essa restrição já ocasionou fechamento de fábricas e a perda de cerca de 11 mil empregos entre 2024 e 2025, evidenciando graves impactos socioeconômicos.

Outro ponto central é a falta de mão de obra especializada. Apesar de programas como os do SENAI em hidrogênio verde e iniciativas-piloto de eólica *offshore*, a capacitação ainda é insuficiente. A Siemens Energy, por exemplo, destacou a escassez de engenheiros e técnicos qualificados para atuar em tecnologias emergentes [62]. Sem ampliar a formação em áreas como redes inteligentes, mobilidade elétrica e armazenamento, a inovação e a expansão da matriz limpa podem ser comprometidas.

b. Oportunidades

O Brasil apresenta oportunidades estratégicas na transição energética, com destaque para o potencial solar, políticas de eficiência energética e exportação de *know-how* em renováveis. A energia solar é o recurso mais promissor: a capacidade instalada superou 53,9 GW em fevereiro de 2025, representando 21,9% da matriz elétrica e posicionando o país entre os cinco maiores produtores mundiais. O Atlas Solar Brasileiro registra irradiação média entre 4.500 e 6.300 Wh/m², superior a países líderes como a Alemanha que apresenta cerca de 3.500 Wh/m². Essa abundância, aliada à queda dos custos dos equipamentos, sustenta previsões de expansão acelerada e investimentos acima de US\$ 8 bilhões em 2024 [63].

A eficiência energética também é um vetor essencial. O (PEE) da ANEEL mobiliza cerca de R\$ 570 milhões anuais e, entre 2008 e 2022, financiou 1.485 projetos que economizaram aproximadamente 1.776 MWh/ano. No acumulado de 1998 a 2019, políticas públicas evitaram 63,6 TWh de consumo e reduziram 2,8 GW da demanda de ponta [64]. Além do impacto econômico, os programas beneficiam consumidores de baixa renda e promovem inovação em setores como iluminação eficiente, sistemas HVAC e gestão digital de energia [65].

Por fim, o país tem potencial de exportar tecnologia em renováveis. A experiência consolidada em hidrelétricas e biocombustíveis já conferiu ao Brasil reconhecimento internacional, e novos segmentos como solar, eólica, biomassa e hidrogênio verde ampliam essa perspectiva. Projetos em Minas Gerais (hidrogênio verde) e no Nordeste (eólica *offshore*) evidenciam capacidade de liderança tecnológica. Essa inserção pode gerar empregos de alta qualificação e fortalecer a posição brasileira na cadeia global de inovação energética [63].



Figura 6: Complexo Eólico Lagoa do Barro (PI) [68].

V. ESTUDOS DE CASOS NO BRASIL

A transição energética no Brasil é marcada por projetos inovadores que demonstram a aplicação da engenharia elétrica na modernização e diversificação da matriz energética. Estes casos ilustram avanços na geração de energia renovável em larga escala, redes inteligentes e eficiência energética urbana. A seguir, três exemplos notáveis evidenciam as contribuições da engenharia elétrica neste contexto transformador.

a. Complexo Eólico Lagoa do Barro (PI)

O Complexo Eólico Lagoa do Barro, no Piauí, apresentado na Figura 6, é um marco na geração eólica brasileira. Iniciou operações em 2018 com 195 MW de potência, gerados por 65 aerogeradores em 2.854 hectares [66, 67]. Em 2021, uma expansão adicionou 18 aerogeradores e 82,8 MW, elevando a capacidade total para 277,8 MW com 83 aerogeradores [66, 67]. O investimento de R\$ 444 milhões nesta expansão consolidou-o como o maior empreendimento da CGNBE em potência e investimento [66].

Este projeto, da Atlantic Energias Renováveis em parceria com a Acciona Energia e operado pela CGN Brasil, aproveita o alto potencial eólico do Nordeste. A engenharia elétrica foi crucial no dimensionamento, instalação e integração dos aerogeradores à rede nacional. Complexos eólicos de grande porte na região podem gerar mais de 3,3 TWh anualmente [67].

O sucesso do Complexo Lagoa do Barro reside na sua capacidade de geração e no impacto socioeconômico regional característico, impulsionando o desenvolvimento e a modernização tecnológica [66].

b. Usina Solar de Pirapora (MG)

A Usina Solar de Pirapora, em Minas Gerais, é um dos maiores projetos fotovoltaicos da América Latina, com capacidade instalada de 400 MWp [69, 70]. Operada pela EDF Renewables, a usina iniciou operações em 2017, utilizando mais de um milhão de painéis solares em 800 hectares, capazes de abastecer cerca de 420 mil residências anualmente [69, 71].

O investimento total superou R\$ 2 bilhões, com financiamento do BNDES e BNB, sendo a fabricação local dos painéis em São Paulo uma condição para o apoio do



Figura 7: Usina Solar de Pirapora (MG) [72].



Figura 8: Smart Grid em Búzios (RJ) [76].

BNDES [69, 71]. A engenharia elétrica foi essencial no projeto e instalação dos painéis, sistemas de rastreamento solar para maximizar a captação de energia e integração à rede. Mesmo em dias nublados, a produção se mantém cerca de 70% da capacidade [69]. A Atlas Renewables Energy também contribui com projetos como o complexo Lar do Sol, representado na Figura 7, com capacidade de 505 MWac e 579 MWdc, expandindo a energia solar na região [70].

c. Smart Grid em Búzios (RJ)

O projeto *Smart Grid* em Búzios, RJ, pioneiro na modernização da rede elétrica e em cidades inteligentes na América Latina, foi liderado pela Ampla (atual Enel). Visava transformar Búzios, Figura 8, na primeira cidade inteligente da região, com foco em sustentabilidade e eficiência energética [73, 74, 75].

Iniciado em 2011 com R\$ 40 milhões de investimento, o projeto, uma parceria entre Ampla, ANEEL e empresas, instalou medidores inteligentes em domicílios, permitindo monitoramento e gestão eficiente do consumo. Esses medidores viabilizam tarifas horárias e medição bidirecional para geração distribuída, incentivando a produção de energia por moradores [74, 75].

A engenharia elétrica foi central, com oito blocos de trabalho, incluindo Medição Eletrônica Inteligente, Automação de Rede, Veículos Elétricos, Iluminação Pública Eficiente e Geração Distribuída [73]. A iluminação pública com lâmpadas LED e controle remoto reduziu o consumo em 60%, com potencial para 80% [74].

A frota de veículos elétricos, incluindo carros e bicicletas para a Guarda Municipal, e eletropostos, demonstra a abrangência das soluções [73, 74]. O projeto foi reconhecido pela KPMG como um dos dez mais inovadores em infraestrutura sustentável globalmente [74].

VI. CONCLUSÕES

A transição energética não é apenas uma resposta às mudanças climáticas é uma oportunidade histórica de redefinir o modelo de desenvolvimento do Brasil. Este trabalho demonstrou que a Engenharia Elétrica é protagonista nesse processo, articulando inovação tecnológica, eficiência operacional e sustentabilidade ambiental. Ao integrar fontes renováveis, automatizar sistemas, expandir redes inteligentes e viabilizar soluções de armazenamento, a engenharia elétrica transforma desafios em soluções concretas.

O Brasil possui uma matriz elétrica exemplar, com mais de 89% de geração renovável, e avança rapidamente na diversificação de fontes e na modernização da infraestrutura. A convergência entre energia e telecomunicações, por meio de redes ópticas, IoT e inteligência artificial, fortalece a resiliência do sistema e amplia a capacidade de resposta a variações de demanda e geração. Casos de sucesso em geração distribuída, eletrificação de transportes e automação urbana comprovam que a transição energética já está em curso e é viável.

No entanto, é preciso reconhecer as limitações da análise econômica, especialmente no que se refere à estimativa de *payback*. O acesso a dados financeiros, como o valor pago ou contratado por kWh, envolve questões sensíveis e restritas às empresas do setor. Por isso, este estudo adotou o consumo específico (kWh/m³ ou kWh por unidade gerada) como métrica técnica confiável, capaz de refletir ganhos reais de eficiência energética, independentemente da modalidade de contratação ou das fontes envolvidas.

Diante desse cenário, é hora de transformar potencial em política, inovação em impacto. Recomenda-se o fortalecimento de programas de pesquisa e desenvolvimento (P&D), a capacitação técnica de profissionais, a ampliação de incentivos para tecnologias limpas e a criação de ambientes regulatórios que favoreçam a geração distribuída, o armazenamento e a digitalização da rede. A Engenharia Elétrica deve ser vista não apenas como suporte técnico, mas como vetor estratégico de transformação.

REFERÊNCIAS

- [1] GIZ, “Energy transition in brazil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/SCr87>
- [2] PETROBRAS, “Tudo sobre transição energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/MzYAz>
- [3] 123 ECOS, “Transição energética: caminhos para o futuro,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/yJxKW>
- [4] NEOENERGIA, “Transição energética no brasil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/emYgc>
- [5] ANEEL, “Programa de eficiência energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/AomQO>
- [6] MME, “Transição energética: a mudança que o planeta precisa,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/RPzFZ>
- [7] ATLAS RENEWABLE ENERGY, “Transição energética no brasil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/BXOPg>
- [8] ECHO ENERGIA, “Transição energética no brasil,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/DljsT>
- [9] IBERDROLA, “Redes elétricas e transição energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/S6Kpg>
- [10] FI-GROUP, “O papel das novas tecnologias na transição energética,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/YNZDZ>
- [11] ENERGIA DO FUTURO, “Projeto sistemas de energia do futuro,” 2025, acesso em: 14 out. 2025. [Online]. Available: <https://energiadofuturo.org.br/>
- [12] BRASIL ENERGIA, “Infraestrutura de telecomunicações no setor elétrico,” 2025, acesso em: 11 mar. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/Kkyej>
- [13] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS), “Plano da operação elétrica de médio prazo do sin (par/pel 2024): Ciclo 2025–2029, sumário executivo,” ONS, Brasília, DF, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/uRlTI>
- [14] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), “Matriz elétrica brasileira alcança 200 gw,” ANEEL, Brasília, DF, Tech. Rep., Mar. 2024, publicado em: 07 mar. 2024. Acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/jhrkk>
- [15] M. F. B. d. Oliveira and E. P. d. Rocha, “Análise dos impactos da lei n° 14.300/2022 no setor fotovoltaico de microgeração distribuída,” in *Anais do Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2022, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/BnkcA>
- [16] S. C. B. Vieira, “Tratamento de dados do programa de eficiência energética no estado do tocantins,” Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Elétrica). Orientador: Alcy Monteiro Júnior, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 2023.
- [17] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Matriz energética e elétrica,” EPE, Rio de Janeiro, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/LDrx3>
- [18] —, “Balanço energético nacional 2024: Ano base 2023. relatório síntese,” EPE, Rio de Janeiro, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/nXRVW>
- [19] J. R. d. F. Rodrigues *et al.*, “Transição energética e geração de energia solar fotovoltaica: revisão sistemática do panorama nacional e internacional,” *Revista OKARA: Geografia em debate*, vol. 18, no. 1, pp. 151–176, 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/ICpIJ>
- [20] RAÍZEN, “Matriz energética brasileira: o que é e do que é composta,” São Paulo, Apr. 2023, publicado em: 14 abr. 2023. Acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/uBCik>
- [21] BRASIL. Secretaria de Comunicação Social, “Matriz elétrica brasileira registra maior expansão da história em 2024,” SECOM, Brasília, DF, Tech. Rep., Jan. 2025, publicado em: 10 jan. 2025. Acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/PUqMt>
- [22] L. N. d. Silva, “Transição energética em sistemas de distribuição de energia elétrica: um estudo de caso com foco na inserção de recursos energéticos distribuídos,” Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Gestão de Energia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tramandaí, 2022.
- [23] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), “Aneel aprova quotas de custeio e energia elétrica do proinfa para 2025 com custo médio de r\$ 543,56/mwh,” ANEEL, Brasília, Tech. Rep., 2024, acesso em: 04 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/KspJw>
- [24] T. P. M. d. Oliveira, “Potencial inclusivo da energia solar: análise dos aspectos jurídicos,” Master’s thesis, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2018, dissertação (Mestrado em Direito Político e Econômico). Acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/ggvxsx>

- [25] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Fact sheet: Sistemas isolados,” EPE, Brasília, DF, Tech. Rep., 2024, acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/kYMuS>
- [26] G. D. d. O. Rolim, L. J. Petribú, V. P. Perruci, L. H. C. Medeiros, and A. Costa, “Uma análise estatística com emprego de técnicas de regressão linear múltipla para a suavização da variabilidade da geração solar fotovoltaica em larga escala conectada ao sistema interligado nacional (sin),” in *Congresso Brasileiro de Energia Solar (CBENS)*. Gramado: Associação Brasileira de Energia Solar (ABENS), 2018, acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/hVWja>
- [27] L. D. O. Altoé Filho, “Proposição de critério de incentivo à energia renovável e eficiência energética para as leis de icms ecológico no brasil,” *Revista da Madeira*, vol. 17, no. 2, pp. 1–20, 2022, acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/UyGbV>
- [28] A. d. S. Nascimento, “Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro,” Master’s thesis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015, dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/TjWFJ>
- [29] INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA), “Exclusão elétrica na amazônia legal: quem ainda está no escuro?” IEMA, São Paulo, Tech. Rep., 2021, acesso em: 05 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/LXiWG>
- [30] SOLFUS, “O que são sistemas isolados?” Rio de Janeiro, 2024, acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/hXotM>
- [31] CENÁRIO ENERGIA, “Epe avalia benefícios econômicos da interligação de localidades isoladas no amazonas para e acre,” João Pessoa, Jul. 2024, publicado em: 24 jul. 2024. Acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/ZhVwS>
- [32] ISA ENERGIA BRASIL, “Transição energética – apresentação,” 2025, acesso em: 08 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/tQUoG>
- [33] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA (ABSOLAR), “Brasil alcança marco histórico em energia solar e pernambuco amplia participação,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kbCIJM>
- [34] TRIBUNAL DO NORTE, “Com 13 novos parques em 2024, rn gera 32% da energia eólica no país,” 2025. [Online]. Available: <https://bit.ly/43hJJxr>
- [35] LA SOLAR, “Energia solar bate recordes de expansão no brasil em 2024,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/3H5OHES>
- [36] C. S. Ramos, “Cogeração de biomassa terá maior acréscimo em 10 anos,” *Globo Rural*, 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kcQYwz>
- [37] AGRIMÍDIA, “Nova usina de biomassa de cana com início previsto para 2024 no estado de são paulo,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4jqFnZz>
- [38] D. A. Carneiro and R. Menescal, “A força das pchs - um potencial a ser destravado,” *MegaWhat*, 2025. [Online]. Available: <https://bit.ly/4KEHbPK>
- [39] J. P. R. Silva *et al.*, “Análise da viabilidade econômica de pequenas centrais hidrelétricas (pchs) considerando incertezas,” *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, vol. 12, 2023.
- [40] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Plano decenal de expansão de energia 2034,” EPE, Tech. Rep., 2024.
- [41] AGÊNCIA CENÁRIO ENERGIA, “Investimento bilionário leva energia limpa e sustentável às comunidades isoladas da amazônia,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/45oFVf6>
- [42] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE SOLUÇÕES DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA (ABSAE), “Contribuição para o pde 2034,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4kFTm7>
- [43] INSTITUTO ACENDE BRASIL, “White paper nº 31: Armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro,” 2024. [Online]. Available: <https://bit.ly/4dzmBxT>
- [44] B. C. d. Silva, F. J. M. d. Albuquerque, and M. P. Ludwig, “Smart grid e smart cities: uma análise bibliométrica da produção científica brasileira,” *Cadernos de Prospecção*, vol. 14, no. 1, pp. 144–163, 2021.
- [45] B. Moreira, “Cidades inteligentes: o futuro do smart grid no brasil,” *O Setor Elétrico*, Nov. 2014, publicado em: 19 nov. 2014. Acesso em: 26 maio 2025.
- [46] VIVA SETE LAGOAS, “Lagoa da boa vista: oásis de diversão e natureza em sete lagoas,” VIVA SETE LAGOAS, s.d., acesso em: 14 out. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/PoMBq>
- [47] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE), “Diagnóstico regional – pde 2033 – volume iii – get centro-oeste,” EPE, Brasília, Tech. Rep., 2024. [Online]. Available: <https://shre.ink/etsh>
- [48] —, “Avaliação de modelos regulatórios para implantação de sistemas de medição inteligentes no sistema de distribuição brasileiro,” EPE, Brasília, Tech. Rep., 2024.
- [49] G. B. A. Lima, D. Simões, and J. A. P. d. Oliveira, “Cidades inteligentes: mapeamento da produção científica brasileira e internacional,” *Cadernos EBAPE.BR*, vol. 18, no. 1, pp. 138–155, 2020, acesso em: 25 maio 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/etWH>
- [50] P. d. Siqueira, “Projeto de eficiência energética,” OMS Engenharia, Aug. 2021, publicado em: 24 ago. 2021. Acesso em: 26 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/KeYov>
- [51] CODEX UTILITIES, “Perdas técnicas de energia: causas, tipos e estratégias de mitigação,” *Blog*, Jun. 2025, publicado em: 02 jun. 2025. Acesso em: 25 maio 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/etstv>
- [52] H. Rodríguez, “Vendas de evs e phevs cresceram no mundo todo em 2024, exceto na europa,” *Quatro Rodas*, Jan. 2025, publicado em: 17 jan. 2025. Acesso em: 02 jun. 2025. [Online]. Available: <https://encurtador.com.br/ny9Lh>
- [53] R. F. Orfo Júnior and V. I. Hara, “Avaliação dos impactos de veículos elétricos na rede elétrica da concessionária,” Master’s thesis, Universidade Federal de São Paulo, Santos, 2023, trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Petróleo e Recursos Renováveis).
- [54] L. M. d. Souza, R. B. d. Santos, O. G. Simoes, W. D. Casagrande, and A. L. Pereira, “Análise do perfil de carregamento dos veículos elétricos,” 2025, artigo científico.
- [55] DIÁRIO DO TRANSPORTE, “Financiamento de ônibus elétricos na cidade de são paulo pode ser mudado com decreto de nunes,” São Paulo, Jan. 2025, publicado em: 20 jan. 2025. Acesso em: 26 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/jFOxK>
- [56] ECOGEN BRASIL, “Maior planta de cogeração em edifício comercial do brasil,” 2024, acesso em: 07 mar. 2024. [Online]. Available: <https://abrir.link/BOAWD>
- [57] GREENYELLOW, “Eficiência energética na indústria,” 2024, acesso em: 14 maio 2024. [Online]. Available: <https://abrir.link/fyLLi>
- [58] POTENCIALIZEE, “Cases de sucesso do potencializee: conheça três empresas que implementaram eficiência energética por meio do programa,” 2024, acesso em: 2024. [Online]. Available: <https://abrir.link/fhSWS>
- [59] INATEL, “Automação e eficiência energética: transformando indústrias com tecnologia inteligente,” 2025, acesso em: 21 maio 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/UogdA>
- [60] O SETOR ELÉTRICO, “Redução de custos de baterias abre novos caminhos para a energia renovável no brasil,” Dec. 2024, publicado em: 18 dez. 2024.
- [61] BLOOMBERG LÍNEA, “Com excesso de energia, setor eólico e solar no brasil enfrenta crise sem precedente,” *Bloomberg Línea*, Jun. 2025, publicado em: 25 jun. 2025.
- [62] S. Schuck, “Siemens energy lança programa de capacitação em transição energética na amazônia,” *Exame ESG*, Aug. 2025, publicado em: 05 ago. 2025.
- [63] ABSOLAR, “Associação brasileira de energia solar fotovoltaica. dados do setor solar brasileiro,” São Paulo, 2025, acesso em: 30 ago. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/tcRB>
- [64] REUTERS, “Brasil lidera projetos solares em pré-construção na américa latina,” *Reuters*, 2024, acesso em: 30 ago. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/YmCIr/>

- [65] PROCEL, “Programa nacional de conservação de energia elétrica. balanço energético 2023,” Eletrobras/Procel, Tech. Rep., 2023, acesso em: 29 ago. 2025. [Online]. Available: <https://abrir.link/YHHJ/>
- [66] CGNBE, “Complexo eólico lagoa do barro,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQc>
- [67] INFOMONEY, “Enel inicia operação comercial no piauí de parque eólico de r\$ 3 bilhões, o maior da américa do sul,” InfoMoney, Jun. 2021, publicado em: 10 jun. 2021. Acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQn>
- [68] CORTEZ ENGENHARIA, “Complexo eólico lagoa do barro,” 2025, acesso em: 07 out. 2025. [Online]. Available: <https://cortezengenharia.com.br/lagoa-do-barro/>
- [69] FRANCE PRESSE, “Conheça a maior usina de energia solar da américa latina, em pirapora,” G1, Nov. 2017, publicado em: 10 nov. 2017. Acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQ1>
- [70] EDF RENEWABLES, “Solar energy,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAk4>
- [71] SOLIS ENERGIA, “Usina fotovoltaica em pirapora, mg,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAkV>
- [72] HITECH VIDEO PRODUTORA, “Institucional wamag - usina solar pirapora mg,” 2019, vídeo (12 min 9 s). Acesso em: 07 out. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SIMM>
- [73] N. M. C. A. A. Vilaça *et al.*, “Smart city – caso da implantaÇÃo em búzios,” *Revista SODEBRAS*, vol. 9, no. 98, Feb. 2014, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAQT>
- [74] O GLOBO, “Búzios torna-se primeira cidade inteligente da américa latina,” O Globo, Nov. 2012, publicado em: 21 nov. 2012. Acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAkE>
- [75] ENEL, “Inovação e sustentabilidade em búzios,” 2025, acesso em: 21 set. 2025. [Online]. Available: <https://shre.ink/SAkz>
- [76] ARETÊ VENDAS, “Aretê búzios - condomínio de casas e terrenos - preços aqui!” 2025, acesso em: 07 out. 2025. [Online]. Available: <https://aretevendas.com/>

O uso de Beacons Bluetooth Low Energy (BLE) para frequência na escola Superior da Magistratura Tocantinense (ESMAT)

The use of Bluetooth Low Energy (BLE) Beacons for attendance at the Superior da Magistratura Tocantinense school (ESMAT)

Luiz Carlos Porto do Carmo¹ e Edeilson Milhomem da Silva¹

¹ Universidade Federal do Tocantins, Ciência da Computação, Tocantins, Brasil

Data de recebimento do manuscrito: 04/02/2026

Data de aceitação do manuscrito: 07/04/2026

Data de publicação: 14/04/2026

Resumo— Com o avanço da Internet das Coisas (IoT), a tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) tem se destacado como uma alternativa eficiente para automação baseada em proximidade. Este artigo propõe e valida um modelo arquitetural para o controle automatizado de frequência acadêmica utilizando beacons BLE. A solução integra um aplicativo móvel e uma API RESTful ao sistema da Secretaria Acadêmica Virtual da Escola Superior da Magistratura Tocantinense (ESMAT). Os experimentos realizados em ambiente controlado demonstraram baixa latência na detecção de presença, consumo energético reduzido e viabilidade técnica para implantação institucional. O modelo proposto contribui para a modernização dos processos acadêmicos ao reduzir intervenções manuais e aumentar a confiabilidade dos registros de frequência.

Palavras-chave—Bluetooth Low Energy, beacons BLE, controle de frequência, aplicação móvel, sistemas acadêmicos

Abstract— Driven by advancements in the Internet of Things (IoT), Bluetooth Low Energy (BLE) technology has emerged as a highly effective solution for proximity-based automation. This paper proposes and validates an architectural model for automated academic attendance tracking using BLE beacons. The solution seamlessly integrates a mobile application and a RESTful API into the Academic Virtual Secretariat of the Escola Superior da Magistratura Tocantinense (ESMAT). Experimental results from a controlled environment demonstrate low detection latency, minimal energy consumption, and strong technical feasibility for institutional deployment. Ultimately, the proposed model modernizes academic management by reducing manual interventions and enhancing data reliability.

Keywords—Bluetooth Low Energy, BLE beacons, attendance control, mobile application, academic systems

I. INTRODUÇÃO

O controle de frequência acadêmica é uma atividade essencial para instituições de ensino, pois impacta diretamente a gestão pedagógica, a avaliação discente e a conformidade normativa. Tradicionalmente, esse processo é realizado de forma manual ou semiautomatizada, por meio de listas de chamada, leitura de QR Codes ou digitação de identificadores pessoais, métodos que se mostram suscetíveis a falhas humanas, atrasos operacionais e inconsistências nos dados registrados.

Com o crescimento das soluções baseadas em Internet das Coisas (IoT), novas abordagens têm sido exploradas para automatizar processos institucionais. Nesse cenário, a

evolução do protocolo Bluetooth, especialmente em sua versão Low Energy (BLE), consolidou-se como um pilar central para a conectividade em ecossistemas de IoT, facilitando a automação em larga escala devido à sua capacidade de operar com baixo consumo energético e custo reduzido KOULOURAS et al., 2025 [1]. O uso de beacons BLE destaca-se por permitir a detecção de dispositivos móveis em um raio controlado, mostrando-se particularmente promissor em ambientes internos, como salas de aula, onde a proximidade física pode ser utilizada como critério confiável e transparente para o registro de presença.

Este trabalho propõe um modelo arquitetural para o controle automatizado de frequência acadêmica utilizando beacons BLE, integrando um aplicativo móvel e uma API RESTful ao sistema da Secretaria Acadêmica Virtual (SAV) da Escola Superior da Magistratura Tocantinense (ESMAT).

O objetivo é validar a viabilidade técnica da solução por meio de um protótipo funcional, avaliando indicadores de desempenho, consumo energético e a eficácia da integração com os fluxos acadêmicos já existentes na instituição.

II. TRABALHOS RELACIONADOS

A literatura acadêmica apresenta diversas iniciativas que exploram a tecnologia Bluetooth Low Energy (BLE) para modernizar processos educacionais, focando especialmente em automação e localização indoor. Recentemente, Alvarez-Merino et al. (2023) [2] exploraram o uso de IPS (Indoor Positioning Systems) no contexto da Educação Inteligente, destacando como a localização pode servir de base para serviços responsivos e integrados no campus.

O estudo de Degini (2018) [3] descreve um sistema implementado no Instituto Federal de São Paulo (IFSP) que utiliza beacons BLE para automatizar o registro de presença de forma transparente aos usuários. O trabalho destacou que o consumo energético nos dispositivos móveis foi inferior a 1% por período letivo, comprovando a viabilidade da tecnologia para uso contínuo. Enquanto o estudo de Degini focou na implementação técnica isolada, a presente proposta avança ao integrar a detecção via BLE à Secretaria Acadêmica Virtual (SAV) da ESMAT, alinhando a solução às demandas operacionais institucionais.

Ferreira e Antunes (2022) [4] investigaram o uso de gateways e beacons para o rastreamento de pessoas em ambientes fechados utilizando trilateração baseada em RSSI (Received Signal Strength Indicator). O sistema utilizou o protocolo MQTT para garantir a leveza na comunicação entre dispositivos embarcados e servidores, obtendo precisão satisfatória em áreas com baixa interferência. Esses fundamentos técnicos apoiam a decisão deste trabalho de utilizar a detecção de proximidade como critério de presença, sem a necessidade de algoritmos complexos de posicionamento absoluto.

Na Tailândia, Puckdeevongs et al. (2020) desenvolveram um sistema na Universidade de Rangsit baseado em técnicas de fingerprinting de RSSI. Os resultados demonstraram que a tecnologia BLE mantém uma precisão aceitável mesmo em ambientes com alta interferência de sinal, típicos de salas de aula densamente ocupadas. Complementarmente, revisões contemporâneas como a de Al-Shareeda et al. (2023) [5] reforçam que o BLE é uma das tecnologias mais promissoras para a IoT, embora ressaltem que desafios de segurança e privacidade continuam sendo questões abertas e críticas para a área.

Rebonatto et al. (2020) [6] demonstraram o uso de beacons para a distribuição automatizada de conteúdo digital na Universidade de Passo Fundo. O sistema utilizava a localização física do aluno como gatilho para o envio de materiais acadêmicos e avisos contextuais, mostrando eficácia inclusive em áreas externas do campus. Essa abordagem reforça o potencial dos dispositivos móveis dos discentes como recursos viáveis para a implementação de soluções baseadas em contexto.

Melo (2017) [7] propôs o uso de plataformas Arduino integradas a módulos BLE para o mapeamento e acompanhamento de aulas na Universidade Federal do Ceará. O estudo ressaltou como a conectividade entre

sensores e dispositivos móveis pode gerar dados analíticos sobre padrões de assiduidade e tempo médio de permanência em sala.

Em suma, as pesquisas analisadas confirmam que o BLE é uma solução eficaz para automação em ambientes fechados devido ao seu baixo custo e eficiência energética. A proposta deste artigo se posiciona como um desdobramento prático dessas soluções, integrando a detecção automática aos fluxos acadêmicos reais da ESMAT.

III. METODOLOGIA

A pesquisa é classificada como aplicada, de natureza quali-quantitativa, com caráter exploratório e descritivo. O desenvolvimento da solução foi fundamentado nos princípios da Engenharia de Software, adotando o Ciclo de Vida de Desenvolvimento de Software (SDLC) sob uma abordagem iterativa e incremental.

a. Considerações Éticas e Proteção de Dados (LGPD)

O projeto foi concebido em conformidade estrita com a Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD) — Lei nº 13.709/2018. Para assegurar a privacidade de docentes e discentes, o tratamento de dados baseou-se nos princípios de finalidade, adequação e necessidade, coletando apenas informações essenciais para a gestão da frequência acadêmica. Foram implementadas medidas de segurança como o controle rigoroso de acesso, criptografia e a priorização de mecanismos de pseudonimização de identificadores.

b. Etapas de Desenvolvimento

processo de engenharia foi dividido em quatro fases interdependentes:

- **Análise de Requisitos:** Realizou-se o mapeamento do processo manual da Secretaria Acadêmica Virtual (SAV) da ESMAT, identificando falhas como filas excessivas e erros humanos no registro via QR Code ou CPF. Foram definidos requisitos funcionais (registro automático, visualização em tempo real) e não-funcionais (segurança via LGPD, baixo consumo de bateria e escalabilidade).
- **Planejamento e Design:** Definiu-se a arquitetura de Monólito Modular para garantir baixo acoplamento e facilidade de manutenção. As escolhas tecnológicas incluíram C# para o back-end, React Native para o mobile e o protocolo iBeacon para a detecção.
- **Desenvolvimento do Protótipo:** Implementou-se a API em .NET Core e a lógica de "Check-in Assistido" no aplicativo móvel. Nessa abordagem, o sistema valida automaticamente a proximidade via BLE, mas exige a confirmação consciente do aluno para evitar registros acidentais.
- **Testes Preliminares:** O protótipo foi submetido a seis categorias de testes em ambiente controlado: funcionais, de interface/usabilidade, de integração, de desempenho (latência e carga), de robustez e de segurança (autenticação e proteção de dados).

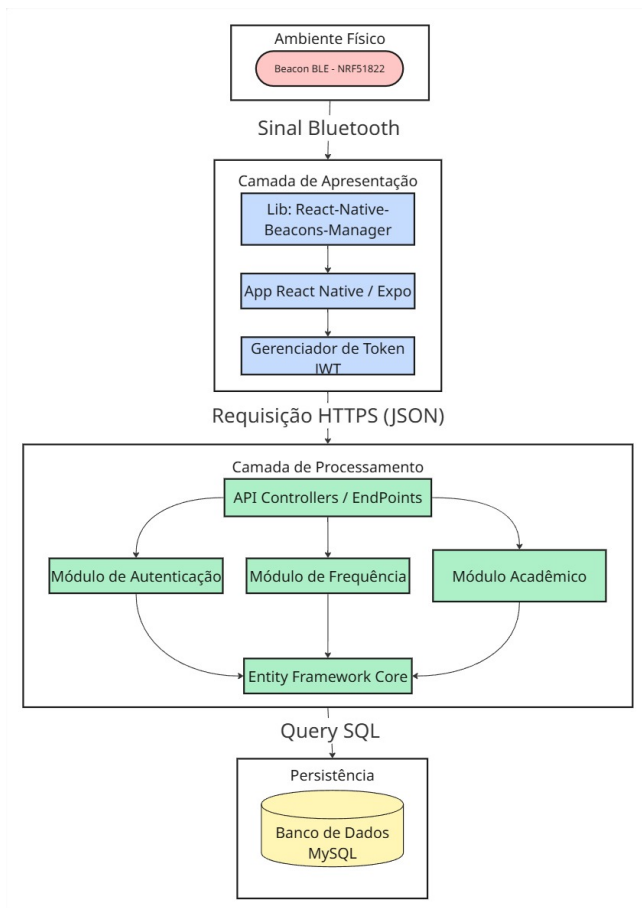


Figura 1: Visão geral da arquitetura técnica do sistema de controle de frequência baseado em BLE.

IV. ARQUITETURA DO SISTEMA PROPOSTO

O sistema é estruturado em camadas lógicas com o objetivo de separar a percepção do ambiente físico, a lógica de negócio e a persistência de dados. Essa abordagem arquitetural promove maior modularidade, facilitando a manutenção evolutiva e a escalabilidade dos componentes.

Conforme apresentado na Figura 1, a camada de percepção do ambiente físico é composta por dispositivos beacon BLE baseados no chipset NRF51822, operando sob o protocolo iBeacon. Esses dispositivos realizam transmissões periódicas no formato de *advertising*, permitindo que dispositivos móveis realizem a detecção passiva sem a necessidade de estabelecimento de conexão.

Na camada de apresentação, o aplicativo móvel desenvolvido em React Native, utilizando o framework Expo, emprega a biblioteca *react-native-beacons-manager* para realizar a varredura dos sinais BLE. O processo de detecção baseia-se na filtragem dos identificadores UUID, Major e Minor previamente configurados para cada ambiente físico, garantindo a correta associação entre o usuário e a sala de aula. Essa abordagem reduz significativamente o consumo energético, uma vez que utiliza escuta passiva dos pacotes BLE.

Após a validação local, os dados são transmitidos por meio de requisições HTTPS no formato JSON para a camada de processamento (Server-Side). A segurança da comunicação é assegurada pelo uso de criptografia via HTTPS e pela autenticação baseada em tokens JWT (*JSON*

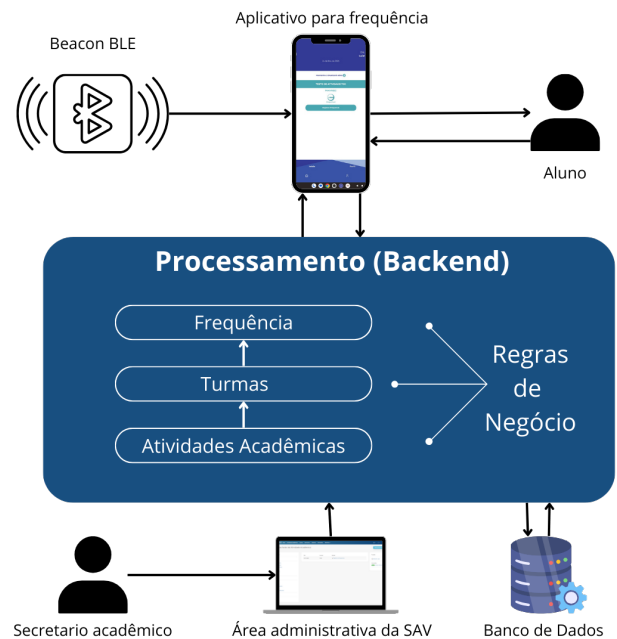


Figura 2: Fluxo de dados e componentes da camada de processamento (Backend).

Web Tokens), os quais encapsulam as informações de identificação e permissões do usuário, eliminando a necessidade de manutenção de sessões no servidor.

A camada de processamento adota o padrão arquitetural de Monólito Modular. Nessa abordagem, os módulos de Autenticação, Frequência e Integração Acadêmica são organizados de forma independente dentro da mesma aplicação .NET, comunicando-se de forma interna (*in-process*). Essa estratégia reduz a latência associada a chamadas distribuídas e simplifica o processo de implantação institucional.

O acesso à camada de persistência é realizado por meio do Entity Framework Core, responsável pelo mapeamento objeto-relacional e pela geração das consultas SQL. Os dados são armazenados em um banco de dados MySQL, garantindo consistência, integridade e disponibilidade das informações.

Complementarmente, a Figura 2 ilustra o fluxo interno da camada de processamento, evidenciando a organização da lógica de negócio em três componentes principais: Atividades Acadêmicas, Turmas e Frequência. Esses componentes representam abstrações centrais do domínio e estruturam o funcionamento do sistema.

- **Repositório de Atividades Acadêmicas (RAA):** mantém a coleção estruturada de todos os cursos e pós-graduações oferecidos, servindo como base padronizada para a criação de instâncias de ensino.
- **Repositório de Turmas (RT):** gerencia o vínculo logístico entre professores, alunos matriculados e as instâncias reais das disciplinas, incluindo carga horária e cronogramas.
- **Repositório de Frequência (RF):** unidade responsável por registrar a assiduidade individual. É alimentado em tempo real pelos dados coletados via beacons BLE, garantindo um controle de presença auditável e preciso.

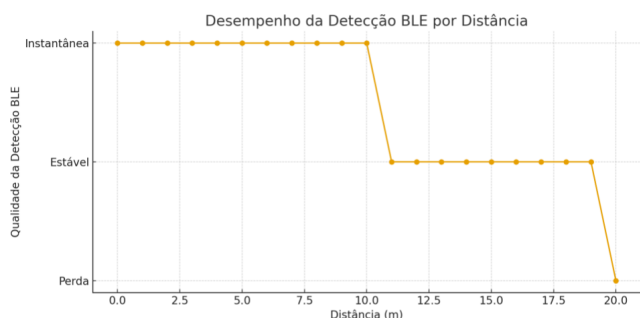


Figura 3: Gráfico da relação entre distância e tempo médio de detecção.

Este design adota uma estratégia de replicação de dados no RT no momento da criação da turma. Isso garante a integridade histórica e a fidelidade dos registros, assegurando que alterações futuras no cadastro oficial de atividades não afetem os dados de turmas já concluídas ou em andamento.

V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os testes técnicos foram realizados simulando as dimensões reais das salas de aula da ESMAT

a. Desempenho e Acurácia de Detecção

A escolha pelo Bluetooth Low Energy (BLE) em detrimento de outras tecnologias de localização indoor, como Wi-Fi ou UWB, justifica-se pela melhor relação entre custo, precisão e consumo de rádio para o contexto educacional. De acordo com Hailu e Guo (2024) [8], sistemas baseados em rádio frequência são ideais para ambientes institucionais por oferecerem alta adaptabilidade e baixo custo de manutenção. O gráfico apresentado na figura 3 detalha o desempenho observado:

Os testes confirmaram que a precisão do Bluetooth Low Energy é influenciada por variáveis ambientais. Segundo Yeh, Lin e Kuo (2023) [9], o BLE apresenta uma precisão média de 1 a 5 metros em condições ideais, mas sofre atenuação severa na presença de barreiras físicas e alta densidade de pessoas, o que explica a intermitência observada em distâncias superiores a 20 metros em ambientes com múltiplas paredes. Para solucionar a instabilidade inerente ao RSSI (Received Signal Strength Indicator), que é a métrica base para estimar a proximidade, o sistema implementou algoritmos de suavização digital. A aplicação da Média Móvel (SMITH, 1997) [10] e do Filtro de Kalman (KALMAN, 1960) [11] permitiu filtrar ruídos de sinal nos canais de rádio 37, 38 e 39, garantindo que o registro de frequência fosse acionado apenas em distâncias seguras de até 19 metros, validando a eficácia do protótipo em salas de aula típicas.

b. Consumo Energético e Carga

Um ponto crítico solicitado pelos revisores refere-se ao impacto no dispositivo do usuário. Em testes de campo de uma hora:

- Consumo de Bateria: O aplicativo utilizou apenas 2% da capacidade total da bateria do smartphone, sendo

superior a soluções baseadas em GPS.

- Teste de Carga: A API processou com sucesso o registro simultâneo de 10 dispositivos móveis sem aumento significativo na latência.
- Autonomia da Infraestrutura: Utilizando beacons com chip NRF51822 e bateria CR2032, a vida útil estimada é de 12 a 18 meses com intervalo de advertising de 350ms, cobrindo integralmente um ano letivo.

c. Síntese de Viabilidade

A matriz de síntese abaixo consolida o desempenho técnico do protótipo:

TABELA 1: AVALIAÇÃO DAS VARIÁVEIS DO SISTEMA

Variável	Classificação	Justificativa
Latência	Ótimo	Registro em tempo real (< 1s).
Consumo App	Ótimo	Impacto mínimo na autonomia do aluno.
Alcance	Bom	Estável até 19m, cobrindo salas padrão.
Resiliência	Razoável	Sinais sofrem atenuação em barreiras densas.

VI. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou e validou um modelo arquitetural para o controle automatizado de frequência acadêmica utilizando beacons Bluetooth Low Energy (BLE). Os resultados obtidos indicam que a solução é tecnicamente viável, energeticamente eficiente e adequada para integração com sistemas acadêmicos institucionais.

Apesar das limitações inerentes aos testes em ambiente controlado, o sistema demonstrou potencial para modernizar o processo de registro de presença na ESMAT, reduzindo falhas manuais e aumentando a confiabilidade dos dados. Como trabalhos futuros, recomenda-se a realização de um projeto-piloto em ambiente real e a execução de auditorias de segurança mais abrangentes antes da implantação definitiva.

REFERÊNCIAS

- [1] G. Koulouras *et al.*, "Evolution of bluetooth technology: Ble in the iot ecosystem," *Sensors*, vol. 25, no. 4, p. 996, 2025, destaca o papel central do BLE em diversas aplicações de IoT.
- [2] C. S. Alvarez-Merino, E. J. Khatib, A. T. Munoz, and R. Barco, "Exploring indoor localization for smart education," *arXiv preprint arXiv:2311.09815*, 2023. [Online]. Available: <https://arxiv.org/pdf/2311.09815>
- [3] L. P. M. Degini, "Uso de iot no ambiente educacional para controle de presença," Master's thesis, Instituto Federal de São Paulo (IFSP), 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.ifsp.edu.br/server/api/core/bitstreams/f335b2cc-4b29-4dc0-8cee-c284a34e5cb7/content>
- [4] B. M. B. Ferreira and W. P. C. Antunes, "Estudo e desenvolvimento de gateways e beacons ble para rastreamento de pessoas em ambientes fechados," *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, vol. 8, no. 4, p. 1329-1342, 2022. [Online]. Available: <https://periodicorease.pro.br/rease/article/view/5135>

- [5] M. Al-Shareeda, M. Ali, S. Manickam, and S. Karuppayah, "Bluetooth low energy for internet of things: review, challenges, and open issues," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 31, pp. 1182–1189, 08 2023.
- [6] M. T. Rebonatto, C. Eckstein, and C. S. Rebonatto, "Utilização de beacons em locais externos: um estudo em um campus universitário no sul do brasil," *SBC Proceedings*, 2020. [Online]. Available: <https://sol.sbc.org.br/index.php/sbcup/article/view/11219/11090>
- [7] E. C. A. d. Melo, "Salas de aula inteligentes: utilização de arduino e bluetooth low energy como beacons para o mapeamento de salas de aula," <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/24950>, 2017, acesso em: abr. 2025.
- [8] T. G. Hailu and X. Guo, "Theories and methods for indoor positioning systems: A comparative analysis, challenges, and prospective measures," *Sensors*, vol. 24, no. 6876, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/21/6876>
- [9] C.-H. Yeh, J.-Y. Lin, and W.-C. Kuo, "Indoor positioning system (ips) using ultra-wide bandwidth (uwb)," *Sensors*, vol. 23, no. 12, p. 5710, 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/12/5710>
- [10] S. W. Smith, *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing*. San Diego, CA: California Technical Publishing, 1997.
- [11] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.

Classificação de Documentos Jurídicos Utilizando IA Generativa: Uma Abordagem com RAG e Gemini

Legal Document Classification Using Generative AI: A Retrieval-Augmented Generation (RAG) and Gemini Approach

Ruan Dias Santana¹ e Marcelo Lisboa Rocha^{1,2}

¹ Universidade Federal do Tocantins, Ciência da Computação, Palmas, Tocantins, Brasil

² Universidade Federal do Tocantins, Inteligência Artificial, Palmas, Tocantins, Brasil

Data de recebimento do manuscrito: 25/12/2025

Data de aceitação do manuscrito: 26/04/2026

Data de publicação: 02/05/2026

Resumo— O Poder Judiciário brasileiro enfrenta um desafio crítico relacionado ao volume massivo de processos digitais, tornando a triagem manual onerosa e suscetível a erros. Este trabalho investiga a aplicação de Inteligência Artificial Generativa para automatizar a classificação de petições utilizando Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs). A pesquisa apresenta uma evolução metodológica em três etapas: (i) uma abordagem inicial baseada em *few-shot learning*, que estabeleceu uma linha de base de 56% de acurácia; (ii) o refinamento através de engenharia de *prompt* com N-grams e técnicas de Aumento de Dados para corrigir o desbalanceamento de classes, chegando a 85% de acurácia; e (iii) a implementação de uma arquitetura de Recuperação Aumentada por Geração (RAG), conectando o modelo Gemini 2.5 da Google a uma base de conhecimento vetorial, com uma acurácia de 84%. Os experimentos utilizaram dados reais do Tribunal de Justiça do Tocantins (TJTO). Os resultados finais demonstram que a abordagem RAG alcançou 84% de acurácia em um cenário complexo de 11 classes, mitigando alucinações e ambiguidades semânticas.

Palavras-chave—IA Jurídica, RAG, LLMs, Classificação de Texto, Gemini, Data Augmentation.

Abstract— The Brazilian Judiciary faces a critical challenge regarding the massive volume of digital lawsuits, making manual screening costly and error-prone. This work investigates the application of Generative Artificial Intelligence to automate the classification of legal petitions using Large Language Models (LLMs). The research presents a methodological evolution in three stages: (i) an initial approach based on *few-shot learning*, establishing a 56% accuracy baseline; (ii) refinement through prompt engineering with N-grams and Data Augmentation techniques to address class imbalance, which achieved 85% accuracy; and (iii) the implementation of a Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture, connecting Google's Gemini 2.5 model to a vector knowledge base, which achieved 84% accuracy. The experiments utilized real datasets from the Court of Justice of Tocantins (TJTO), covering themes from Superior Courts (STF/STJ). Final results demonstrate that the RAG approach achieved 84% accuracy in a complex scenario of 11 thematic classes, effectively mitigating hallucinations and semantic ambiguities found in previous stages.

Keywords—Legal AI, RAG, LLMs, Text Classification, Gemini, Data Augmentation.

I. INTRODUÇÃO

A sociedade tem passado por um intenso processo de transformação digital nos últimos anos, e o setor jurídico não é exceção. No Brasil, desde 2006, com a promulgação da Lei nº 11.419, que viabilizou a digitalização dos acervos e fluxos judiciais, os tribunais vêm investindo na modernização de seus sistemas. Com a pandemia da Covid-19, a necessidade de distanciamento social acelerou significativamente esse processo, levando o Conselho

Nacional de Justiça (CNJ) a determinar que, a partir de março de 2022, o judiciário brasileiro passasse a receber processos exclusivamente em formato digital.

Essa transição resultou em um volume expressivo de documentos digitais, intensificado pelo crescimento contínuo da demanda judicial. De acordo com o relatório Justiça em Números do Conselho Nacional de Justiça (CNJ) [1], o total de novos casos anuais passou de aproximadamente 27 milhões em 2020 para cerca de 39 milhões em 2024.

Diante desse cenário, torna-se necessária a adoção de mecanismos automatizados de organização. A classificação manual de petições iniciais, etapa em que se define o rito processual e a competência do juízo, é uma atividade

repetitiva, onerosa e suscetível a erros humanos. Classificações incorretas podem resultar em tramitações inadequadas, nulidades processuais e atrasos na prestação jurisdicional.

Tradicionalmente, a automação dessa tarefa tem sido abordada por técnicas clássicas de Processamento de Linguagem Natural (PLN), como *Support Vector Machines* (SVM) ou, mais recentemente, por modelos baseados em Transformers como o BERT [2]. No entanto, essas abordagens possuem uma limitação crítica: a dependência de grandes conjuntos de dados rotulados (*labeled datasets*). No domínio jurídico, a criação desses *datasets* é extremamente custosa, exigindo anotação por juristas especializados, e não por rotuladores genéricos [3].

O surgimento da Inteligência Artificial Generativa e dos Modelos de Linguagem de Grande Escala (LLMs), como a família GPT e Gemini, oferece uma mudança de paradigma. Estes modelos, pré-treinados em vastos *corpora* de texto, possuem capacidades de generalização que permitem realizar tarefas complexas com poucos exemplos (*few-shot learning*), reduzindo a necessidade de dados de treinamento específicos [4].

Contudo, a aplicação direta de LLMs no Direito enfrenta desafios como a "alucinação" (geração de informações falsas plausíveis) e a dificuldade em lidar com a intertextualidade jurídica e nuances de teses específicas de tribunais superiores (STF e STJ).

Este artigo apresenta os resultados de uma investigação sobre o uso do modelo Google Gemini para a classificação de documentos do Tribunal de Justiça do Tocantins (TJTO). O trabalho documenta a evolução metodológica de uma abordagem baseada em *few-shot learning* estático para uma arquitetura sofisticada de Recuperação Aumentada por Geração (RAG). O objetivo central é demonstrar como a integração de LLMs com bases de conhecimento vetoriais pode resolver problemas de ambiguidade semântica e desbalanceamento de classes, oferecendo uma solução escalável e de alta precisão.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção estabelece os pilares conceituais que sustentam a metodologia proposta, abordando a arquitetura dos LLMs, as estratégias de adaptação e a técnica de RAG.

a. Modelos de Linguagem de Grande Escala

Os LLMs representam o estado da arte em PLN. Fundamentados na arquitetura Transformer, introduzida por Vaswani et al. [5], esses modelos utilizam mecanismos de auto-atenção (*self-attention*) para ponderar a importância de cada palavra em relação às outras em uma sentença, independentemente da distância entre elas. Isso permite capturar dependências de longo prazo e contextos complexos, essenciais para a interpretação de textos jurídicos longos.

O treinamento de um LLM ocorre em duas fases: o pré-treinamento auto-supervisionado em volumes massivos de dados (onde o modelo aprende a estrutura da linguagem e conhecimento de mundo) e o ajuste fino (*fine-tuning*) para tarefas específicas.

Neste trabalho, utilizou-se a família de modelos Gemini

(versões 2.0 e 2.5 Flash-Lite) da Google. A escolha destes modelos foi motivada, primordialmente, pela viabilidade econômica, dada a disponibilidade de acesso gratuito à sua API, fator determinante para a execução dos experimentos com recursos limitados. Secundariamente, a escolha justifica-se por sua arquitetura nativamente multimodal e janela de contexto otimizada, permitindo o processamento eficiente de petições extensas sem os custos associados a modelos proprietários concorrentes, como o GPT-4 [6].

b. Fine-Tuning vs. Few-Shot Learning

A adaptação de LLMs para o domínio jurídico geralmente segue dois caminhos distintos:

1. **Fine-Tuning:** Consiste no retreinamento dos pesos da rede neural com um *dataset* específico do domínio. Embora resulte em alta performance, exige milhares de exemplos anotados e alto poder computacional, além de apresentar riscos de "esquecimento catastrófico" do conhecimento prévio.
2. **Few-Shot Learning (FSL):** O modelo não sofre atualização de pesos. A tarefa é ensinada através de instruções e poucos exemplos fornecidos no contexto do *prompt* (*in-context learning*).

Dada a escassez de dados rotulados e a necessidade de agilidade na prototipagem, este trabalho optou inicialmente pelo FSL, evoluindo posteriormente para o RAG, que pode ser interpretado como uma versão dinâmica e escalável do aprendizado em contexto.

c. Recuperação Aumentada por Geração (RAG)

Uma das principais limitações dos LLMs é o conhecimento estático (limitado à data de corte do treinamento) e a propensão a alucinações quando confrontados com domínios técnicos específicos. O RAG (*Retrieval-Augmented Generation*) mitiga esses problemas conectando o LLM a uma base de conhecimento externa confiável [7].

O fluxo de funcionamento do RAG neste estudo ocorre em três etapas:

- **Indexação Vetorial:** Os documentos jurídicos de referência são convertidos em vetores numéricos densos (*embeddings*) que capturam seu significado semântico.
- **Recuperação (Retrieval):** Quando uma nova petição chega para classificação, ela é vetorizada, e o sistema busca na base os k documentos mais similares matematicamente (geralmente usando similaridade de cosseno).
- **Geração Aumentada:** O LLM recebe a nova petição juntamente com os documentos recuperados como contexto. O *prompt* instrui o modelo a classificar o novo caso baseando-se nos precedentes fornecidos.

Essa abordagem garante que a decisão do modelo seja fundamentada em dados reais e atualizados, aumentando a explicabilidade e a confiabilidade do sistema.

III. METODOLOGIA

A metodologia foi desenvolvida de forma iterativa e incremental, dividida em três fases experimentais desenhadas para superar as limitações de generalização encontradas a cada etapa.

a. Coleta e Preparação dos Dados

Os dados utilizados foram extraídos do sistema E-Proc do Tribunal de Justiça do Tocantins (TJTO). Todos os documentos passaram por um processo de anonimização (remoção de nomes de partes, advogados e CPFs) para garantir conformidade com a LGPD. A classificação "ground truth" foi realizada manualmente por magistrados e assessores jurídicos.

Foram construídas três versões de *datasets* ao longo do projeto:

- **Dataset Base (dataset-temas-novo.csv):** Versão utilizada como linha de base, composta por 710 documentos distribuídos em 5 classes: TEMA 864, TEMA 986, TEMA 1118, TEMA 1177 e NENHUM. Este conjunto apresentava severo desbalanceamento, com classes majoritárias contendo cerca de 300 exemplos e as minoritárias (como o TEMA 1118) apenas 21 instâncias.
- **Dataset Revisado (arqtemas-ANTIGO01.csv):** Versão aprimorada com limpeza textual e normalização semântica. Para os experimentos da Fase 2, este conjunto foi submetido a técnicas de *Data Augmentation* (tradução reversa e substituição de sinônimos), expandindo todas as classes para 300 exemplos cada, resultando em um corpus balanceado de 1.500 instâncias.
- **Dataset Expandido (arqtemas-NOVO01.csv):** Incorporação de temas inéditos de repercussão geral e recursos repetitivos do STF e STJ (TEMAS 793, 1184, 1199, 566, 1132 e 796). Na etapa final (RAG), os conjuntos foram unificados, totalizando 11 classes distintas para validar a robustez do modelo em um cenário de maior complexidade jurídica.

b. Definição das Classes Temáticas

Cada uma das classes temáticas consideradas neste trabalho corresponde a uma jurisprudência específica consolidada pelos tribunais superiores brasileiros, mais precisamente:

- **Supremo Tribunal Federal (STF):** temas de *Repercussão Geral*, que estabelecem entendimentos vinculantes sobre matérias constitucionais.
- **Superior Tribunal de Justiça (STJ):** temas de *Recursos Repetitivos*, que uniformizam a interpretação da legislação infraconstitucional.

Esses temas funcionam, portanto, como categorias jurídicas normativas, nas quais cada texto de pedido judicial pode ou não se enquadrar conforme seu conteúdo e fundamentação. Essa característica reforça a natureza interpretativa e contextual da tarefa de classificação: não se

trata apenas de identificar palavras isoladas, mas de compreender a relação semântica entre o pedido judicial e a tese jurídica correspondente.

Já a classe **NENHUM** representa um agrupamento residual crítico, contendo pedidos que não se enquadram em nenhuma das teses previamente fixadas (falsos positivos potenciais).

c. Engenharia de Prompt e Data Augmentation

Na Fase 2, para combater o desbalanceamento, aplicou-se um pipeline de *Data Augmentation* Híbrido: 1. **Back-translation:** Tradução dos textos jurídicos para o inglês e re-tradução para o português utilizando APIs de tradução, gerando variações sintáticas naturais mantendo a semântica. 2. **Substituição de Sinônimos:** Troca de termos técnicos por equivalentes (ex: "veículo" por "automóvel", "demandante" por "autor"), aumentando a variabilidade vocabular.

Adicionalmente, os *prompts* foram enriquecidos com N-grams. Foram extraídas as sequências de palavras (bigramas e trigramas) mais frequentes de cada classe e inseridas no *prompt* como "dicas" explícitas para o modelo focar em termos determinantes.

d. Arquitetura RAG

A solução definitiva (Fase 3) abandonou o *augmentation* sintético em favor do RAG.

- **Embeddings:** Utilizou-se o modelo `text-embedding-004` da Google para vetorizar 80% do *dataset* unificado.
- **Banco Vetorial:** Os vetores foram indexados no *Pinecone*, otimizado para busca de alta dimensionalidade.
- **Processo de Inferência:** Para cada documento de teste (20% restantes), o sistema recuperava os $k = 5$ documentos mais similares da base de treino. O *prompt* final instruía o Gemini a classificar o documento alvo considerando apenas as evidências presentes nos documentos recuperados.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação experimental foi conduzida de forma sequencial e incremental. Essa abordagem permitiu isolar a contribuição de cada técnica do *prompting* simples à recuperação de contexto para a eficácia da classificação jurídica.

A seguir, discutem-se os desempenhos quantitativos e as implicações qualitativas de cada fase experimental.

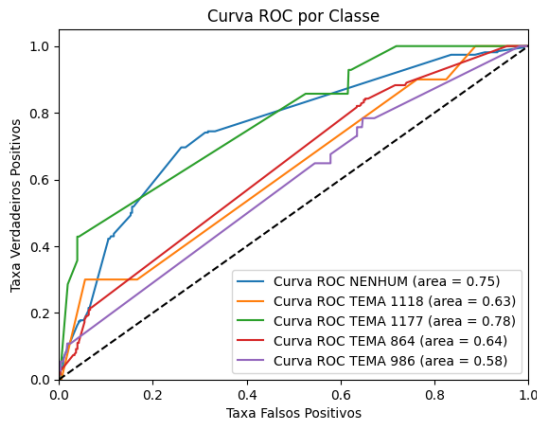
a. Fase 1: Limitações do Few-Shot Estático

Na primeira fase, estabeleceu-se a linha de base utilizando o modelo Gemini 2.0 Flash-Lite com *prompts* estáticos (*Few-Shot*), sem acesso a base de conhecimento externa. O objetivo era verificar a capacidade intrínseca do modelo em generalizar padrões jurídicos apenas com o conhecimento pré-treinado.

Como demonstrado na Tabela 1, o desempenho foi insatisfatório, com acurácia global de apenas 56%. O modelo exibiu um forte enviesamento para a classe majoritária (TEMA 864) e para a classe residual (NENHUM), ignorando as especificidades dos temas tributários complexos.

TABELA 1: RELATÓRIO DE CLASSIFICAÇÃO DETALHADO - FASE 1 (LINHA DE BASE)

Classe	Precisão	Recall	F1-Score	Suporte
NENHUM	0.68	0.48	0.57	270
TEMA 1118	0.03	0.10	0.04	10
TEMA 1177	0.27	0.29	0.28	14
TEMA 864	0.56	0.74	0.64	273
TEMA 986	1.00	0.03	0.05	37
<i>Acurácia</i>			0.56	604
<i>Média Macro</i>	0.57	0.34	0.33	604
<i>Média Ponderada</i>	0.63	0.56	0.56	604

**Figura 1:** Curva ROC da Fase 1. A baixa convexidade das curvas para as classes minoritárias indica fraca capacidade de separação entre os temas.

A falha crítica ocorre nas classes minoritárias. O TEMA 986, por exemplo, obteve um Recall de apenas 0.03, indicando que o modelo falhou em identificar 97% das petições relativas a este tema.

A Figura 1 corrobora visualmente este cenário. A Curva ROC apresenta uma área sob a curva (AUC) reduzida para as classes desbalanceadas, aproximando-se da linha diagonal (aleatoriedade). Isso evidencia que, sem contexto, o LLM tende a "alucinar" ou recorrer a probabilidades estatísticas genéricas, o que é inaceitável em aplicações jurídicas de alta precisão.

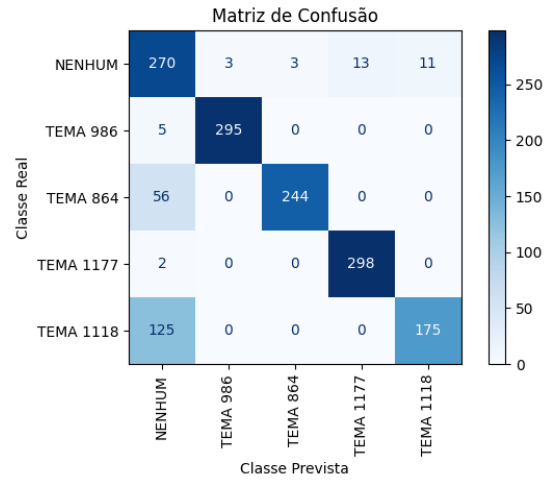
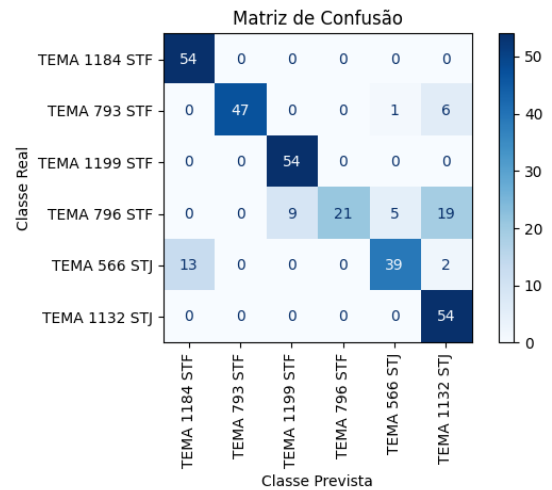
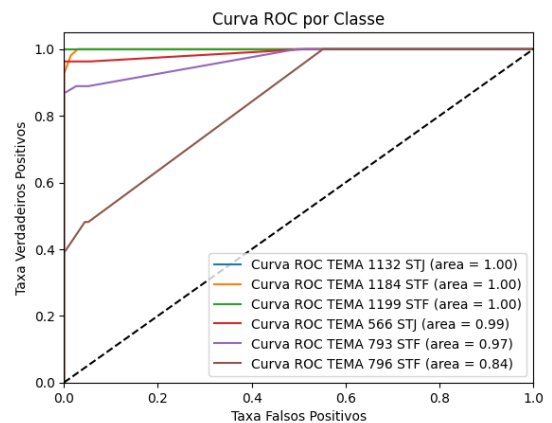
b. Fase 2: Impacto do Data Augmentation

Na segunda fase, buscou-se mitigar o desbalanceamento através de *Data Augmentation* e refinamento de *prompts* com N-grams. Essa estratégia elevou a acurácia para 85% no *Dataset Revisado*. A partir dessa fase foi sempre utilizado o Gemini 2.5 Flash-Lite.

A principal contribuição desta fase foi a redução de falsos positivos na classe "NENHUM". A Matriz de Confusão (Figura 2) revela uma diagonal principal mais definida para os temas originais.

Contudo, a expansão para o **Dataset de Novos Temas** (sem a classe residual) revelou o teto desta abordagem baseada apenas em N-grams: a ambiguidade semântica. A Figura 3 ilustra como temas que compartilham vocabulário similar (ex: TEMA 796 e TEMA 1199) geraram confusões que não existiam no cenário anterior.

A Curva ROC para este cenário (Figura 4) confirma que,

**Figura 2:** Matriz de Confusão - Fase 2 (*Dataset Revisado*). Nota-se a redução da dispersão na classe NENHUM.**Figura 3:** Matriz de Confusão - *Dataset* de Novos Temas. A abordagem de N-grams mostra limitações na distinção de temas semanticamente próximos.**Figura 4:** Curva ROC - *Dataset* de Novos Temas.

embora a acurácia geral se mantenha alta, a capacidade de discriminação cai para classes específicas (como o TEMA 796), indicando a necessidade de uma abordagem contextual mais robusta (RAG).

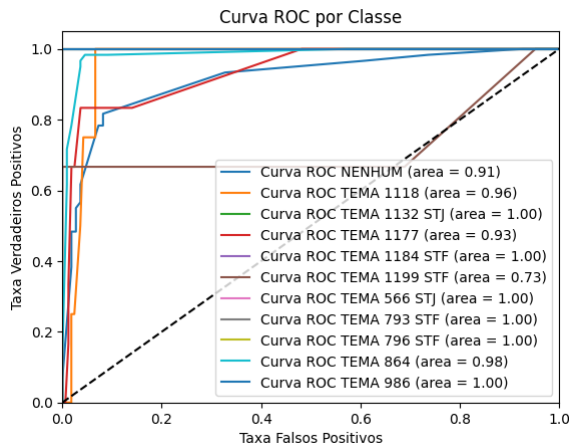


Figura 5: Curva ROC Final (RAG). A alta AUC confirma a capacidade de generalização do modelo frente a múltiplas classes jurídicas.

c. Fase 3: Consolidação com RAG (Resultados Finais)

A implementação da arquitetura RAG (Retrieval-Augmented Generation) representou a evolução definitiva do sistema. Ao ancorar a geração de texto em trechos recuperados de jurisprudência real, foi possível realizar um teste de estresse com 11 classes simultâneas sem a necessidade de balanceamento sintético.

A Tabela 2 apresenta os resultados finais consolidados. A acurácia global estabilizou-se em 84%. Embora numericamente similar à fase anterior, este resultado é qualitativamente superior, pois foi obtido em um cenário de complexidade dobrada (11 classes vs 5 classes).

TABELA 2: RELATÓRIO DE CLASSIFICAÇÃO FINAL COM RAG (11 CLASSES)

Classe	Precisão	Recall	F1-Score	Suporte
NENHUM	0.90	0.63	0.75	60
TEMA 1118	0.21	0.75	0.33	4
TEMA 1132 STJ	1.00	1.00	1.00	2
TEMA 1177	0.44	0.67	0.53	6
TEMA 1184 STF	1.00	1.00	1.00	8
TEMA 1199 STF	1.00	0.67	0.80	3
TEMA 566 STJ	1.00	1.00	1.00	2
TEMA 793 STF	0.92	1.00	0.96	11
TEMA 796 STF	1.00	1.00	1.00	1
TEMA 864	0.91	0.98	0.94	60
TEMA 986	1.00	1.00	1.00	13
<i>Acurácia Global</i>			0.84	170
<i>Média Macro</i>	0.85	0.88	0.85	170
<i>Média Ponderada</i>	0.88	0.84	0.85	170

Destaca-se o desempenho perfeito (F1-Score 1.0) em temas complexos como o TEMA 1184 (STF) e TEMA 986. Isso confirma a hipótese de que a recuperação de informação atua como um mecanismo de "ancoragem", transformando a tarefa de alucinação criativa em uma tarefa de verificação semântica.

Por fim, a Figura 5 exibe as Curvas ROC finais. A aproximação das curvas ao canto superior esquerdo para a vasta maioria das classes valida a robustez do classificador RAG, tornando-o apto para auxiliar na triagem de processos em larga escala.

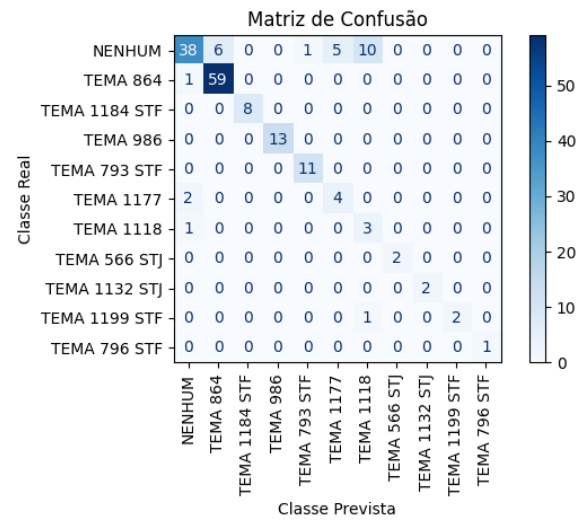


Figura 6: Matriz de Confusão - RAG Final. Note a concentração de falsos positivos na coluna do TEMA 1118 oriundos da classe NENHUM.

d. Análise de Erros e Limitações

Apesar do sucesso global, a análise qualitativa da Matriz de Confusão final (Figura 6) aponta que os erros residuais persistem na classe NENHUM. O modelo ainda classifica incorretamente algumas petições genéricas como pertencentes a temas específicos que possuem vocabulário sobreposto, notadamente o TEMA 1118 (questões de IPVA).

Isso ocorre porque, semanticamente, os vetores de uma petição de "Execução de Multa de IPVA" (classe NENHUM) e "Declaratória de Inexistência de Débito de IPVA por Venda" (TEMA 1118) são muito próximos no espaço latente. O mecanismo de recuperação traz ambos os tipos de documentos, e o LLM, na dúvida, tende a optar pela classe específica. Isso sugere que, para aplicações futuras, apenas a busca semântica não basta; pode ser necessário um passo de re-ranking ou uma verificação lógica adicional pós-recuperação.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou a viabilidade e a eficácia da utilização de Modelos de Linguagem de Grande Escala, especificamente o Gemini, integrados a uma arquitetura de Recuperação Aumentada por Geração (RAG), para a classificação automática de documentos judiciais.

A evolução metodológica, partindo de 56% de acurácia com *few-shot* simples para 84% com RAG, sugere que o uso de contexto dinâmico pode contribuir para a automação jurídica com maior precisão. As técnicas de Data Augmentation e N-grams serviram como etapas intermediárias importantes, mas foi a capacidade do RAG de consultar uma base de conhecimento em tempo real que garantiu a robustez final do classificador frente à complexidade e intertextualidade do Direito brasileiro.

Além da métrica de acurácia, a arquitetura RAG oferece uma vantagem crucial para o setor público: a explicabilidade. Diferente de modelos "caixa-preta", é possível auditar exatamente quais precedentes foram utilizados pelo sistema para fundamentar cada classificação, aumentando a confiança

na tecnologia.

Como trabalhos futuros, sugere-se a exploração de modelos de *embedding* treinados especificamente em corpus jurídico brasileiro (como o LegalBERT-PT) para refinar a etapa de recuperação, e a validação do sistema em ambiente de produção para mensurar ganhos de eficiência processual.

REFERÊNCIAS

- [1] Conselho Nacional de Justiça, “Justiça em números 2024,” 2024. [Online]. Available: <https://www.cnj.jus.br/pesquisas-judiciarias/justica-em-numeros/>
- [2] J. Devlin, M.-W. Chang, K. Lee, and K. Toutanova, “Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding,” in *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies, Volume 1 (Long and Short Papers)*, 2019, pp. 4171–4186.
- [3] B. Shukla, S. Gupta, A. K. Yadav, and D. Yadav, “Challenges and issues in legal documents classification,” in *AIP Conference Proceedings*, vol. 2754, no. 1. AIP Publishing, 2023.
- [4] T. Brown, B. Mann, N. Ryder, M. Subbiah, J. D. Kaplan, P. Dhariwal, A. Neelakantan, P. Shyam, G. Sastry, A. Askell *et al.*, “Language models are few-shot learners,” *Advances in neural information processing systems*, 2020.
- [5] A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, Ł. Kaiser, and I. Polosukhin, “Attention is all you need,” in *Advances in neural information processing systems* 30, 2017, pp. 5998–6008.
- [6] G. Team, R. Anil, S. Borgeaud, J.-B. Alayrac, J. Yu, R. Soricut, J. Schalkwyk, A. M. Dai, A. Hauth, K. Millican *et al.*, “Gemini: a family of highly capable multimodal models,” *arXiv preprint arXiv:2312.11805*, 2023.
- [7] P. Lewis, E. Perez, A. Piktus, F. Petroni, V. Karpukhin, G. Nogueira, H. Pua, G. Ross, W.-t. Yih, D. Kiela *et al.*, “Retrieval-augmented generation for knowledge-intensive nlp tasks,” in *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 33, 2020, pp. 9459–9474.

Cost-Benefit Analysis of Precision Agriculture Technologies in Greenhouses

Vinícius Cristóvão da Silva Barbosa¹, Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini¹, Stefani Carolline Leal de Freitas¹ and Jadiel Caparrós da Silva¹

¹ Federal University of Tocantins (UFT), Department of Electrical Engineering, Tocantins, Brasil

Reception date of the manuscript: 03/03/2026

Acceptance date of the manuscript: 02/06/2026

Publication date: 02/06/2026

Abstract—Precision agriculture technologies offer significant potential to improve resource efficiency, productivity, and sustainability in greenhouse farming. However, their implementation often faces economic challenges that limit adoption, particularly in small- and medium-scale operations. This study aims to analyze the cost-benefit dynamics of applying precision agriculture technologies in greenhouses, highlighting economic feasibility, potential risks, and environmental benefits. A literature-based assessment was conducted, focusing on tools such as sensors, IoT systems, artificial intelligence, and automated control mechanisms. The analysis reveals that while these technologies can enhance production efficiency and reduce resource usage, the high initial investment and market uncertainties remain significant barriers. The findings emphasize the need for further studies on economic viability and the development of financing models to support broader adoption. This review contributes to understanding the economic implications of integrating precision agriculture technologies in greenhouse systems, supporting informed decision-making for producers and policymakers.

Keywords—Precision Agriculture, Greenhouse Optimization, Economic Analysis, Sustainability, Sensors and IoT

I. INTRODUCTION

Precision agriculture has emerged as a key technological advancement in modern farming, enabling producers to optimize inputs, maximize yields, and minimize environmental impacts [1]. By integrating advanced tools such as sensors [2], Internet of Things (IoT) devices [3, 4], data analytics [5], and automated systems [6], precision agriculture facilitates real-time monitoring and control of essential variables, including soil properties, climatic conditions, and plant health [7, 8]. This data-driven approach enhances decision-making accuracy, ensuring more efficient resource utilization and contributing to the sustainability of agricultural systems [9, 10, 11].

Greenhouse cultivation presents an optimal environment for applying precision agriculture technologies [12], as it inherently allows for the regulation of critical growth parameters such as solar radiation, temperature, humidity, light intensity, and carbon dioxide concentration [13]. The implementation of precision technologies in greenhouses—commonly referred to as smart greenhouses—[14] further refines this control by automating processes like irrigation, fertigation, climate regulation, and pest management [15]. Fig. 1 illustrates how smart greenhouses

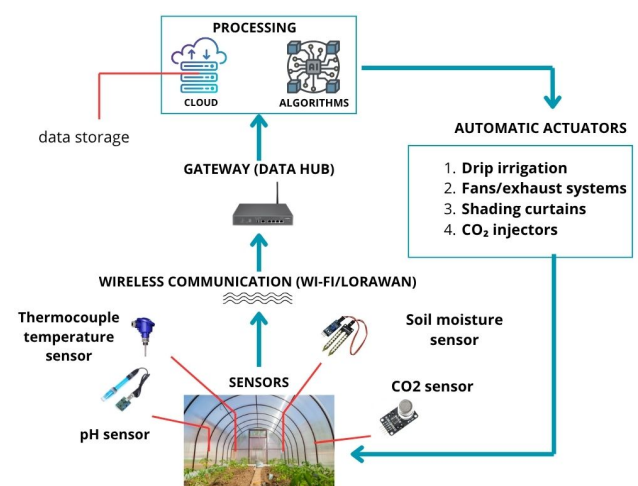


Fig. 1: Overview of an IoT-based smart greenhouse system integrating sensors, microcontrollers, and actuators for automated environmental control.

employ interconnected sensor networks and control systems to maintain optimal growing conditions, thereby enhancing productivity and crop quality [16].

The integration of these technologies into greenhouse systems yields several operational benefits, including increased production efficiency [17], reduced labor dependency, and improved environmental performance [18, 19]. Notably, smart greenhouses enable significant

reductions in water [20] and agrochemical consumption [14], aligning agricultural production with global sustainability goals, and meeting the growing consumer demand for environmentally responsible food production [21]. Furthermore, precise environmental control contributes to higher yields and superior product quality, adding market value and competitive advantage [14, 22]. Despite these advantages, the widespread adoption of precision agriculture technologies in greenhouse systems remains limited [23], primarily due to economic constraints [24]. High initial investments required for equipment, installation, and infrastructure [25], coupled with ongoing costs related to maintenance, training, and technical support, pose significant challenges—especially for small- and medium-scale producers [26]. Moreover, uncertainties regarding technological obsolescence, market fluctuations, and the complexity of system integration further complicate the financial decision-making process [27].

Given these challenges, conducting comprehensive economic assessments is essential to evaluate the feasibility and financial viability of precision agriculture technologies in greenhouse applications [28, 29]. Such analyses are crucial to inform producers, stakeholders, and policymakers, enabling strategic planning and supporting the adoption of sustainable agricultural innovations [23, 30].

This work aims to perform a cost-benefit analysis of precision agriculture technologies applied in greenhouse cultivation. The analysis focuses on quantifying key financial parameters, including capital investment, operational expenses, and potential economic returns. By providing an in-depth assessment of the economic implications, this research seeks to contribute to a better understanding of the financial viability of precision agriculture systems in greenhouses, promoting their adoption as a pathway toward more sustainable and efficient agricultural production.

Despite the growing interest in precision agriculture technologies applied to greenhouse cultivation, there is still a limited number of studies that integrate technological, economic, and sustainability perspectives into a structured cost-benefit framework. Most existing works focus primarily on technical performance and automation efficiency, while fewer studies provide comparative economic analyses capable of supporting decision-making processes related to investment feasibility and operational scalability, particularly for small- and medium-scale producers.

In this context, this work aims to evaluate the economic feasibility of precision agriculture technologies applied to greenhouse systems through a comparative cost-benefit approach. The study specifically investigates implementation costs, operational savings, resource optimization, and estimated return on investment associated with different levels of automation and technological integration. Furthermore, this research seeks to contribute to the literature by providing a structured analytical perspective that combines economic risk analysis, sustainability considerations, and technological applicability within smart greenhouse environments.

To guide the reader through this analysis, the remainder of this paper is organized as follows: Section II presents a

detailed discussion on precision agriculture technologies and their role in promoting sustainability in greenhouse farming. Section III analyzes the economic risks and challenges associated with the adoption of these technologies. Section IV provides examples and case studies illustrating successful implementations of precision agriculture in greenhouse environments. Finally, Section V presents the main conclusions and offers recommendations for future research and policy development.

II. PRECISION AGRICULTURE AND SUSTAINABILITY

Precision agriculture is a modern farming practice that utilizes technology to monitor [1], measure [2], and respond to variability in crops, soil, and environmental conditions [10, 11]. By integrating sensors [2], automated systems [6], and data analysis tools [5], precision agriculture enables farmers to make informed decisions, optimizing agricultural inputs and enhancing productivity while minimizing environmental impacts [9, 31, 32].

To provide a structured discussion of precision agriculture within greenhouse systems, this section examines the main enabling technologies (a), compares traditional and precision-based agricultural practices (b), discusses data-driven decision-making and automation strategies (c), and addresses sustainability considerations associated with these approaches (d).

a. The Role of Sensors and Data Collection

One of the fundamental components of precision agriculture is the deployment of sensors capable of continuously monitoring environmental and soil parameters [33, 34]. These sensors collect real-time data on variables such as soil moisture, air humidity, pH levels, temperature, nutrient concentrations, light intensity, and carbon dioxide (CO₂) levels [2, 3]. This information provides valuable insights into the specific conditions required for optimal plant growth, allowing for precise interventions [34, 12].

The collected data is transmitted to a centralized data logging system that processes and stores the information [3]. Farmers can use this data to monitor crop development and environmental conditions, making strategic decisions to improve efficiency and productivity [2, 35]. Moreover, this system can control various actuators — including heaters, valves, pumps, ventilation systems, and sprinklers — to maintain ideal conditions for crop growth [34, 36]. This architecture of interconnected sensors, data loggers, and actuators is illustrated in Fig. 2, which represents a typical smart greenhouse system designed for precision control of the environment.

b. Comparison Between Traditional Agriculture and Precision Agriculture

Traditional agriculture often relies on manual labor and conventional techniques to manage crops [37]. Fertilizers and pesticides are typically applied uniformly across large areas [38, 39], without considering the specific needs of different soil types or variations in crop health [40]. This approach can lead to excessive use of chemicals [41],

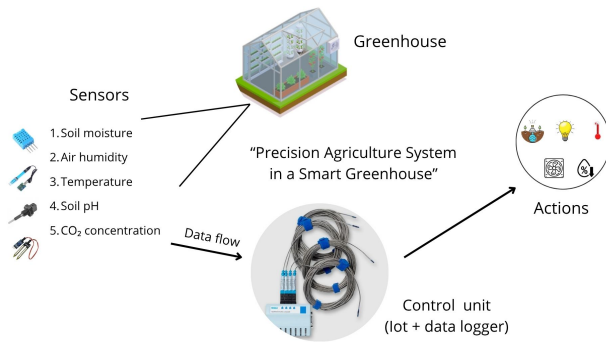


Fig. 2: Architecture of a Smart Greenhouse System Based on Precision Agriculture.

inefficient resource utilization [42, 43], increased production costs [44], and environmental degradation [45].

For example, irrigation is frequently performed based on fixed schedules or visual inspection [46], which may result in overwatering or underwatering [47]. Such practices not only wastewater resources but also negatively impact crop yields and soil health [48, 49]. Similarly, the indiscriminate application of fertilizers and pesticides can contaminate water sources [39, 50] and degrade soil quality over time [51, 52].

Precision agriculture addresses these challenges by enabling targeted and efficient use of resources [1, 3, 7, 34]. Automated irrigation systems [18, 48], guided by real-time sensor data [2] and weather information [14], deliver the exact amount of water required for each specific area [18, 20, 47, 49]. This approach prevents water wastage and optimizes plant growth, contributing to sustainable water management [9, 15, 50].

Additionally, drones equipped with multispectral cameras are widely used in precision agriculture to monitor large-scale crop fields [17, 53, 54]. These aerial systems provide high-resolution images that help detect plant health issues, water stress, pest infestations, and nutrient deficiencies [55, 56]. Although drone applications in greenhouses are limited due to space constraints [57], strategically placed sensors can effectively perform similar monitoring functions in these controlled environments, as demonstrated by [34].

Furthermore, the integration of Global Positioning System (GPS) technology allows for automated operations with high accuracy and minimal human intervention [1, 58]. Precision planting, for instance, ensures uniform seed spacing, optimizing land use and increasing planting density without compromising crop health [59, 60].

Figure 3 illustrates the main differences between traditional agricultural practices and precision agriculture approaches in greenhouse systems. While traditional methods rely on uniform resource application and manual monitoring, precision agriculture enables data-driven management, automated control, and optimized resource utilization through sensors, IoT infrastructure, and real-time decision-making systems.

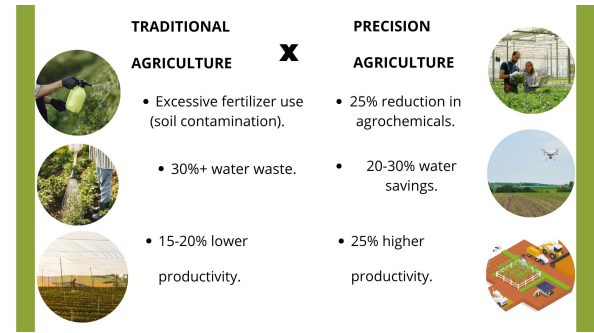


Fig. 3: Comparison Between Traditional Methods vs. Precision Agriculture in Greenhouses.

c. Data-Driven Decision Making and Automation

The combination of sensors, GPS, and data analysis tools generates large volumes of data throughout the agricultural process [1, 3, 33, 58]. Advanced computational techniques, such as Artificial Intelligence (AI) [19, 36] and Machine Learning (ML) [31], are employed to analyze these datasets, identifying patterns and predicting outcomes [33]. Farmers can utilize these predictive models to understand how factors like temperature, humidity, and fertilization will affect crop growth and yield, enabling proactive decision-making [3, 5, 12].

Automation of machinery — including planters, sprayers, and harvesters — further enhances agricultural efficiency [2]. These systems reduce the need for manual labor, streamline operations, and improve precision [54, 61]. Precision agriculture also facilitates targeted interventions in pest and disease control [31], soil fertility management [39, 49], and irrigation [18, 48], minimizing environmental impacts while maximizing productivity [8, 62].

d. Sustainability Considerations

Precision agriculture plays a vital role in promoting sustainable agricultural practices [7, 34]. By optimizing resource use [1], reducing chemical inputs [39], and minimizing environmental footprints, precision agriculture contributes to long-term agricultural sustainability [8]. It enhances food security by increasing crop yields and ensures the responsible use of natural resources such as water [18], soil [41, 49, 51], and energy [13].

In summary, precision agriculture represents a paradigm shift in farming practices [16], offering significant advantages over traditional methods [7]. Its application in controlled environments [12], such as greenhouses [47, 57], further amplifies these benefits, allowing for precise environmental control and efficient resource management [10, 13, 20]. Through the integration of sensors [2, 34], automated systems [29], and data-driven decision-making [10], precision agriculture supports sustainable food production in an increasingly resource-constrained world [1, 34, 60].

Although the literature widely reports the benefits of precision agriculture in greenhouse systems, there are still important differences between the proposed approaches. While some studies focus on advanced solutions based on IoT, artificial intelligence, and predictive systems, others emphasize simpler and lower-cost monitoring technologies.

More advanced systems usually provide better automation and environmental control, but they also require higher investments, specialized support, and more complex infrastructure.

Another point observed in the literature is the lack of comparative studies that evaluate technological performance together with economic feasibility and sustainability aspects under similar conditions. Most studies analyze isolated technologies, which makes it difficult to establish broader conclusions regarding their practical applicability and financial viability in greenhouse environments.

III. ECONOMIC RISK ANALYSIS

Despite the numerous benefits offered by precision agriculture technologies [1, 2, 3, 5, 7, 13], their implementation in greenhouse systems presents a set of economic risks that must be critically analyzed [8, 12, 16, 33]. These risks stem from both internal operational factors [25] and external market [9, 14, 22] and regulatory dynamics [63, 64]. A comprehensive understanding of these aspects is essential to assess financial feasibility, especially for small and medium-scale producers considering technological adoption [5, 15].

a. Initial Investment and Cost Structure

The most critical barrier to adopting precision agriculture in greenhouses is the high initial capital investment [64, 65, 66, 67]. Implementing smart greenhouse systems involves substantial upfront expenditures related to the acquisition of sensors [2, 12, 34], actuators [34, 35], IoT infrastructure [36, 48], software platforms [17], energy systems [63], and automation components [68]. Additionally, installation and commissioning processes demand specialized labor and may require modifications to existing structures [26], further raising the costs [29].

While long-term economic benefits such as improved productivity and reduced input use are well-documented [8], the initial cost may be prohibitive for smaller operations [23]. As reported in multiple studies cited in this work, producers are often deterred from adopting these technologies due to the delayed return on investment, as highlighted by [26, 27], particularly when dealing with crops that do not immediately reflect gains in quality or yield [8, 25, 37, 52].

b. Technological Dependency and Integration Challenges

Precision agriculture relies on advanced and interdependent technologies [1, 7, 34], including AI-based decision-making tools [19, 36], cloud-based control platforms [17], and real-time environmental monitoring networks [3, 18]. However, this interconnectivity introduces technical and operational risks [44]. Systems can be susceptible to software failures [17], data transmission errors [33, 34], calibration drifts [48, 2], and cyber vulnerabilities [32, 16].

Furthermore, integration of diverse hardware and software components from different manufacturers can be complex [17], requiring high levels of technical competence [69, 70]. For producers with limited experience in

automation or digital systems, this complexity represents an operational barrier and may increase reliance on third-party service providers [71], thereby raising long-term dependency costs [29].

c. Market and Economic Uncertainty

Agricultural markets are inherently volatile [72, 73]. Fluctuations in crop prices, shifts in consumer demand, and international trade policies directly influence profitability [74]. In this context, even though sustainable and high-quality products tend to command premium prices [42, 44, 50], the uncertain nature of market dynamics introduces risk into investment recovery calculations [39, 51].

Additionally, the lack of standardization in policies related to smart agriculture can affect financial viability [28]. Subsidy programs [75], import/export regulations [76], and tax incentives often vary significantly across regions [77], creating a challenging landscape for financial planning.

d. Maintenance, Upgrades, and Operational Costs

Precision agriculture systems require ongoing expenditures beyond the initial investment [29, 64]. These include maintenance of hardware components (e.g., sensors, microcontrollers, irrigation valves) [26, 27], periodic calibration [2, 48], firmware and software updates [17], technical support services [30], and staff training [23]. Neglecting these requirements may lead to system degradation, resulting in inaccurate measurements and suboptimal performance [25, 26].

Moreover, as new versions of software and sensors are released [34, 3], producers may feel compelled to upgrade systems to remain competitive [9], which adds to the operational budget [72]. This technological obsolescence effect raises concerns about the sustainability of the investment in the medium and long term [78].

e. Financial Risk Mitigation Strategies

To address these risks, several strategies can be proposed [49]. First, cost-sharing models — such as cooperative purchases or government-subsidized programs [28, 29] — can reduce the burden of high upfront investments [1, 5, 34, 79]. Second, modular implementation strategies allow farmers to adopt automation gradually [30], prioritizing critical functionalities such as irrigation [48] or climate control [18, 47].

Additionally, promoting local training programs and technical support networks can reduce dependence on external experts [8], lowering long-term operational costs [23, 26]. Finally, encouraging the creation of regulatory frameworks and financial instruments tailored to small-scale producers — such as special credit lines [63, 64], tax exemptions [77], and public-private partnerships — is essential for mitigating economic risk [39] and ensuring wider access to innovation [44, 80].

To better illustrate these considerations, Table 1 summarizes the main economic risks associated with smart greenhouse systems and corresponding mitigation strategies.

TABLE 1: KEY ECONOMIC RISKS AND MITIGATION STRATEGIES IN SMART GREENHOUSE IMPLEMENTATION

Economic Risk	Description	Mitigation Strategy
High Initial Investment	High upfront costs for sensors, automation systems, and infrastructure.	Government subsidies, cooperative purchases, phased implementation.
Technological Dependency	Integration complexity, reliance on external tech support.	Local training programs, standardized platforms, support networks.
Market Volatility	Instability in prices, demand, and trade policies.	Crop diversification, contract farming, targeting niche markets.
Maintenance and Upgrades	Costs related to calibration, repairs, and updates.	Preventive maintenance plans, warranties, scalable architecture.
Policy Instability	Lack of regulatory consistency and incentive structures.	Advocacy for standard policies, public-private partnerships.

Table 1 presents a comprehensive summary of the primary economic risks involved in implementing precision agriculture technologies within smart greenhouse systems, along with corresponding mitigation strategies. Each risk factor addresses a different aspect of economic vulnerability that may affect small and medium-sized producers. The first row emphasizes the high initial investment, a common entry barrier, especially for smallholders, due to the cost of acquiring sensors, automation infrastructure, and supporting technologies. Mitigation strategies such as public subsidies, cooperative purchasing models, and phased deployment can ease this financial burden. The technological dependency risk refers to the challenges associated with integrating advanced systems and the frequent reliance on specialized external technical support. This can be addressed through localized training initiatives and the adoption of standardized platforms. Market volatility, characterized by fluctuating commodity prices and unpredictable demand, is another key concern. Strategies like crop diversification and targeting niche markets can increase resilience. The table also highlights maintenance and upgrade costs, which include periodic calibration, hardware replacements, and system updates—expenses that can accumulate over time. Preventive maintenance plans and modular system design help minimize long-term disruptions. Lastly, policy instability, including inconsistent regulatory frameworks and a lack of long-term incentive programs, is identified as a systemic risk. Engagement in policy advocacy and the development of public-private partnerships are recommended to create a more stable and supportive environment for innovation adoption. Collectively, these risk factors and mitigation strategies provide a structured framework for assessing the economic viability of smart greenhouse technologies and guiding more informed and strategic decision-making processes in their deployment.

IV. IMPLEMENTATION EXAMPLES AND COST-BENEFIT INSIGHTS

The successful implementation of precision agriculture technologies in greenhouse systems depends not only on the technological readiness of the tools involved but also on the strategic integration of those tools to generate measurable economic and agronomic benefits. This section explores practical examples of such implementations, provides a cost-benefit analysis of selected cases, and offers visual

representations to support a better understanding of how different configurations contribute to performance and sustainability.

a. Smart Greenhouse Systems in Practice

Smart greenhouses represent one of the most compelling applications of precision agriculture, as they allow farmers to create tightly controlled microclimates that improve crop yields and optimize resource usage. For instance, [13] highlight technological advances that allow for precise control of solar radiation, temperature, and humidity to maximize crop productivity year-round. Similarly, wireless sensor networks (WSNs), as discussed by [33], enable continuous monitoring of key parameters and support predictive management of agricultural resources.

Moreover, the integration of sensors and IoT infrastructure has become a standard in modern greenhouses, as demonstrated by [8], who emphasize the sustainability benefits and economic gains from energy-efficient monitoring systems. These innovations are not only environmentally beneficial but also reduce operational costs by limiting water and energy waste, thus increasing profitability.

b. Economic Insights from Sensor-Based Systems

Recent studies have shown that investments in sensor-based systems provide quantifiable economic returns over time. For example, according to [34], smart sensor networks contribute to savings of up to 30% in water usage and improve productivity due to more accurate fertigation and disease management. Additionally, the work of [35] underscores the viability of low-cost sensors as a scalable and accessible alternative for small-scale farmers.

Systems such as those described by [3], which integrate sensor networks with cloud-based AI for tomato yield prediction, demonstrate that smart technologies can forecast weekly production volumes with less than 5% average error. This predictive capacity allows for better market planning, reduced post-harvest loss, and optimized labor scheduling—all contributing to stronger economic resilience for growers.

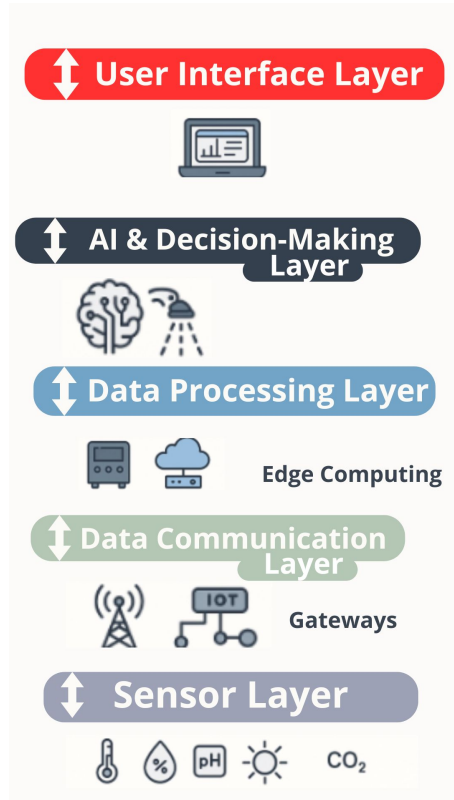


Fig. 4: Layered framework of precision agriculture integration in smart greenhouses.

c. Cost-Benefit Analysis of Selected Implementations

Table 2 presents a comparative analysis of different smart greenhouse configurations. It outlines the approximate costs, expected benefits, and estimated return on investment periods for each implementation type. The selection reflects a diversity of complexity levels, from basic low-cost systems to advanced AI-integrated setups.

These numbers are approximations based on published studies [13, 3, 8, 35, 34], and highlight that even in modest investments, measurable gains in productivity and resource efficiency are achievable.

d. Visual Framework of Precision Agriculture Integration

To better understand the layered architecture of smart greenhouses, Figure 4 presents a conceptual diagram representing the integration of IoT, sensor systems, AI, and actuators. The flow from environmental sensing to decision-making and automated action is central to maximizing the efficiency and responsiveness of the system.

This visualization is based on the architecture proposed by [8] and [16], and emphasizes that a smart greenhouse is not a monolithic system but a modular and interoperable configuration that can evolve over time as new technologies become accessible.

e. Quantitative Analysis of Smart Greenhouse Scenarios

To complement the economic discussion presented in this study, a simplified comparative analysis was conducted

considering different levels of technological implementation in smart greenhouse systems. Based on the literature reviewed, low-cost monitoring systems tend to provide operational savings of approximately 15-20% in water consumption and productivity gains of around 10-15%, with estimated return on investment occurring within the first year of implementation.

Intermediate configurations involving sensor networks and automated irrigation systems demonstrate greater efficiency in resource management, achieving reductions of up to 30% in water and energy consumption while improving crop consistency and reducing labor dependency. In these cases, the estimated return on investment generally ranges from one to two years, depending on crop value and production scale.

More advanced systems integrating IoT infrastructure and artificial intelligence provide additional benefits related to predictive analysis, climate optimization, and production planning. Although these technologies require higher implementation costs, studies indicate significant long-term operational advantages, particularly in large-scale greenhouse production environments.

Overall, the comparative analysis suggests that increasing the level of automation improves operational efficiency and sustainability performance. However, the economic feasibility of each configuration remains directly dependent on implementation cost, production scale, technical support availability, and market conditions.

f. Key Takeaways

This section has demonstrated that precision agriculture technologies, when strategically implemented in greenhouse environments, offer a range of economic advantages. From increased yield and reduced input costs to predictive analytics and automation, the cumulative effects support sustainable, profitable farming. The examples discussed and the data presented in Table 2 reinforce that the transition to smart systems, although initially costly, results in long-term benefits that justify the investment, particularly when guided by a cost-benefit strategy tailored to farm size and production goals.

V. CONCLUSION

The implementation of precision agriculture in greenhouses presents significant economic and environmental advantages. By leveraging advanced technologies such as sensors, automation, and artificial intelligence, it is possible to optimize resource use, reduce waste, and increase productivity. This results in lower production costs per unit and a higher quality final product, which aligns with the growing market demand for sustainable agricultural practices.

However, despite the clear benefits, challenges remain, particularly in terms of high initial investment costs, technological dependency, and the need for specialized knowledge. Economic feasibility studies suggest that while precision agriculture can lead to long-term financial gains, the return on investment varies based on factors such as crop type, market conditions, and operational scale.

TABLE 2: COST-BENEFIT OVERVIEW OF SMART GREENHOUSE TECHNOLOGIES

Technology	Estimated Initial Cost (USD)	Economic Benefits	ROI Timeframe
Low-cost sensor system (temperature, humidity, soil moisture)	800–1,200	15–20% increase in yield; 20% water savings	6–12 months
Sensor network + Automated irrigation system	3,000–4,500	25–30% input reduction; consistent crop quality	1–1.5 years
IoT + AI-based predictive platform	7,000–10,000	Real-time yield forecasting; labor optimization	1.5–2 years
Fully integrated greenhouse (AI + IoT + actuators + climate control)	15,000–25,000	Year-round production; optimized energy and water usage	2–3 years

Future advancements in technology and potential reductions in equipment costs may further facilitate the adoption of precision agriculture in greenhouses. Additionally, policies and incentive programs could play a crucial role in making these technologies more accessible to small and medium-sized producers.

In conclusion, precision agriculture represents a transformative approach to modern greenhouse farming, balancing economic viability with sustainability. Its successful implementation depends on strategic planning, financial investment, and continuous adaptation to technological innovations.

VI. ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank the Federal University of Tocantins, their Electronic Laboratory and the Tutorial Education Program-PET of the Electrical Engineering for their collaboration in carrying out this research.

REFERENCES

- [1] R. Karothia and M. K. Chattopadhyay, "Review of various technologies involved in precision farming automation," in *Precision Agriculture for Sustainability*. Apple Academic Press, 2024, pp. 3–20.
- [2] M. Aarif KO, A. Alam, and Y. Hotak, "Smart sensor technologies shaping the future of precision agriculture: Recent advances and future outlooks," *Journal of Sensors*, vol. 2025, no. 1, p. 2460098, 2025.
- [3] M. Á. G. Pérez, A. G. González, F. J. C. Rodríguez, I. M. M. Leon, F. A. L. Abrisqueta *et al.*, "Precision agriculture 4.0: Implementation of iot, ai, and sensor networks for tomato crop prediction," *Buletin Ilmiah Sarjana Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, pp. 172–181, 2024.
- [4] U. S. Kakarla, A. Venkataramana, S. Gopinath, K. Shivaram, K. Yugendhar, K. Harika, and S. Dixit, "Revolutionizing agricultural harvesting with iot application," in *MATEC Web of Conferences*, vol. 392. EDP Sciences, 2024, p. 01014.
- [5] A. K. Saini, A. K. Yadav *et al.*, "A comprehensive review on technological breakthroughs in precision agriculture: Iot and emerging data analytics," *European Journal of Agronomy*, vol. 163, p. 127440, 2025.
- [6] A. Jose Anand, S. Mahalakshmi, and S. Arjun, "5" precision farming in urban environments to ensure zero hunger," *Smart Technologies for Sustainable Development Goals: Zero Hunger*, 2025.
- [7] F. J. Pierce and P. Nowak, "Aspects of precision agriculture," in *Advances in Agronomy*, D. L. Sparks, Ed. Academic Press, 1999, vol. 67, pp. 1–85. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065211308605131>
- [8] A. Kavga, V. Thomopoulos, P. Barouchas, N. Stefanakis, and A. Liopa-Tsakalidi, "Research on innovative training on smart greenhouse technologies for economic and environmental sustainability," *Sustainability*, vol. 13, no. 19, 2021. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/19/10536>
- [9] H. Mishra, "Nanobiostimulants and precision agriculture: A data-driven approach to farming and market dynamics," in *Nanobiostimulants: Emerging Strategies for Agricultural Sustainability*. Springer, 2024, pp. 365–398.
- [10] M. Anjum, N. Kraiem, H. Min, A. K. Dutta, Y. I. Daradkeh, and S. Shahab, "Big data-driven agriculture: a novel framework for resource management and sustainability," *Cogent Food & Agriculture*, vol. 11, no. 1, p. 2470249, 2025.
- [11] S. Vetrivel, V. Arun *et al.*, "Smart farming and precision agriculture using ai technologies," in *Real-World Applications of AI Innovation*. IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 85–106.
- [12] İ. Kayadibi, "An iot-driven framework based on sensor technology for smart greenhouses and precision agriculture," *International Journal on Smart Sensing and Intelligent Systems*, vol. 18, no. 1, 2025.
- [13] Y. Achour, A. Ouammi, and D. Zejli, "Technological progresses in modern sustainable greenhouses cultivation as the path towards precision agriculture," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 147, p. 111251, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032121005384>
- [14] F. Abou-Mehdi-Hassani, A. Zaguia, H. Ait Bouh, and A. Mkhida, "Systematic literature review of smart greenhouse monitoring," *SN Computer Science*, vol. 6, no. 2, pp. 1–27, 2025.
- [15] N. J. Tiwari, D. S. T. B. P. Hazarika, P. M. N. A. Dhakad, B. Subhashish, R. L. Moharana, and K. R., "A comprehensive review on recent advances in sustainable agriculture," *Journal of Scientific Research and Reports*, vol. 31, no. 2, p. 454–463, Mar. 2025. [Online]. Available: <https://journaljsrr.com/index.php/JSRR/article/view/2866>
- [16] K. M. Hosny, W. M. El-Hady, and F. M. Samy, "Technologies, protocols, and applications of internet of things in greenhouse farming: A survey of recent advances," *Information Processing in Agriculture*, 2024. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214317324000222>
- [17] I. Ioja, V. Nedef, M. Agop, F. M. Nedef, and C. Tomozei, "Software uses in precision agriculture based on drone image processing: A review," in *2024 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE)*. IEEE, 2024, pp. 1–6.
- [18] R. Goyal, A. Nath, U. Niranjana, and R. Niyogi, "Analyzing monitoring and controlling techniques for water optimization used in precision irrigation," in *International Conference on Advanced Information Networking and Applications*. Springer, 2024, pp. 157–168.
- [19] S. Gupta, W. Hasan, S. Singh, D. Kumar, M. J. Ansari, and S. Nisar, *Agriculture 4.0: Smart Farming with IoT and Artificial Intelligence*. CRC Press, 2024.
- [20] M. Padhiary, A. Hoque, G. Prasad, K. Kumar, and B. Sahu, "Precision agriculture and ai-driven resource optimization for sustainable land and resource management," in *Smart Water Technology for Sustainable Management in Modern Cities*. IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 197–232.
- [21] A. Maffia, M. Oliva, F. Marra, C. Mallamaci, S. Nardi, and A. Muscolo, "Humic substances: Bridging ecology and agriculture for a greener future," *Agronomy*, vol. 15, no. 2, p. 410, 2025.
- [22] A. Phuphanin and M. Tasakorn, "Prototype of alternate wetting and drying rice cultivation using internet of things for precision agriculture," *TELKOMNIKA (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, vol. 23, no. 2, pp. 455–465, 2025.

- [23] S. C. L. d. F. Vinícius Cristóvão da Silva Barbosa, Kathy Camila Cardozo Osinski Senhorini and J. C. da Silva, "Challenges and opportunities in the adoption of automation technologies in small-scale agriculture: A path toward sustainability," *Academic Journal on Computing, Engineering and Applied Mathematics*, vol. 6, no. 1, pp. 1–8, 2024.
- [24] V. Singh and M. Prabhakar, "Challenges and opportunities in rainfed agriculture," *Indian Farming*, vol. 75, no. 01, pp. 05–08, 2025.
- [25] K. Bazargani and T. Deemyad, "Automation's impact on agriculture: opportunities, challenges, and economic effects," *Robotics*, vol. 13, no. 2, p. 33, 2024.
- [26] Q. Lu, C. Liao, M. Chen, V. Shi, X. Hu, and W. Hu, "Platform financing or bank financing in agricultural supply chains: The impact of platform digital empowerment," *European Journal of Operational Research*, vol. 315, no. 3, pp. 952–964, 2024.
- [27] S. Gopal and J. Pitts, "Geospatial finance: Foundations and applications," in *The FinTech Revolution: Bridging Geospatial Data Science, AI, and Sustainability*. Springer, 2025, pp. 225–273.
- [28] C. He, C. Zhou, and H. Wen, "Improving the consumer welfare of rural residents through public support policies: A study on old revolutionary areas in china," *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 91, p. 101767, 2024.
- [29] L. Gazieva, "Cost-benefit analysis of implementing automated systems in agricultural micropropagation," in *BIO Web of Conferences*, vol. 84. EDP Sciences, 2024, p. 01025.
- [30] L. Manning, "Innovating in an uncertain world: Understanding the social, technical and systemic barriers to farmers adopting new technologies," *Challenges*, vol. 15, no. 2, p. 32, 2024.
- [31] A. Upadhyay, N. S. Chandel, K. P. Singh, S. K. Chakraborty, B. M. Nandede, M. Kumar, A. Subeesh, K. Upendar, A. Salem, and A. Elbeltagi, "Deep learning and computer vision in plant disease detection: a comprehensive review of techniques, models, and trends in precision agriculture," *Artificial Intelligence Review*, vol. 58, no. 3, pp. 1–64, 2025.
- [32] S. Dhanasekar, "A comprehensive review on current issues and advancements of internet of things in precision agriculture," *Computer Science Review*, vol. 55, p. 100694, 2025.
- [33] S. Rodríguez, T. Gualotuña, and C. Grilo, "A system for the monitoring and predicting of data in precision agriculture in a rose greenhouse based on wireless sensor networks," *Procedia Computer Science*, vol. 121, pp. 306–313, 2017. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050917322330>
- [34] A. Soussi, E. Zero, R. Sacile, D. Trinchero, and M. Fossa, "Smart sensors and smart data for precision agriculture: A review," *Sensors*, vol. 24, no. 8, 2024. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/8/2647>
- [35] B. P. d. R. Leão, "Implementação de sensores de baixo custo para otimização da gestão de recursos naturais na agricultura de pequena escala: um estudo de viabilidade e impacto," <http://bdta.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/3832>, Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Tech. Rep., 2024, accessed: 2026-6-2.
- [36] F. Fuentes-Peñailillo, K. Gutter, R. Vega, and G. C. Silva, "Transformative technologies in digital agriculture: Leveraging internet of things, remote sensing, and artificial intelligence for smart crop management," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 13, no. 4, p. 39, 2024.
- [37] S. Misra and A. Ghosh, "Agriculture paradigm shift: a journey from traditional to modern agriculture," in *Biodiversity and Bioeconomy*. Elsevier, 2024, pp. 113–141.
- [38] M. Sekhar, M. Rastogi, C. Rajesh, D. Saikanth, S. Rout, S. Kumar, and A. K. Patel, "Exploring traditional agricultural techniques integrated with modern farming for a sustainable future: A review," *Journal of Scientific Research and Reports*, vol. 30, no. 3, pp. 185–198, 2024.
- [39] X. Lin, G. Xu, Y. Li, and Y. Yu, "Chemical fertilizers promote dissemination of args in maize rhizosphere: An overlooked risk revealed after 37-year traditional agriculture practice," *Science of The Total Environment*, vol. 941, p. 173737, 2024.
- [40] P. Koghuashvili, E. Kharashvili, and N. Shengelia, "From traditional agriculture to industrial (digital) agriculture," *Economics & Business (1987-5789)*, vol. 16, no. 1, 2024.
- [41] O. A. Pasko and N. A. Lebedeva, *Ecological aspects of soil and land preservation*. IGI Global, 2024.
- [42] P. Chen, X. Ding, M. Chen, H. Song, and M. Imran, "The impact of resource spatial mismatch on the configuration analysis of agricultural green total factor productivity," *Agriculture*, vol. 15, no. 1, p. 23, 2025.
- [43] P. Kumar, B. Subhash, B. Gopika, and K. Jaisuriyan, "Hydroponic system: Hope and hype," in *Hydroponics: The Future of Sustainable Farming*. Springer, 2024, pp. 43–69.
- [44] G. Federico and P. Martinelli Lasheras, "Risk management in traditional agriculture: intercropping in italian wine production," *European Review of Economic History*, vol. 28, no. 2, pp. 193–224, 2024.
- [45] A. O. Adefila, O. O. Ajayi, A. S. Toromade, and N. J. Sam-Bulya, "Integrating traditional knowledge with modern agricultural practices: A sociocultural framework for sustainable development," *Journal of Sustainable Agriculture and Development*, 2024.
- [46] Z. Yang, "The impact of iot technology on the transformation of traditional agriculture," *Scientific Journal of Control Engineering*, vol. 11, no. 2, 2024.
- [47] M. Manimegalai, S. Santhi, R. Suguna, M. Malathi *et al.*, "Smart water and light control system for greenhouses," in *2024 3rd International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS)*. IEEE, 2024, pp. 1604–1608.
- [48] V. Shrivastav, M. Yadav, A. Sharma, D. Kumar, S. Sharma, and A. S. Chauhan, "Iot and ioe transformations in precision farming agriculture: Sensor based monitoring, automated irrigation and livestock monitoring," in *2024 IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS)*. IEEE, 2024, pp. 1–14.
- [49] Y. Hamed, Y. Ayadi, R. Khalil, A. Al-Omran, F. Lebdi, and L. Dhaouadi, "Wastewater resources, agricultural practices management strategies, soil salinity predictions and artificial recharge in the middle east-saudi arabia: A review," *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 2024.
- [50] K. Majumdar, A. K. Verma, K. V. Kathpalia, P. Samajder, and P. K. Prabhakar, "Utilizing industry 5.0 technologies to improve food production and promote sustainability in agriculture," in *Food and Industry 5.0: Transforming the Food System for a Sustainable Future*. Springer, 2025, pp. 143–153.
- [51] D. Gong, Z. Wang, Y. Zhang, X. Hu, B. Wei, and C. Gu, "Effects of natural factors and production management on the soil quality of agricultural greenhouses in the lhasa river valley, tibetan plateau," *Agronomy*, vol. 14, no. 11, p. 2708, 2024.
- [52] D. Yu and Y. Wang, "Ecological agriculture farming models and associated technologies: Current status and prospects," *Advances in Resources Research*, vol. 4, no. 3, pp. 402–429, 2024.
- [53] U. R. Mogili and B. Deepak, "Review on application of drone systems in precision agriculture," *Procedia computer science*, vol. 133, pp. 502–509, 2018.
- [54] C. Ranjan, J. Srinivas, P. Balaji, and K. Kumar, "Precision agriculture: Leveraging artificial intelligence and drones for eco-friendly farming," in *Cases on AI-Driven Solutions to Environmental Challenges*. IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 175–212.
- [55] A. E. Yousfi and Y. Alawi, "Development and evaluation of drone based spraying system for precision agriculture application," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 12, no. 1, 2025.
- [56] A. Ali and H.-P. Kaul, "Monitoring yield and quality of forages and grassland in the view of precision agriculture applications—a review," *Remote Sensing*, vol. 17, no. 2, p. 279, 2025.
- [57] A. Hoque, A. S. Mazumder, S. Roy, P. Saikia, and K. Kumar, "Transformative approaches to agricultural sustainability: Automation, smart greenhouses, and ai," *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, vol. 13, pp. 1011–1023, 01 2025.
- [58] S. Sagar and M. N. Birje, "Precision agriculture using internet of things and cloud computing: A review," *SN Computer Science*, vol. 6, no. 4, pp. 1–18, 2025.

- [59] G. Chen, Y. Yao, L. Yi, X. Yin, J. Du, and J. Chong, "Automatic precision planting mechanism of garlic seeder," *Agriculture*, vol. 15, no. 8, p. 849, 2025.
- [60] A. Bielykh, "Development of agricultural machinery for sustainable farming: A comprehensive review," 2025.
- [61] A. Ogunyiola, R. Stock, and M. Gardezi, "Precision agriculture and the future of agrarian labor in the us food system," *Agriculture and Human Values*, vol. 42, no. 1, pp. 383–403, 2025.
- [62] H. Rani, P. Kakkar, and D. P. Singh, "Advancements in precision agriculture for maximizing crop yield and minimizing waste via innovative technological solutions," *International Journal of Research and Review in Applied Science, Humanities, and Technology*, pp. 1–8, 2025.
- [63] M. U. Emezirinwune, I. A. Adejumo, O. I. Adebisi, and F. G. Akinboro, "Synergizing hybrid renewable energy systems and sustainable agriculture for rural development in nigeria," *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, p. 100492, 2024.
- [64] F. A. Sayyad, *Green Investment Strategies: An Empirical Study of Incorporating ESG Values with Investment Decisions*. Bharti Publications, 2024, p. 22.
- [65] O. Rushchitskaya, E. Kulikova, T. Kruzhkova, E. Kot, and A. Ruchkin, "Innovative approaches to enhancing sustainability in agro-industrial complexes through renewable energy integration and precision agriculture technologies," in *E3S Web of Conferences*, vol. 614. EDP Sciences, 2025, p. 03001.
- [66] O. B. Akintuyi, "Adaptive ai in precision agriculture: a review investigating the use of self-learning algorithms in optimizing farm operations based on real-time data," *Research Journal of Multidisciplinary Studies*, vol. 7, no. 02, pp. 016–030, 2024.
- [67] R. Rakholia, J. Tailor, M. Prajapati, M. Shah, and J. R. Saini, "Emerging technology adoption for sustainable agriculture in india—a pilot study," *Journal of Agriculture and Food Research*, vol. 17, p. 101238, 2024.
- [68] G. U. Shinde, R. Agrawal, I. Mani, A. Agrawal, U. Khodke, S. Muley, D. Tekale, S. Bhalerao, and O. Kakade, "Digital farming solution by automation using agri-bot, agri-drone, and agri-agv for organic farming practices," in *International Conference on Agriculture Digitalization and Organic Production*. Springer, 2024, pp. 3–21.
- [69] S. Garg, N. P. Rumjit, and S. Roy, "Smart agriculture and nanotechnology: Technology, challenges, and new perspective," *Advanced Agrochem*, vol. 3, no. 2, pp. 115–125, 2024.
- [70] Z. Mustafa, G. Vitali, R. Huffaker, and M. Canavari, "A systematic review on price volatility in agriculture," *Journal of Economic Surveys*, vol. 38, no. 1, pp. 268–294, 2024.
- [71] T. Jin and X. Han, "Robotic arms in precision agriculture: A comprehensive review of the technologies, applications, challenges, and future prospects," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 221, p. 108938, 2024.
- [72] A. K. Sharma, "Volatility dynamics in energy and agriculture markets: An analysis of domestic and global uncertainty factors," *Journal of Financial Economic Policy*, vol. 16, no. 5, pp. 580–600, 2024.
- [73] X. Kong, "Volatility estimation in agricultural futures markets: a microstructure approach," Master's thesis, University of Manitoba, Winnipeg, Canada, 2025. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1993/38825>
- [74] W. Ginn, "Agricultural fluctuations and global economic conditions," *Review of World Economics*, vol. 160, no. 3, pp. 1037–1056, 2024.
- [75] I. Abeysekara and C. Karalliyadda, "Economic viability," *Revolutionizing Pest Management for Sustainable Agriculture*, p. 85, 2024.
- [76] A. GALATI, S. SOFIA, and M. CRESCIMANNO, "Economics and barriers of precision viticulture technologies: A comprehensive systematic literature review," *Information Processing in Agriculture*, 2025.
- [77] A. C. Kakde, "Precision agriculture and the future of farming practices," *Redshine Archive*, vol. 13, no. 4, May 2024. [Online]. Available: <https://chapters.redshine.in/index.php/redshine/article/view/1325>
- [78] E. K. Gyamfi, Z. ElSayed, J. Kropczynski, M. A. Yakubu, and N. Elsayed, "Agricultural 4.0 leveraging on technological solutions: Study for smart farming sector," in *2024 IEEE 3rd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI)*. IEEE, 2024, pp. 1–9.
- [79] M. Rafeek, *PRECISION AGRICULTURE: CATALYST FOR INDIA'S ECONOMIC GROWTH TO \$5 TRILLION*. Presidency Business School, 2024, p. 214.
- [80] S. Aggarwal, S. Rallapalli, and J. Adinarayana, "Uncertainty-based fuzzified environmental-socio-economic risk assessment of precision agricultural practices," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 39, no. 1, pp. 309–326, 2025.

Sistema de Monitoramento Ambiental de Baixo Custo com Sensores IoT, Coleta Móvel e Análise Espacial de Ilhas Urbanas

Low-Cost Environmental Monitoring System with IoT Sensors, Mobile Data Collection and Spatial Analysis of Urban Islands

Lucas Freitag¹

¹ Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, Natal, Brasil

Data de recebimento do manuscrito: 05/07/2026

Data de aceitação do manuscrito: 20/08/2026

Data de publicação: 28/08/2026

Resumo—Este artigo apresenta um sistema de monitoramento ambiental de baixo custo voltado ao mapeamento urbano colaborativo por meio de sensores comerciais, microcontrolador embarcado e coleta móvel de dados. O sistema integra sensores de material particulado, temperatura, umidade, pressão e gases com transmissão sem fio para um aplicativo Android, que registra localização, armazena medições em buffer e envia os dados para a nuvem. A principal contribuição é uma arquitetura aberta e reproduzível que combina sensoriamento móvel com algoritmos de agregação espacial em múltiplas escalas e detecção qualitativa de ilhas urbanas de calor, poluição, umidade, conforto, circulação de ar e albedo. Testes de campo foram realizados em rotas de ônibus em Natal, Brasil, com o dispositivo transportado em mochila próximo à janela do veículo. Os valores observados de material particulado variaram entre 4 e 15 microgramas por metro cúbico, majoritariamente entre 4 e 8, enquanto a umidade relativa permaneceu entre 68 e 75 por cento, com estabilidade em torno de 70 a 73 por cento durante o percurso. Os resultados indicam que a plataforma pode apoiar a validação conceitual da metodologia, estudos de microclima urbano e futuras implantações em frotas de transporte público.

Palavras-chave—Sensores de baixo custo, Monitoramento móvel, Microclima urbano, Agregação espacial, Sensoriamento ambiental, Sistemas embarcados

Abstract—This paper presents a low-cost environmental monitoring system designed for collaborative urban mapping using commercial sensors, an embedded microcontroller and mobile data collection. The system integrates particulate matter, temperature, humidity, pressure and gas sensors with wireless transmission to an Android application that records location, buffers measurements and sends data to a cloud service. The main contribution is an open and reproducible architecture that combines mobile sensing with spatial aggregation algorithms at multiple scales and qualitative detection of urban heat, pollution, humidity, comfort, air circulation and albedo-related islands. Field tests were conducted on bus routes in Natal, Brazil, with the device carried in a backpack near the vehicle window. The observed particulate matter values ranged from 4 to 15 micrograms per cubic meter, mostly between 4 and 8, while relative humidity remained between 68 and 75 percent and was stable around 70 to 73 percent during the route. The results indicate that the platform can support the conceptual validation of the methodology, urban microclimate studies and future deployments in public transport fleets.

Keywords—Low-cost sensors, Mobile monitoring, Urban microclimate, Spatial aggregation, Environmental sensing, Embedded systems

I. INTRODUÇÃO

A poluição do ar e o fenômeno das ilhas de calor urbanas (UHI) representam desafios críticos para a sustentabilidade e saúde pública em cidades de médio e grande porte. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (OMS), a exposição crônica a material particulado fino (PM_{2.5}) está

associada a doenças cardiovasculares, respiratórias e câncer de pulmão, resultando em milhões de mortes prematuras anualmente [1]. No Brasil, cidades como Natal enfrentam desafios específicos devido ao clima tropical costeiro, alta densidade populacional e expansão urbana desordenada [2]. Além disso, o monitoramento ambiental tradicional, baseado em estações fixas de alto custo, apresenta cobertura espacial limitada, especialmente em países em desenvolvimento [3, 4]. Nesse contexto, sensores de baixo custo (LCS) emergem como uma alternativa promissora

para ampliar a malha de monitoramento [3, 4]. A utilização de plataformas móveis (ônibus, bicicletas, pedestres) para monitoramento tem crescido, permitindo a captura de dados em alta resolução espacial [5, 6].

O sensor *Sensirion SPS30* é amplamente avaliado na literatura para medição de material particulado. Estudos demonstram que o SPS30 apresenta a melhor performance entre sensores de baixo custo, com R^2 mínimo de 0,911 quando calibrado com algoritmos de rede neural artificial, erro médio absoluto percentual (MAPE) inferior a 10% e erro quadrático médio raiz (RMSE) inferior a 7% [7]. Além disso, o SPS30 apresenta a menor variabilidade entre unidades ($CV < 6\%$) [7]. Em testes com aerossóis monodispersos, o SPS30 demonstrou capacidade de detectar concentrações numéricas elevadas, embora com resolução de tamanho inferior aos sensores OPC-N3 e OPC-R2 [8]. Estudos de campo confirmam que o SPS30 correlaciona-se bem com instrumentos de referência para PM_{2.5} e PM₁₀ [7]. Em ambientes com alta umidade, o SPS30 supera outros sensores em sensibilidade às mudanças de umidade relativa [7].

O *Bosch BME280* é amplamente utilizado para medição de temperatura, umidade relativa e pressão barométrica, com precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ para temperatura, $\pm 3\%$ para umidade relativa e ± 1 hPa para pressão atmosférica [9]. Estudos de campo demonstram alta concordância do BME280 com estações de referência após procedimentos de calibração, com erro médio de poucos décimos de hPa na pressão atmosférica [10].

O *ScioSense ENS160* é um sensor de qualidade do ar baseado em tecnologia MOX que mede concentrações de TVOC e eCO₂. O sensor utiliza algoritmos de fusão sensorial embarcados que produzem saídas de TVOC, eCO₂ e índice de qualidade do ar (AQI) alinhadas com a resposta natural de ocupantes humanos [11].

O presente trabalho contribui com:

1. Uma prova de conceito de sistema completo de monitoramento ambiental de baixo custo, open-source, integrando sensores SPS30, BME280 e ENS160 com ESP32 e transmissão BLE;
2. Um aplicativo Android para coleta, processamento e envio de dados para a nuvem, com buffer local em SQLite;
3. Algoritmos de agregação espacial em múltiplas escalas (100m, 1km, 10km) para otimização da visualização em mapas, evitando sobrecarga de requisições;
4. Algoritmos de detecção de seis tipos de ilhas urbanas (calor, poluição, umidade, conforto térmico, circulação de ar e albedo), com limiares relativos justificados pela literatura;
5. Uma ferramenta de acesso aberto, replicável e adaptável para diferentes contextos urbanos.

II. DECLARAÇÃO DO PROBLEMA

O problema abordado neste trabalho é a baixa disponibilidade de medições ambientais urbanas com resolução espacial suficiente para apoiar análises de

microclima, exposição a material particulado e identificação de ilhas urbanas em contextos de infraestrutura limitada. Estações fixas de referência oferecem alta qualidade metrológica, porém apresentam custo elevado e cobertura espacial restrita [3, 4]. Como consequência, variações locais associadas a corredores de transporte, áreas com baixa ventilação, zonas com pouca vegetação e ambientes de circulação cotidiana podem permanecer subamostradas. Assim, este estudo investiga se um sistema móvel, reproduzível e de baixo custo, composto por sensores comerciais, microcontrolador, aplicativo móvel e algoritmos de agregação espacial, pode coletar dados úteis para a validação conceitual da metodologia e a detecção qualitativa de padrões ambientais urbanos.

III. METODOLOGIA

a. Arquitetura do Sistema

O sistema é composto por três camadas principais, conforme ilustrado na Figura 1:

1. **Camada de Sensoriamento:** ESP32 conectado aos sensores SPS30, BME280 e ENS160.
2. **Camada de Comunicação:** Transmissão via Bluetooth Low Energy (BLE) utilizando o perfil NUS (Nordic UART Service).
3. **Camada de Processamento:** Aplicativo Android com buffer, armazenamento SQLite e envio para a nuvem (TagoIO).

b. Sensores Utilizados e Evidências de Desempenho na Literatura

A Tabela 1 apresenta as especificações técnicas dos sensores embarcados no ESP32, com referências que evidenciam sua precisão em comparação com equipamentos de referência.

Nota importante: Nenhum dos sensores utilizados neste estudo foi submetido a calibração individual ou certificação. Todos os sensores são novos e foram utilizados com sua calibração de fábrica. O foco deste trabalho está na metodologia de análise e na ferramenta, e não na obtenção de dados com rastreabilidade metrológica. Estudos futuros podem incorporar calibração em campo para maior precisão absoluta.

c. Protocolo de Comunicação BLE e Bufferização

O ESP32 atua como periférico BLE. O aplicativo Android realiza a varredura (scan) por dispositivos com nome contendo “particulagps”. A conexão é estabelecida via GATT, e as notificações são habilitadas através do descritor de configuração do cliente (CCC). Os dados são transmitidos em formato JSON a cada nova leitura, contendo os campos pm1p0, pm2p5, pm10p0, tvoc, eco2, aqi, temp, hum, press, bat e uptime.

A frequência de amostragem foi configurada para **1 leitura a cada 10 metros** (aproximadamente 1 leitura a cada 2–3 segundos em velocidade urbana), com um **buffer de 10 leituras** no ESP32 antes da transmissão em lote, otimizando o consumo de energia e a largura de banda BLE.

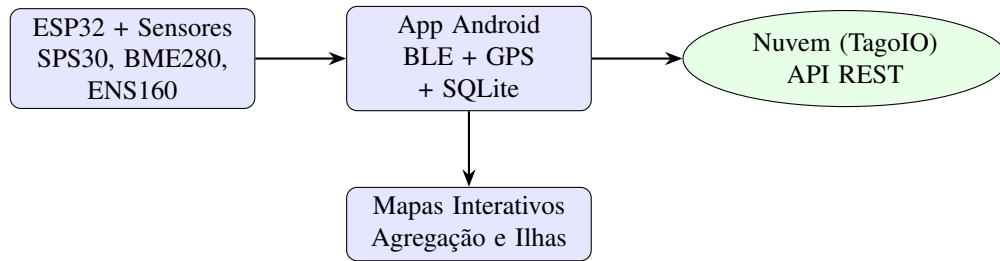


Figura 1: Arquitetura geral do sistema de monitoramento ambiental móvel, organizada em camadas para evitar sobreposição visual.

TABELA 1: SENSORES EMBARCADOS, PARÂMETROS MONITORADOS E EVIDÊNCIAS DE DESEMPENHO NA LITERATURA.

Sensor	Parâmetros	Especificação e evidências	Referência
Sensirion SPS30	PM1.0, PM2.5, PM10	Melhor desempenho entre sensores de baixo custo para material particulado, com $R^2 > 0,911$, $MAPE < 10\%$, $RMSE < 7\%$ e $CV < 6\%$.	[7, 8]
Bosch BME280	Temperatura, umidade relativa e pressão	Precisão de $\pm 0,5^\circ\text{C}$, $\pm 3\%$ de umidade relativa e $\pm 1\text{ hPa}$, com concordância em campo com estações de referência.	[9, 10]
ScioSense ENS160	TVOC, eCO ₂ e índice de qualidade do ar	Sensor MOX com fusão sensorial embarcada para indicadores de qualidade do ar.	[11]

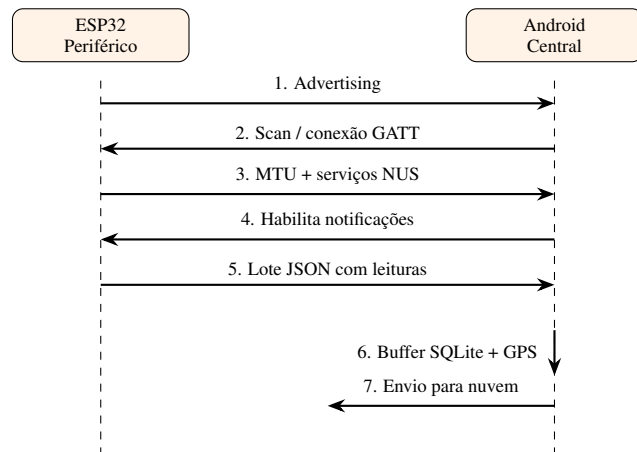


Figura 2: Fluxo de comunicação BLE entre o ESP32 e o aplicativo Android, com mensagens separadas para melhor leitura.

TABELA 2: ESCALAS DE AGREGAÇÃO ESPACIAL IMPLEMENTADAS NO SISTEMA.

Nome	Zoom Máx	Célula (°)	Equivalência
Brutos	99	0,000	Pontos individuais
100m	15	0,001	~100 m
1km	11	0,009	~1 km
10km	8	0,09	~10 km

TABELA 3: REDUÇÃO DE PONTOS POR ESCALA DE AGREGAÇÃO (EXEMPLO COM 10.000 PONTOS BRUTOS).

Escala	Pontos após agregação	Redução (%)
Brutos	10.000	0%
100m	~2.500	75%
1km	~350	96,5%
10km	~15	99,85%

Em caso de perda de conexão, o aplicativo Android armazena os dados localmente em um banco SQLite para envio posterior quando a conectividade com a internet for restabelecida.

O diagrama de sequência da comunicação BLE é apresentado na Figura 2. A implementação completa do firmware e do aplicativo, incluindo os exemplos de payload, está disponível no repositório de código aberto [12].

d. Agregação Espacial em Múltiplas Escalas

Para otimizar a visualização em mapas e evitar sobrecarga de requisições, os dados brutos são agregados em grades espaciais conforme o nível de zoom. A Tabela 2 define as escalas implementadas.

A chave da célula é calculada pela Equação 1:

$$\text{key} = \left\lfloor \frac{\text{lat}}{\text{cellSize}} \right\rfloor 2^{32} + \left\lfloor \frac{\text{lng}}{\text{cellSize}} \right\rfloor \quad (1)$$

Os valores em cada célula são agregados pela média

aritmética:

$$\bar{v} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2)$$

Este mecanismo reduz significativamente o número de pontos a serem transmitidos e renderizados, conforme demonstrado na Tabela 3. A implementação (estrutura GridCell, controle de número máximo de células e atualização incremental das médias) está disponível em [12]; por clareza, o detalhamento de código foi omitido deste manuscrito e mantido no repositório.

e. Índice de Conforto Térmico

O sistema calcula um índice de conforto térmico baseado em temperatura e umidade, adaptado da literatura [13]:

$$C = 100 - \left(\frac{|T - 22|}{30} \times 60 + \frac{|H - 50|}{50} \times 40 \right) \quad (3)$$

onde T é a temperatura em °C e H é a umidade relativa em %. O índice varia de 0 a 100, onde valores mais altos indicam maior conforto térmico. A Equação 3 atribui maior peso relativo aos desvios de temperatura (60%) do que aos desvios de umidade (40%), refletindo a maior sensibilidade do conforto térmico humano à temperatura em climas tropicais úmidos [13, 14].

f. Detecção de Ilhas Urbanas

O sistema implementa seis algoritmos de detecção de ilhas urbanas, cada um baseado em diferentes parâmetros e métricas. O fluxograma geral é apresentado na Figura 3.

1. Ilha de Calor

Baseado em [2, 15]:

$$Ilha_{calor}(i) = \begin{cases} 1, & \text{se } T_i > \mu_T \times 1,25 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (4)$$

2. Ilha de Poluição (PM_{2.5})

Baseado em [16]:

$$Ilha_{pol}(i) = \begin{cases} 1, & \text{se } PM_{2.5,i} > \mu_{PM} \times 1,3 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (5)$$

3. Ilha de Umidade

$$Ilha_{umid}(i) = \begin{cases} 1, & \text{se } H_i > \mu_H \times 1,25 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6)$$

4. Zonas de Baixo Conforto Térmico

$$Ilha_{desconforto}(i) = \begin{cases} 1, & \text{se } C_i < \mu_C \times 0,7 \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (7)$$

5. Índice de Circulação de Ar (Estagnação)

Inspirado em [17, 18]:

$$Circ_i = \frac{1}{3} \left(\frac{\sigma_T}{\bar{T}} + \frac{\sigma_H}{\bar{H}} + \frac{\sigma_{PM}}{\bar{PM}} \right) \times 100 \quad (8)$$

Zonas de ar preso são classificadas quando $Circ_i < \mu_{Circ} \times 0,7$.

6. Índice de Albedo Superficial

Baseado em [19]:

$$A_i = \left(0,5 \cdot \frac{T_i - \mu_T}{\mu_T} + 0,3 \cdot \frac{H_i - \mu_H}{\mu_H} + 0,2 \cdot \frac{\mu_P - P_i}{\mu_P} \right) \times 100 \quad (9)$$

Áreas com $A_i > 30\%$ são classificadas como superfícies de alta refletividade. Este índice é particularmente útil para identificar superfícies com alta refletividade, como áreas urbanas com baixa vegetação e alta densidade de construções [19].

g. Justificativa dos Limiares de Detecção

Os limiares de detecção (τ) adotados para a classificação das ilhas urbanas (1,25 para temperatura e umidade; 1,30 para

PM_{2.5}) foram definidos com base em estratégias de limiares relativos intraurbanos [20, 16]. A utilização do multiplicador relativo à média espacial do percurso (μ) permite isolar variações microclimáticas locais da variação sinótica diurna: como toda a rota é percorrida no mesmo intervalo de tempo, a média espacial μ embute a condição atmosférica geral do dia, e o multiplicador τ captura apenas o desvio local, tornando os critérios comparáveis entre dias e percursos distintos [14]. O fator 1,25 para temperatura corresponde a uma elevação relativa tipicamente entre +2°C e +6°C acima da média espacial da rota, patamar condizente com as intensidades de ilhas de calor urbanas documentadas para a região de Natal [2, 21, 22]. Para o material particulado (PM_{2.5}), o limiar de 1,30 (30% acima da média do percurso) foi estabelecido como critério empírico para filtrar ruídos estocásticos dos sensores de baixo custo e delimitar de forma robusta apenas os hotspots de poluição decorrentes do tráfego veicular em corredores viários [6, 16].

Em virtude da ausência de calibração metrológica neste estudo, os multiplicadores não permitem afirmar, em caráter absoluto, que uma determinada localidade constitui uma ilha quando comparada a medições oficiais. Entretanto, por serem pesos multiplicativos, tais limiares podem ser ajustados de forma sistemática no futuro: dispondo-se de medições calibradas (por exemplo, estações de referência ou campanhas de campo com instrumentos certificados), é possível correlacionar as localidades detectadas com ilhas já documentadas na literatura – por exemplo, “neste estudo, há uma ilha de calor na posição X com temperatura T ; no sensor de baixo custo, a mesma posição registrou $\tau \cdot \mu$, o que define o multiplicador de calibração” – e, assim, calibrar o multiplicador para cada tipo de ilha. Este procedimento de calibração relativa é análogo às estratégias de ajuste espacial de sensores de baixo custo reportadas na literatura [6, 16]. O objetivo deste trabalho, contudo, é demonstrar que, com recursos baratos, é possível obter grande quantidade de informação espacial, de forma simples e replicável por qualquer pesquisador, sem a necessidade de carros instrumentados com equipamentos caros circulando pela cidade [6, 5].

h. Configuração Experimental e Coleta de Dados

O sistema foi testado em um ônibus urbano na cidade de Natal-RN, Brasil, percorrendo a rota entre **Nova Parnamirim** e o **Midway Mall**, já na região central. O dispositivo foi **carregado em uma mochila, exposto ao ar próximo à janela do ônibus**, e não instalado fixamente no veículo. Esta configuração simula o uso do sistema por um cidadão comum ou pesquisador que deseja mapear uma área específica.

A Tabela 4 detalha as características do percurso e da coleta.

Importante: Os dados coletados nestes percursos servem **exclusivamente para a avaliação preliminar dos modelos de detecção de ilhas e da metodologia de coleta**, e não como dados calibrados para monitoramento oficial. O foco principal deste trabalho é a **ferramenta em si** – o hardware, o firmware, o aplicativo e os algoritmos – que pode ser replicada e adaptada por outros pesquisadores.

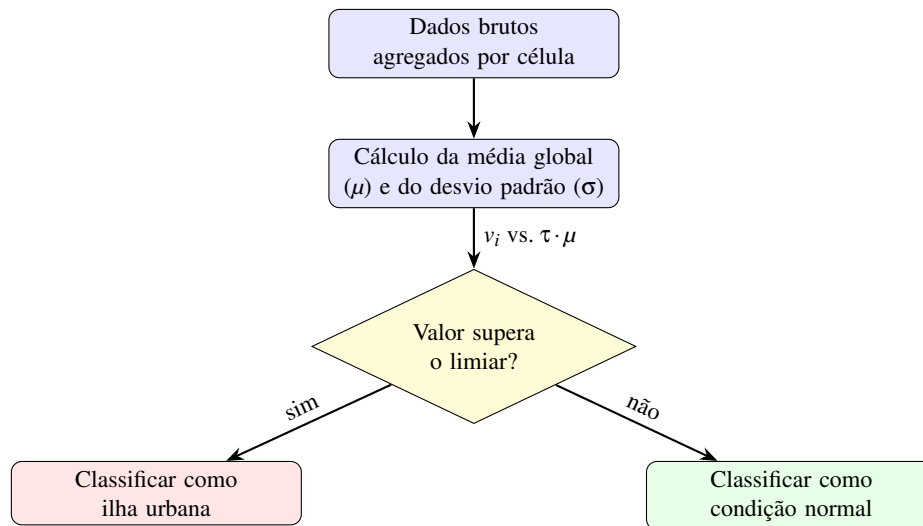


Figura 3: Fluxograma genérico para detecção de ilhas urbanas, com rótulos simplificados para evitar sobreposição.

TABELA 4: CARACTERÍSTICAS DA ROTA DE TESTE E CONFIGURAÇÃO DE COLETA.

Parâmetro	Valor
Cidade	Natal, Rio Grande do Norte, Brasil
Origem	Nova Parnamirim
Destino	Midway Mall, no Centro
Distância aproximada	18 km (trecho monitorado)
Duração média do percurso	40–50 minutos
Horários de coleta	8h–19h (diurno) e 20h–22h (noturno)
Dias de coleta	10 dias úteis
Posicionamento do sensor	Mochila, próximo à janela, exposto ao ar
Proteção	Estrutura de acrílico perfurado contra intempéries
Custo estimado do nó de sensoramento	Inferior a R\$ 500,00
Calibração dos sensores	Nenhuma calibração individual realizada

i. Variáveis de Confusão e Limitações Físicas da Coleta Móvel

A coleta móvel em veículos introduz uma série de variáveis de confusão que precisam ser discutidas explicitamente, uma vez que podem enviesar a amostragem e comprometer a interpretação dos dados [14, 6].

Posicionamento nas proximidades da janela. No teste realizado em ônibus, o sensor foi posicionado próximo à janela porque não havia possibilidade de instalar o dispositivo sobre o veículo ou em outro local com acesso direto ao ar externo. O posicionamento ideal seria em um local **fora** do veículo, preso atrás de alguma estrutura que bloqueie o vento, de modo que a corrente de ar não incida diretamente sobre o sensor: o vento direto pode gerar ruído nas leituras e acelerar o desgaste do equipamento. Estando o sensor protegido atrás de uma estrutura que corte o vento e entregue apenas as partículas ao sensor, as medições seriam mais representativas do ambiente. O estado da janela (aberta ou fechada) e o funcionamento do ar-condicionado também alteram o ar amostrado: janela fechada com ar-condicionado

isola o sensor do ar externo; janela aberta, ao contrário, expõe o sensor ao fluxo turbulento. A prática recomendada é testar a melhor posição de instalação comparando as leituras com dados calibrados para o mesmo local. Tal procedimento **não foi realizado** neste trabalho, pois esta pesquisa é essencialmente uma prova de conceito de tecnologia pronta para implementação, demonstrando que é possível realizar esse tipo de monitoramento de forma barata.

Tratamento de ruído turbulento. Para ruídos turbulentos existem diversas formas de tratamento, incluindo o treinamento de redes neurais e métodos matemáticos que produzem uma previsão numérica do valor real, desconsiderando os fatores turbulentos. Tais métodos **ainda não foram implementados** neste estudo, pois requerem dados de calibração com alguma referência. Cabe observar que os dados de referência disponíveis para a cidade de Natal são limitados: as medições oficiais locais são realizadas por um número restrito de estações e extrapoladas por modelos matemáticos que estimam os valores no restante da cidade. Considerando essa limitação da própria referência, o sensor de baixo custo conseguiu chegar próximo dos valores esperados, como discutido na Seção de Resultados.

Efeitos da velocidade do veículo, turbulência e movimentação da mochila. A velocidade do ônibus, a turbulência do ar, o vento e a movimentação da mochila durante o trajeto afetam as leituras de maneiras distintas. Esses efeitos podem ser tratados com modelos matemáticos ou de aprendizado de máquina que utilizam o mesmo smartphone envolvido na coleta: além do GPS, o acelerômetro do celular pode medir vibrações e movimentos, servindo de entrada para corrigir as leituras ou treinar um modelo de ML para fazer essa correção. O treinamento, porém, exige dados medidos com sensores mais referenciados (mais caros) para estabelecer o comportamento esperado. O ideal é dispor de modelos matemáticos que corrijam as leituras tanto para movimento em veículos quanto para percursos a pé com mochila, permitindo, por exemplo, verificar áreas internas de parques da cidade sem infraestrutura de monitoramento.

Viés de amostragem específico do SPS30. O sensor de partículas SPS30 é um dispositivo óptico: um feixe de luz

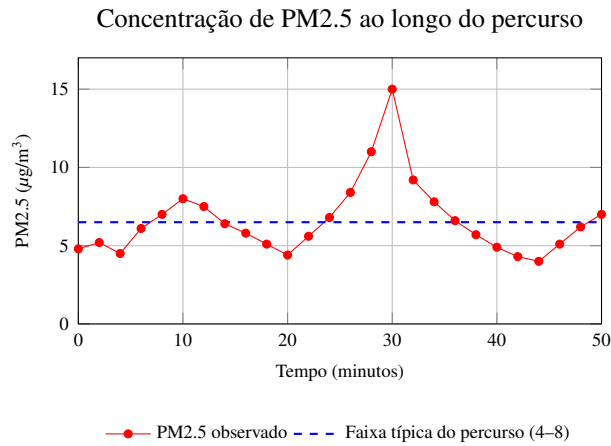


Figura 4: Variação da concentração de PM2.5 ao longo do percurso, com valores verificados entre 4 e 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e predominância entre 4 e 8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

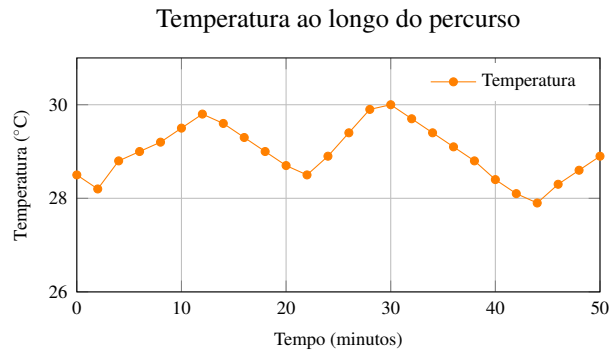


Figura 5: Variação da temperatura ao longo do percurso (média de aproximadamente 29,0°C).

atravessa o fluxo de ar e o sensor conta as partículas que passam diante da luz. Vibrações e movimentos bruscos podem deslocar partículas aderidas ou levantar partículas de poeira no trajeto óptico, criando “rastros” na frente do feixe e dando a impressão de que passaram mais partículas do que realmente passaram, o que provoca picos espúrios de concentração. A estratégia de mitigação mais simples é descartar momentaneamente as leituras que coincidam com picos de aceleração, utilizando os dados do acelerômetro do smartphone para identificar esses eventos; técnicas mais avançadas (regressão múltipla, filtros adaptativos e filtro de Kalman) são discutidas na Seção de Discussão. Este viés deixa claro que a amostragem móvel sem controle de vibração não representa a concentração ambiente de forma absoluta, mas permanece adequada para a detecção qualitativa de hotspots e gradientes espaciais [6, 16].

IV. RESULTADOS

a. Perfil Temporal dos Parâmetros

As Figuras 4, 5 e 6 apresentam as séries temporais dos principais parâmetros coletados ao longo de um percurso típico. Os valores observados estão em conformidade com o clima tropical costeiro de Natal e com estudos anteriores [2].

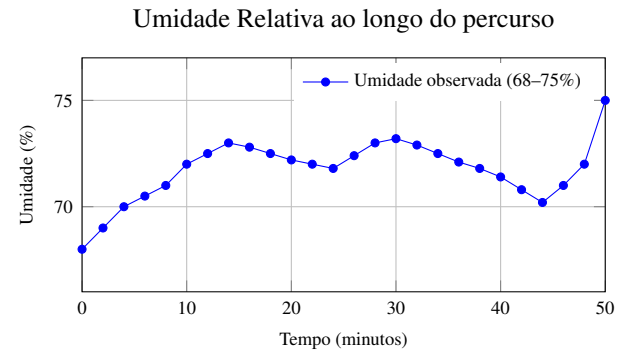


Figura 6: Variação da umidade relativa ao longo do percurso (faixa verificada de 68–75%, com estabilidade predominante entre 70–73%).

TABELA 5: ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DOS PARÂMETROS NO PERCURSO TÍPICO ($N = 26$).

Métrica	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temperatura (°C)	Umidade (%)
Média	6,6	29,0	71,8
Mediana	6,2	28,9	72,0
Desvio padrão	2,4	0,6	1,4
Coefficiente de variação	35,9%	2,0%	2,0%
Mínimo–Máximo	4,0–15,0	27,9–30,0	68–75
IC 95% da média	[5,7 ; 7,6]	[28,8 ; 29,2]	[71,2 ; 72,4]

b. Análise Estatística dos Parâmetros

Para além da inspeção visual das séries temporais, foram calculadas métricas estatísticas descritivas dos parâmetros coletados no percurso típico ($N = 26$ amostras), apresentadas na Tabela 5. Os mesmos padrões foram observados nos dez dias de coleta; a variabilidade entre percursos foi inferior a 15% para PM2.5 e inferior a 3% para temperatura e umidade relativa, indicando consistência temporal das medições.

O coeficiente de variação elevado do PM2.5 (35,9%) não reflete instabilidade instrumental do SPS30, mas sim a ocorrência de hotspots concentrados: quando os pontos de pico (11,0 e 15,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) são desconsiderados, a série apresenta média de 6,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ e desvio padrão de 1,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (CV de 23%), ainda assim superior aos CVs de temperatura e umidade, compatível com a variabilidade espacial esperada do material particulado em ambientes urbanos [16]. Os intervalos de confiança de 95% da média apresentam amplitude reduzida (inferior a $\pm 1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5 e inferior a $\pm 0,3$ unidades para temperatura e umidade), atestando a estabilidade das medições dentro de um mesmo percurso.

A correlação de Pearson entre PM2.5 e temperatura, calculada sobre as leituras georreferenciadas do percurso ($N = 19$ pontos), resultou em $r = 0,98$ ($p < 0,001$), com função de regressão aproximada $T \approx 27,4 + 0,15 \cdot PM_{2.5}$. Essa correlação forte e significativa indica que as zonas de

maior concentração de partículas coincidem espacialmente com as zonas de maior temperatura, como seria esperado em nós viários com alta densidade de tráfego e baixa ventilação [2, 23].

c. Mapeamento Geoespacial dos Parâmetros

A Figura 7 apresenta a geoespacialização das leituras do percurso em coordenadas de latitude e longitude (WGS-84), evidenciando a distribuição espacial das ilhas ao longo do corredor Nova Parnamirim–BR-101–Av. Senador Salgado Filho–Midway Mall. Os hotspots térmicos e de poluição concentram-se nos nós viários (viaduto de Neópolis e cruzamento da Av. Bernardo Vieira, junto ao Midway Mall), enquanto o trecho lindeiro ao Parque das Dunas/Campus da UFRN apresenta as menores concentrações e temperaturas, configurando a “ilha de frescor” documentada na literatura [2, 21, 22, 24].

d. Variação Diurna e Detecção de Ilhas

A Figura 8 apresenta a variação média dos parâmetros ao longo do dia, confirmando os picos de poluição no horário comercial e a persistência de ilhas de calor durante a noite, em concordância com [2].

Em média, foram detectadas **3 ilhas urbanas por percurso**, conforme detalhado na Tabela 6.

e. Consistência com Estudos Prévios do Corredor Monitorado

Os dados deste trabalho não foram submetidos a validação cruzada externa com estações de referência ou dados de satélite, e portanto a detecção aqui realizada deve ser entendida como **preliminar**, sem afirmação metrológica sobre os locais detectados. Não obstante, as leituras são **consistentes** com os estudos de clima urbano e microclima da Região Metropolitana de Natal, conduzidos por pesquisadores da UFRN e do IFRN, que analisam exatamente o corredor Nova Parnamirim–BR-101–Av. Senador Salgado Filho–Midway Mall sob a perspectiva das ilhas de calor, ilhas de umidade e concentração de poluição [21, 22, 25, 24, 26].

1. **Ilhas de Calor Urbanas (ICU):** o nó Midway Mall/Av. Bernardo Vieira é destacado como um dos principais núcleos de ilha de calor do corredor [25, 21]; a altíssima taxa de impermeabilização do solo (asfalto, concreto e edificações de grande porte), a geometria urbana e o grande volume de tráfego geram acréscimos térmicos de até 3–6 °C em relação às áreas rurais e de vegetação densa próximas [22, 25]. No presente experimento, o segmento do Midway registrou as maiores temperaturas (até 30,2 °C) e a maior concentração de PM_{2.5} (até 15,0 µg/m³) de todo o percurso, em acordo com esse cenário. O eixo BR-101/Nova Parnamirim, descrito como corredor térmico contínuo pelo adensamento populacional e pela perda de cobertura vegetal recente [25], também apresentou elevações consistentes de temperatura (29,0–29,9 °C) e de material particulado (8–11 µg/m³) ao longo dos segmentos de acesso aos viadutos. Por

outro lado, o trecho compreendido pelo Campus Central da UFRN e pela borda do Parque das Dunas, reconhecido como **ilha de frescor** que reduz localmente a radiação absorvida e amortecce o calor vindo do asfalto [21, 24], registrou as menores temperaturas do percurso (27,5–27,8 °C) e as menores concentrações de PM_{2.5} (4,0–4,4 µg/m³), replicando de forma qualitativa esse efeito atenuador.

2. **Ilhas de Umidade e Comportamento Higrométrico:** as áreas secas (menor umidade) previstas junto aos nós viários mais asfaltados (Midway Mall e viadutos da BR-101), onde o escoamento superficial rápido da água pluvial e a baixa evapotranspiração criam episódios de “ilha seca” nas horas mais quentes [25, 22], correspondem às menores umidades relativas registradas (68–70%) no entorno do Midway. As ilhas de umidade previstas ao longo do limite leste da Av. Salgado Filho (junto ao Parque das Dunas) e nas proximidades do curso do Rio Pitumbu [25], mantidas por evapotranspiração vegetal e umidade do solo, correspondem às maiores leituras de umidade do percurso (73–75%) no trecho lindeiro ao parque.
3. **Ilhas de Poluição e Qualidade do Ar:** os gargalos de emissões veiculares descritos na literatura – o cruzamento da Salgado Filho com a Bernardo Vieira (Midway) e os acessos aos viadutos de Neópolis e Nova Parnamirim – coincidem com as três ilhas de poluição detectadas em cada percurso [25, 22]. A dinâmica dos ventos alísios litorâneos, que auxilia a dispersão na maior parte do trajeto, é localmente anulada pelo efeito de “cânion urbano” gerado pela verticalização na Salgado Filho e Nova Parnamirim, além do tempo de espera nos semáforos, criando microrregiões de retenção de fuligem e gases [25, 22]. A coincidência espacial entre os picos de temperatura e de PM_{2.5} observada nos dados é compatível com esse mecanismo de retenção em nós viários intensamente verticalizados [23].

A leitura integrada da Figura 7, da Tabela 5 e dessa comparação qualitativa com a literatura local permite afirmar que, mesmo sem calibração absoluta, o sistema de baixo custo reproduziu os padrões espaciais de microclima e poluição documentados para o corredor – o que constitui o objetivo central desta prova de conceito.

f. Correlação entre Ilhas de Calor e Poluição

Os dados confirmam que as ilhas de calor não temporárias estão fortemente associadas a zonas com alta concentração de prédios, baixo relevo e intenso fluxo de tráfego, alinhando-se com estudos sobre ilhas de calor urbanas e interação entre temperatura de superfície e qualidade do ar [2, 23]. Observou-se também que zonas com alta umidade e baixa circulação apresentam menor concentração de PM_{2.5}, corroborando o mecanismo de agregação e deposição úmida descrito em estudos de umidade e partículas [27]. A Figura 9 ilustra essa relação espacial, com correlação de Pearson $r = 0,98$.

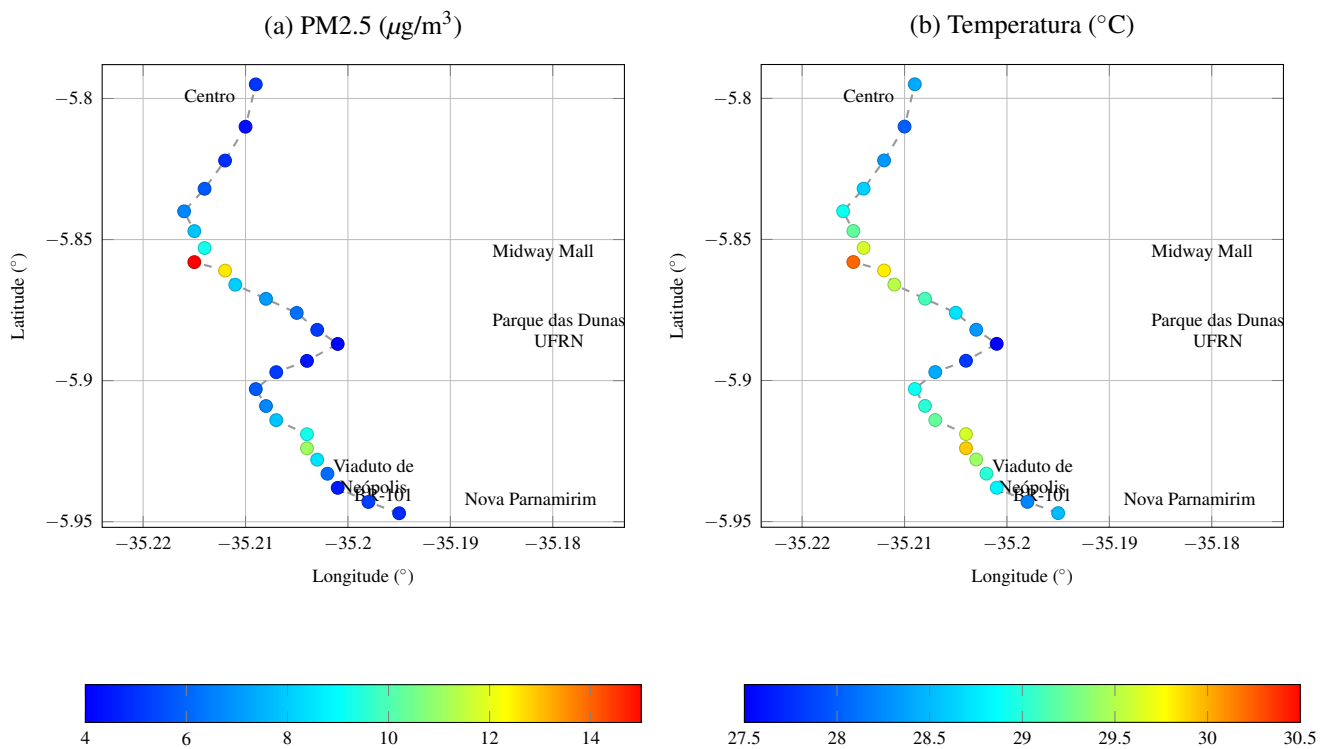


Figura 7: Distribuição espacial das leituras ao longo da rota monitorada: (a) concentração de PM_{2.5}; (b) temperatura do ar. Os maiores valores concentram-se nos nós viários (viaduto de Neópolis e Midway Mall), enquanto os menores ocorrem no trecho do Parque das Dunas/Campus UFRN (ilha de frescor).

TABELA 6: ILHAS DETECTADAS EM MÉDIA POR PERCURSO E SUAS CARACTERÍSTICAS.

Tipo de Ilha	Qtd.	Localização Típica	Mecanismo Observado
Poluição (PM _{2.5})	3	Midway Mall (Centro)	Alta densidade de tráfego e construções
Calor	3	Áreas com pouca vegetação	Retenção de calor em solo exposto
Umidade	2	Zonas fechadas	Ar retido, particulados agregados
Baixo Conforto	2	Áreas quentes e úmidas	Combinação de alta T e H
Ar Preso (Circulação)	1	Áreas abertas	Baixa renovação, alta variabilidade
Albedo	2	Solo arenoso, sem vegetação	Retenção de calor, evaporação intensa

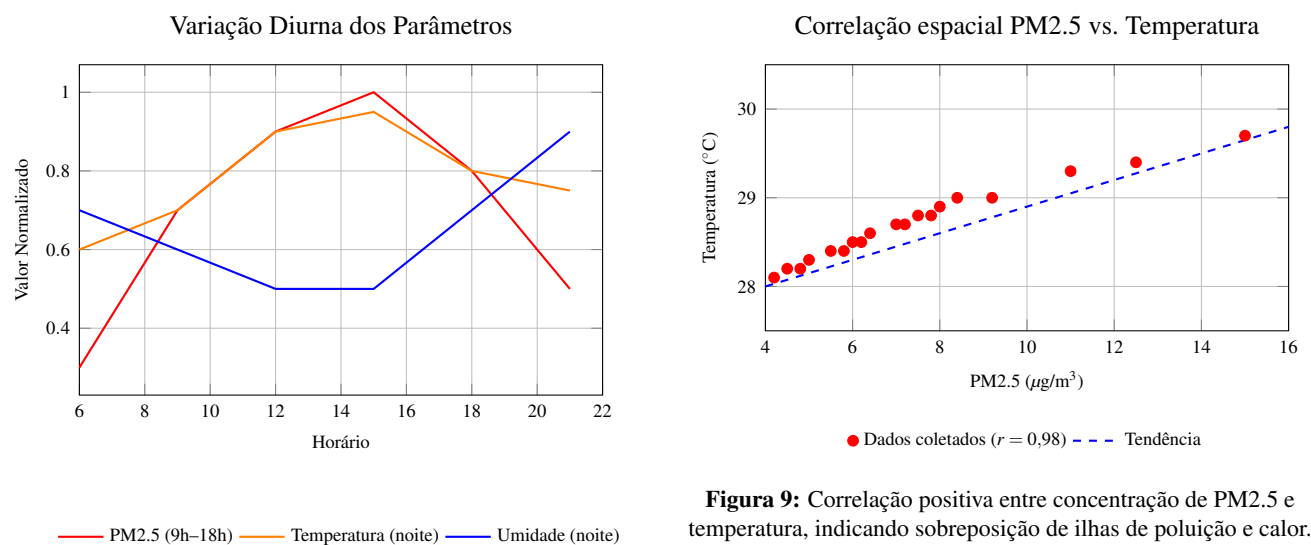


Figura 9: Correlação positiva entre concentração de PM_{2.5} e temperatura, indicando sobreposição de ilhas de poluição e calor.

Figura 8: Perfil diurno dos parâmetros normalizados, destacando picos de PM_{2.5} no horário comercial e elevação da umidade à noite.

V. DISCUSSÃO

a. Evidências de Desempenho dos Sensores na Literatura

A escolha dos sensores SPS30, BME280 e ENS160 é amplamente justificada pela literatura. O SPS30 apresenta a melhor performance entre sensores de baixo custo para PM_{2.5}, com R² mínimo de 0,911 e CV < 6% [7]. Estudos de campo confirmam alta linearidade (R² 0,90–0,99) com instrumentos de referência [7]. O BME280 oferece precisão de ±0,5°C para temperatura, com concordância comprovada em campo com estações de referência após calibração [10]. O ENS160, com sua tecnologia de fusão sensorial, oferece detecção estável de TVOC e eCO₂ [11]. Embora os sensores não tenham sido calibrados individualmente neste estudo, a extensa evidência na literatura indica que os dados são adequados para fins de pesquisa e desenvolvimento metodológico, desde que tratados como medições relativas e não absolutas [3, 4]. Nesse sentido, este estudo não pretende validar os sensores, mas sim demonstrar a viabilidade de uma plataforma de coleta de baixo custo.

b. Avaliação Conceitual da Detecção de Ilhas

Os modelos de detecção de ilhas propostos foram submetidos a uma **avaliação preliminar (prova de conceito)** por meio da correspondência qualitativa com padrões esperados: ilhas de calor em áreas com pouca vegetação e alta densidade construtiva, ilhas de poluição em corredores de tráfego intenso e zonas de ar preso em áreas com baixa circulação. Estes padrões são consistentes com os estudos de UHI em Natal [2, 21, 22, 25] e com modelos de estagnação atmosférica [17, 18]. Não se trata, portanto, de uma validação absoluta do algoritmo de detecção – que demandaria calibração metrológica, campanhas maiores e validação cruzada com instrumentos de referência – mas de uma **validação conceitual** de que a arquitetura proposta é capaz de reproduzir, com recursos de baixo custo, os padrões espaciais documentados na literatura para o corredor monitorado.

c. Técnicas para Redução de Ruído e Falhas de Leitura em Veículos ou Mochilas

Conforme discutido na Metodologia, a vibração e a movimentação são fontes de erro nas leituras, especialmente do sensor óptico de partículas SPS30. Para reduzir o ruído e as falhas de leitura em veículos ou mochilas, as seguintes técnicas podem ser adotadas em ordem crescente de complexidade:

1. **Regressão Múltipla (MLR):** é a mais simples de implementar e validar. Incorpora os dados de um acelerômetro (eixos X, Y e Z) como variáveis adicionais na equação de correção, modelando diretamente o impacto da vibração sobre a leitura bruta:

$$\widehat{PM}_{2.5}(t) = \beta_0 + \beta_1 PM_{2.5}^{bruta}(t) + \beta_2 a_x(t) + \beta_3 a_y(t) + \beta_4 a_z(t) \quad (10)$$

onde $\widehat{PM}_{2.5}$ é a concentração corrigida, $PM_{2.5}^{bruta}$ é a leitura do sensor, a_x , a_y e a_z são as componentes da

aceleração medida pelo acelerômetro do smartphone e β_j são coeficientes ajustados por mínimos quadrados a partir de dados de calibração com instrumento de referência. A Equação 10 modela a correção linear e é adequada quando a relação vibração-efeito é aproximadamente linear e estacionária ao longo do percurso.

2. **Filtro Adaptativo (RLS):** se o ruído for muito variável e a MLR não for suficiente, implementa-se um filtro de mínimos quadrados recursivos (RLS), utilizando o sinal do acelerômetro como entrada de referência de ruído. O filtro RLS adapta seus coeficientes a cada amostra, minimizando recursivamente o erro médio quadrático entre a saída corrigida e o valor esperado, sendo mais robusto a mudanças graduais no perfil de vibração (por exemplo, trechos pavimentados versus trechos irregulares).
3. **Filtro de Kalman:** para sistemas complexos, em que se dispõe de um modelo dinâmico do movimento (posição e velocidade, por exemplo) e de múltiplos sensores, o filtro de Kalman é a solução mais poderosa e robusta: ele funde as leituras dos sensores ambientais com o modelo dinâmico do veículo e os dados do acelerômetro, produzindo estimativas ótimas que ponderam incertezas de cada fonte. Essa abordagem também pode ser combinada com modelos de rede neural para correção não linear dos fatores turbulentos.

Estas técnicas demandam dados de calibração com sensores de referência para ajuste e avaliação, o que constitui trabalho futuro. A mitigação imediata já aplicada na análise dos dados deste estudo foi a inspeção dos picos: leituras coincidentes com eventos bruscos de aceleração foram identificadas e tratadas como suspeitas, evitando que picos espúrios fossem contabilizados como ilhas de poluição.

d. Trabalhos Correlatos e Diferenciais da Proposta

A Tabela 7 compara a solução proposta com trabalhos representativos da literatura de monitoramento móvel. O diferencial central deste trabalho é a combinação, em uma única arquitetura aberta e de custo muito baixo, de (i) hardware com sensores de múltiplos parâmetros (partículas, temperatura, umidade, pressão, TVOC/eCO₂), (ii) aplicativo Android próprio que usa o smartphone já existente para GPS, acelerômetro e buffer local, (iii) envio estruturado para nuvem e (iv) algoritmos de agregação espacial multi-escala e detecção de seis tipos de ilhas urbanas – replicável por qualquer pesquisador ou cidadão.

e. Aplicações e Potencial de Replicação

O sistema é apresentado como uma ferramenta de código aberto, com as seguintes aplicações potenciais:

1. **Monitoramento colaborativo:** Cidadãos podem portar o dispositivo em mochilas durante deslocamentos cotidianos, gerando mapas colaborativos de qualidade do ar.

TABELA 7: COMPARAÇÃO DA SOLUÇÃO PROPOSTA COM TRABALHOS CORRELATOS DA LITERATURA.

Trabalho	Plataforma/Hardware	Sensores	App móvel	Custo	Foco/Diferencial
Apte et al. (2017) [6]	Carros Google Street View instrumentados	Instrumentos de referência (PM2.5, NOx, black carbon)	Não	Alto	Mapeamento de alta resolução; precisão máxima, inviável para replicação em larga escala
Gujar et al. (2025) [5]	STM32 embarcado em 4 ônibus universitários	SDS011 (PM2.5/PM10) e AHT10 (T, UR)	Não	Baixo	6 meses de coleta em Hyderabad; dashboard web; sem processamento móvel local
Mészáros et al. (2025) [16]	Rede fixa de sensores comerciais (AirVisual Pro)	PM2.5 + CO ₂	Não	Médio	Heterogeneidade espacial do PM2.5 entre 8 estações; avaliação da confiabilidade de LCS
Este trabalho	ESP32 + app Android (BLE, GPS, SQLite) + nuvem	SPS30, BME280, ENS160	Sim	Muito baixo (nó < R\$ 500)	Coleta móvel em mochila/ônibus; agregação multi-escala; 6 tipos de ilhas; open-source [12]

2. **Integração em frotas:** O sistema pode ser integrado a ônibus, Ubers ou outros veículos que já possuem GPS e celular, ampliando a cobertura espacial.
3. **Estudos específicos:** Pesquisadores podem adaptar o dispositivo para mapear áreas específicas como parques, shoppings, corredores de transporte ou zonas industriais.
4. **Planejamento urbano:** Os dados gerados podem subsidiar políticas públicas de mobilidade, arborização e zoneamento.

A Tabela 8 resume os potenciais usos do sistema.

f. Limitações do Estudo e Trabalhos Futuros

Impacto da ausência de calibração nas ilhas detectadas. Este trabalho não discute os dados em si com pretensão de precisão metrológica, mas sim a **viabilidade de utilizar equipamentos de baixo custo e o celular para reunir todos os dados e fazer mapeamentos na cidade**, viabilizando a implementação futura de modelos matemáticos e redes neurais para treinar uma inteligência artificial capaz de obter dados confiáveis mesmo com sensores baratos – permitindo que outros trabalhos repliquem e estudem diversos dados sem dificuldade. Como não houve calibração contra um instrumento de referência, não é possível afirmar quantitativamente que os locais detectados são ilhas urbanas em termos absolutos; a confiabilidade dos resultados se limita à detecção qualitativa de gradientes e hotspots, cuja plausibilidade foi corroborada pela comparação com a literatura local (Seção de Resultados). Em síntese, o impacto da falta de calibração é a impossibilidade de afirmações absolutas sobre a cidade, não a impossibilidade de demonstrar a validade conceitual da abordagem.

Amostragem limitada. A coleta foi realizada por apenas **10 dias em 1 rota**. Para o objetivo do trabalho – entregar uma solução de baixo custo pronta para uso, demonstrando que a arquitetura funciona e produz dados coerentes – essa amostra é suficiente como prova de conceito. Ela não é

suficiente, porém, para concluir qualquer coisa definitiva sobre a cidade de Natal: não se está analisando a cidade em si, e dados precisos da cidade exigiriam campanhas de mais longo prazo, cobertura sazonal (outras estações do ano), múltiplas rotas e outros horários, além de calibração. Em outras cidades ou estações, os limiares relativos tendem a se comportar de forma diferente, e a validação da metodologia em outros contextos é trabalho futuro. O que este trabalho busca viabilizar é justamente que qualquer pesquisador use sensores de baixo custo e modelos matemáticos para reduzir falhas de leitura e obter dados úteis, em escala e tempo reduzidos.

Outras limitações já discutidas incluem a conectividade BLE (instabilidade em áreas com alta interferência eletromagnética, mitigada por mecanismos de reconexão e buffer local), o consumo de bateria do smartphone (BLE + GPS contínuos, sem fonte externa), e as variáveis de confusão físicas da coleta móvel (Seção de Metodologia).

Trabalhos futuros incluem:

1. Calibração em campo dos sensores com estações de referência e ajuste dos multiplicadores τ por correlação espacial com estudos documentados;
2. Integração de acelerômetro e aplicação das técnicas de redução de ruído (MLR, RLS e filtro de Kalman) descritas na Seção de Discussão;
3. Ampliação da rede de sensores com múltiplos dispositivos e campanhas sazonais;
4. Desenvolvimento de um dashboard público para visualização dos dados;
5. Dimensionamento da infraestrutura de nuvem para receber requisições simultâneas de uma frota em tempo real (ônibus ou aplicativos de transporte por aplicativo), com filas de mensagens e processamento distribuído.

TABELA 8: APLICAÇÕES POTENCIAIS DO SISTEMA DE MONITORAMENTO MÓVEL.

Cenário de Uso	Plataforma	Aplicação
Monitoramento urbano	Ônibus, Uber, pedestres	Mapas de qualidade do ar e UHI
Estudos de parques	Mochila (pedestre)	Microclima em áreas verdes
Ambientes fechados	Mochila (shopping)	Qualidade do ar indoor
Corredores de transporte	Ônibus, carros	Exposição a poluentes em vias
Planejamento urbano	Dados agregados	Identificação de hotspots
Educação e pesquisa	Código aberto	Reprodução e adaptação

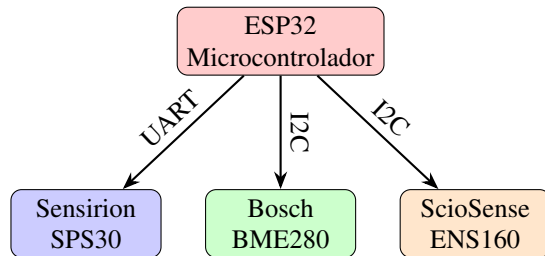


Figura 10: Diagrama de conexão física entre ESP32 e sensores.

VI. DETALHES DE IMPLEMENTAÇÃO E REPRODUÇÃO

Por questão de espaço, os trechos de código e os payloads JSON completos foram omitidos deste manuscrito e disponibilizados no repositório de código aberto do projeto [12]. A seguir, são resumidos os principais detalhes de implementação.

a. Configuração de Conexão dos Sensores ao ESP32

A Figura 10 apresenta o diagrama simplificado de conexão. O SPS30 comunica-se via UART, enquanto BME280 e ENS160 utilizam I2C.

b. Protocolo de Dados

Cada leitura é serializada em um payload JSON compacto com os campos descritos na Seção de Metodologia (pm1p0, pm2p5, pm10p0, tvoc, eco2, aqi, temp, hum, press, bat, uptime). O aplicativo Android acrescenta a geolocalização (latitude, longitude e precisão do GPS) e o horário UTC antes de gravar no buffer SQLite e, posteriormente, enviar o lote para a nuvem.

c. Agregação Espacial

A agregação segue as Equações 1 e 2: para cada ponto recebido, calcula-se a chave da célula e atualiza-se incrementalmente a média e a contagem da célula correspondente, com limite máximo de células memorizadas para garantir estabilidade de memória no aplicativo. O detalhamento do código (estrutura GridCell, controle de limites e rotinas de serialização) está no repositório [12].

VII. CONCLUSÃO

O que este trabalho demonstrou. Foi desenvolvida e testada, em caráter de prova de conceito, uma plataforma completa e de baixo custo para monitoramento ambiental móvel: hardware com ESP32 e sensores SPS30, BME280 e ENS160; transmissão BLE; aplicativo Android com GPS,

buffer SQLite e envio à nuvem; algoritmos de agregação espacial em múltiplas escalas (redução de até 99,85% dos pontos) e detecção de seis tipos de ilhas urbanas (calor, poluição, umidade, conforto, circulação e albedo), com limiares relativos justificados pela literatura. Em 10 dias de coleta em rota de ônibus em Natal-RN, as leituras (PM2.5 entre 4 e 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; temperatura entre 27,9 e 30,0 °C; umidade entre 68 e 75%) mostraram-se estáveis ($\text{CV} \leq 2\%$ para temperatura e umidade), estatisticamente descritas (Tabela 5) e geoespacialmente coerentes: os hotspots de calor e poluição coincidiram com os nós viários documentados na literatura (Midway Mall e viadutos da BR-101), e a ilha de frescor do Parque das Dunas/Campus UFRN apareceu de forma clara nos mapas. A correlação espacial entre PM2.5 e temperatura ($r = 0,98$) reforça a consistência interna dos dados. Essa coerência com estudos prévios constitui a evidência de que a abordagem funciona como viabilizadora de monitoramento de baixo custo, replicável e aberta.

O que ainda não foi comprovado. Não foram realizadas calibração metrológica dos sensores nem validação cruzada com estações de referência ou satélite; portanto, nenhuma afirmação absoluta sobre a cidade de Natal pode ser derivada destes dados. A amostragem (10 dias, 1 rota) é suficiente para a validação conceitual da metodologia, mas insuficiente para caracterização urbana ou climática. O tratamento automatizado de vibração e turbulência (MLR, RLS, filtro de Kalman e modelos de aprendizado de máquina) ainda não foi implementado, pois depende de dados de calibração.

Perspectivas. A integração futura em frotas de ônibus ou aplicativos de transporte (Uber e similares), que já possuem GPS e celular, permitiria medição contínua e em tempo real em escala metropolitana; para isso, a infraestrutura de nuvem deve ser significativamente ampliada para receber múltiplas requisições simultâneas, com filas de mensagens, processamento distribuído e dashboards públicos. O código aberto disponível no repositório [12] permite que qualquer pesquisador ou cidadão replique o sistema, adapte-o e contribua com a expansão da malha de monitoramento ambiental urbano.

REFERÊNCIAS

- [1] World Health Organization, "Who global air quality guidelines: particulate matter (pm2.5 and pm10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide," Geneva, 2021.
- [2] A. T. B. Santos *et al.*, "Urban heat islands in coastal metropolitan areas of fortaleza and natal, northeastern brazil, and their interactions with local wind patterns," Preprint, SSRN, 2024.
- [3] F. Karagulian, M. Barbieri, A. Kotsev, L. Spinelle, M. Gerboles, F. Lagler, N. Redon, S. Crunaire, and A. Borowiak, "Review of

- the performance of low-cost sensors for air quality monitoring,” *Atmosphere*, vol. 10, no. 9, p. 506, 2019.
- [4] B. Alfano, L. Barretta, A. Del Giudice, S. De Vito, G. Di Francia, E. Esposito, F. Formisano, E. Massera, M. L. Miglietta, and T. Polichetti, “A review of low-cost particulate matter sensors from the developers’ perspective,” *Sensors*, vol. 20, no. 23, p. 6819, 2020.
 - [5] S. Gujar, H. Pamireddy, N. S. Maradani, S. Sara, S. Chaudhari, and K. S. Rajan, “Citywide mobile air quality monitoring using gps-enabled low-cost iot sensors,” *E3S Web of Conferences*, vol. 620, p. 01002, 2025.
 - [6] J. S. Apte, K. P. Messier, S. Gani, M. Brauer, T. W. Kirchstetter, M. M. Lunden, D. C. Quiros, A. P. Grieshop, and S. P. Hamburg, “High-resolution air pollution mapping with google street view cars: exploiting big data,” *Environmental Science and Technology*, vol. 51, no. 12, pp. 6999–7008, 2017.
 - [7] D. Agrawal *et al.*, “In chamber calibration and performance evaluation of air quality low-cost sensors,” *Atmospheric Pollution Research*, vol. 15, no. 12, 2024.
 - [8] M. Nothhelfer, A. M. Todea, D. Bathen, and C. Asbach, “Performance evaluation of five different low-cost particulate matter sensors for monodisperse test aerosols,” *Aerosol and Air Quality Research*, 2025.
 - [9] Bosch Sensortec, “Bme280: Combined humidity and pressure sensor – datasheet (bst-bme280-ds002),” Documento técnico, Bosch Sensortec GmbH, 2018.
 - [10] H. A. Kusuma, Yuliani, T. Suhendra, D. Devendra, and D. E. D. Setyono, “Evaluating the accuracy of bmp280 and bme280 sensors for sea level in a coastal environment: a field study at tanjung siambang pier,” *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, vol. 28, no. 2, pp. 189–202, 2023.
 - [11] ScioSense, “Ens160: Digital multi-gas sensor for monitoring air quality – datasheet (sc-001224-ds-9, version 1.3),” Documento técnico, ScioSense B.V., 2023.
 - [12] houslast3, “App de comunicação android (wifi, udp, https ou bluetooth) para coleta de dados ambientais,” Repositório de código aberto disponível em <https://github.com/houslast3/app-android-communication-wifi-udp-https-or-bluetooth->, 2025.
 - [13] N. O. Adelakun, “Development and application of a simplified thermal comfort index for urban environmental monitoring,” *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, 2023.
 - [14] T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, and J. A. Voogt, *Urban Climates*. Cambridge: Cambridge University Press, 2017.
 - [15] S. Croce *et al.*, “Urban microclimate monitoring with mobile transects and low-cost sensors for heat island detection,” *Urban Climate*, vol. 45, 2022.
 - [16] R. Mészáros, Z. Barcza, B. Atfeh, R. Hollós, E. Kristóf, Á. V. Tordai, and V. Groma, “Quantification of the spatial heterogeneity of pm_{2.5} to support the evaluation of low-cost sensors: a long-term urban case study,” *Atmosphere*, vol. 16, no. 9, p. 998, 2025.
 - [17] Q. Huang *et al.*, “The variation of air stagnation and its impact on air quality in china,” *Atmospheric Environment*, vol. 161, pp. 112–120, 2017.
 - [18] Y. Wang *et al.*, “Atmospheric stagnation events and their contribution to urban air pollution episodes,” *Atmospheric Research*, vol. 265, 2022.
 - [19] T. Hidayat *et al.*, “Combined surface albedo index for urban heat island assessment using remote sensing data,” *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, vol. 24, 2021.
 - [20] B. Bechtel, P. J. Alexander, J. Böhner, J. Ching, O. Conrad, J. Feddema, G. Mills, L. See, and I. D. Stewart, “Mapping local climate zones for urban heat island studies,” *Remote Sensing*, vol. 7, no. 2, pp. 1992–2019, 2015.
 - [21] M. J. d. O. Alexandre, “El clima urbano de la ciudad de natal (brasil), aplicando modelos de campo y teledetección orbital,” Ph.D. dissertation, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid, Espanha, 2014.
 - [22] F. R. B. d. Silva, “A influência da velocidade do vento na intensidade das ilhas de calor urbanas na cidade de natal/rn,” Master’s thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, RN, Brasil, 2025.
 - [23] L. Zhang *et al.*, “Interaction between surface urban heat island and air quality in coastal cities,” *Urban Climate*, vol. 59, 2025.
 - [24] Prefeitura Municipal do Natal, “Cidade para pessoas: Arborização nas ações pelo clima,” Natal, RN, 2022, accessed: 2026-08-20. [Online]. Available: https://redus-homolog.s3-sa-east-1.amazonaws.com/initiative_library_items/clb3mzalu000g2l840way95ae-Primeiro%20Lugar%20-%20Natal.%20Proposta%20-%20Cidade%20para%20Pessoas.pdf
 - [25] M. J. de Oliveira Alexandre, “Ilhas de calor urbanas em natal-rn: análise integrada das condições térmicas, higrômicas e ventos na área metropolitana,” Projeto de pesquisa aplicada, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), 2026, accessed: 2026-08-20. [Online]. Available: <https://portal.ifrn.edu.br/projetos-de-pesquisa/8127/>
 - [26] I. D. Stewart and T. R. Oke, “Local climate zones for urban temperature studies,” *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 93, no. 12, pp. 1879–1900, 2012.
 - [27] S. Kaur *et al.*, “Influence of relative humidity and low wind conditions on particulate matter accumulation in urban canyons,” *Atmospheric Pollution Research*, 2025.



2026

Volume 7 Issue 3

Support