

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Instituto de Ciências Exatas - Departamento de Ciência da Computação
Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica

Luiz Carlos da Silva

**MOBILIDADE URBANA DESCENTRALIZADA: proposição e estudo de caso de um
modelo baseado em tecnologias distribuídas**

Belo Horizonte
2025

Luiz Carlos da Silva

**MOBILIDADE URBANA DESCENTRALIZADA: proposição e estudo de caso de um
modelo baseado em tecnologias distribuídas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica, área de concentração: Transformação Digital e Inteligência Artificial.

Orientador: Adriano César Machado Pereira

Ficha Catalográfica

Silva, Luiz Carlos da.
S586m Mobilidade urbana descentralizada [manuscrito] : proposição e estudo de caso de
2025 um modelo baseado em tecnologias distribuídas / Luiz Carlos da Silva. 2025.
D 98 f. : il., gráfs., tabs.

Orientador: Adriano César Machado Pereira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Química (Programa de Pós-Graduação em Inovação Tecnológica).

Bibliografia: f. 94-97.

Apêndice: f. 98.

1. Inovações tecnológicas – Teses. 2. Desenvolvimento sustentável – Teses. 3. Transporte urbano – Teses. 4. Inteligência artificial distribuída – Teses. 5. Tecnologia – Teses. 6. Banco de dados distribuído – Teses. 7. Criptografia de dados (Computação) – Teses. 8. Método de casos – Teses. 9. Engenharia de tráfego – Teses. I. Pereira, Adriano César Machado, Orientador. II. Título.

CDU 043



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

ATA

ICEX - PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

ATA DA SESSÃO DE DEFESA DA 40ª DISSERTAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, DO DISCENTE LUIZ CARLOS DA SILVA, Nº DE REGISTRO 2023704221.

Aos oito dias do mês de agosto de 2025, às 9 horas e 30 minutos, na sala 6321 do Departamento de Ciência da Computação, reuniu-se a Comissão Examinadora composta pelos Professores Doutores: Adriano César Machado Pereira do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG (orientador e presidente da banca), Marcelo Franco Porto da Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG e Eduardo Romeiro Filho do Programa de Pós-graduação em Inovação Tecnológica da UFMG, para julgamento da dissertação de mestrado em Inovação Tecnológica - Área de Concentração: Transformação Digital e Inteligência Artificial, do discente Luiz Carlos da Silva, dissertação intitulada: **“Mobilidade Urbana Descentralizada: Proposição e Estudo de Caso de um Modelo Baseado em Tecnologias Distribuídas”**. O presidente da banca abriu a sessão e apresentou a banca examinadora, bem como esclareceu sobre os procedimentos que regem a defesa pública de dissertação. Após a exposição oral do trabalho pelo discente foi realizada arguição pelos membros da banca examinadora, com a respectiva defesa do candidato. Finda a arguição, a banca examinadora se reuniu, sem a presença do discente e do público, tendo deliberado unanimemente pela sua **APROVAÇÃO**. Nada mais havendo para constar, lavrou-se e fez a leitura pública desta ata, que segue assinada por mim, pelos membros da banca examinadora e pelo coordenador do programa. Belo Horizonte, 08 de agosto de 2025.

Professor Doutor Adriano César Machado Pereira (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Marcelo Franco Porto
(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)

Professor Doutor Eduardo Romeiro Filho
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa

Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica da UFMG



Documento assinado eletronicamente por **Marcelo Franco Porto, Professor do Magistério Superior**, em 01/09/2025, às 11:21, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Cesar Machado Pereira, Servidor(a)**, em 16/09/2025, às 13:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Romeiro Filho, Professor do Magistério Superior**, em 17/09/2025, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan Claudius Queiroz Barbosa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 17/09/2025, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **4485591** e o código CRC **02066B59**.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ICEX - PÓS-GRADUAÇÃO EM INOVAÇÃO TECNOLÓGICA

PARECER Nº 19/2025

**“MOBILIDADE URBANA DESCENTRALIZADA: PROPOSIÇÃO E ESTUDO DE CASO
DE UM MODELO BASEADO EM TECNOLOGIAS DISTRIBUÍDAS”.**

LUIZ CARLOS DA SILVA, Nº DE REGISTRO 2023704221.

Dissertação **Aprovada** pela banca examinadora constituída pelos professores doutores:

Professor Doutor Adriano César Machado Pereira (Orientador)
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Marcelo Franco Porto
(Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG)

Professor Doutor Eduardo Romeiro Filho
(PPG em Inovação Tecnológica da UFMG)

Professor Doutor Allan Claudius Queiroz Barbosa
Coordenador do PPG em Inovação Tecnológica da UFMG

Belo Horizonte, 08 de agosto de 2025.



Documento assinado eletronicamente por **Adriano Cesar Machado Pereira, Servidor(a)**, em 16/09/2025, às 13:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Romeiro Filho, Professor do Magistério Superior**, em 17/09/2025, às 16:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Allan Claudius Queiroz Barbosa, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 17/09/2025, às 17:42, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4485607** e o código CRC **417F6347**.

Referência: Processo nº 23072.251521/2025-41

SEI nº 4485607

AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o apoio, incentivo e orientação de pessoas que foram fundamentais em minha trajetória acadêmica e pessoal.

Agradeço, ao meu orientador, o Prof. Adriano C. Machado Pereira, pela confiança, pelos valiosos ensinamentos e por me oferecer a oportunidade de desenvolver e demonstrar este trabalho. Sua orientação técnica e intelectual foi essencial para a construção desta pesquisa.

Expresso minha profunda gratidão à minha mãe, Henriqueta Aparecida Couto da Silva, e ao meu pai, Luiz Gomes da Silva, por todo amor, apoio incondicional e incentivo contínuo ao longo da minha vida. Suas palavras de encorajamento e o exemplo de dedicação e perseverança sempre foram minha base.

Registro também meu sincero agradecimento ao Prof. Rone Ilídio, meu orientador na graduação, que, mesmo após essa etapa, nunca deixou de acompanhar minha evolução acadêmica e profissional. Seu apoio constante e genuíno interesse no meu crescimento foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui.

Agradeço ainda aos meus companheiros de trabalho, pelo incentivo constante, pela parceria no dia a dia e por sempre acreditarem em meu potencial. O apoio de vocês foi essencial para que eu mantivesse o foco e a motivação ao longo desta jornada.

A todos vocês, dedico este trabalho, que é resultado não apenas do meu esforço, mas também do apoio incondicional que recebi de cada um de vocês. Muito obrigado!

“The people who are crazy enough to think they can change the world are the ones who do.”
(Steve Jobs.)

RESUMO

Este trabalho propõe um modelo descentralizado de mobilidade urbana, fundamentado na tecnologia *blockchain* como infraestrutura digital voltada à promoção de transparência, segurança e interoperabilidade entre diferentes modais de transporte. A proposta busca, com base no estado da arte, materializar-se por meio de um aplicativo descentralizado (*dApp*) integrado a uma carteira digital, que permita aos usuários registrar, validar e compartilhar informações de deslocamento de forma segura e auditável, por meio da interação com contratos inteligentes executados em redes de teste.

O estudo parte da análise de desafios estruturais recorrentes em centros urbanos brasileiros, como a fragmentação dos serviços, a centralização na gestão de dados e a ausência de mecanismos confiáveis de verificação por parte dos usuários. Como resposta, apresenta-se um Produto Mínimo Viável (MVP), composto por um *dApp* e um contrato inteligente na *Ethereum Testnet*, que busca demonstrar a viabilidade técnica de uma arquitetura descentralizada. A adoção da metodologia proposta por [Munari \(1981\)](#) para a estruturação de projetos orienta o desenvolvimento da solução a partir da identificação precisa do problema, formulação de hipóteses e construção de um protótipo funcional, com potencial técnico e alinhada aos princípios de inovação, funcionalidade e aplicabilidade prática no contexto da mobilidade urbana.

O modelo propõe integrar os conceitos de Cidades Inteligentes, Mobilidade como Serviço, sustentabilidade e Internet das Coisas, buscando oferecer uma alternativa modular, escalável e centrada no usuário para a transformação digital da mobilidade urbana.

Por fim, a proposta pretende demonstrar benefícios relevantes para a gestão da mobilidade, como a redução da fragmentação dos serviços, o fortalecimento da confiança nas transações e o incentivo a práticas sustentáveis. Além disso, visa contribuir tanto no campo acadêmico quanto no prático, ao apresentar diretrizes, ferramentas e evidências iniciais que sustentem o uso de tecnologias emergentes — como *blockchain*, MaaS e AIoT — na construção de cidades mais inteligentes, integradas e orientadas ao bem-estar coletivo.

Palavras-chave: Mobilidade Urbana; *Blockchain*; Cidades Inteligentes; *Mobilidade como Serviço (MaaS)*; Sustentabilidade; Aplicativo Descentralizado (*dApp*); *Inteligência Artificial das Coisas (AIoT)*; Contrato Inteligente; *Produto mínimo viável (MVP)*; Descentralização; Interoperabilidade.

ABSTRACT

This dissertation proposes a decentralized model for urban mobility, grounded in blockchain technology as a digital infrastructure aimed at promoting transparency, security, and interoperability among different modes of transportation. Based on the current state of the art, the proposal seeks to be materialized through a decentralized application (dApp) integrated with a digital wallet, enabling users to register, validate, and share mobility data securely and audibly via interaction with smart contracts deployed on test networks.

The study begins by analyzing recurring structural challenges in Brazilian urban centers, such as service fragmentation, centralized data management, and the lack of reliable user-side verification mechanisms. In response, a Minimum Viable Product (MVP) is presented, consisting of a dApp and a smart contract deployed on the Ethereum Testnet, aiming to demonstrate the technical feasibility of a decentralized architecture. The methodology proposed by Bruno Munari for project structuring guides the development process through accurate problem identification, hypothesis formulation, and the construction of a functional prototype. This results in a user-centered proposal with technical potential, aligned with the principles of innovation, functionality, and practical applicability in the context of urban mobility.

The model proposes to integrate the concepts of Smart Cities, Mobility as a Service (MaaS), sustainability, and Artificial Intelligence of Things (AIoT), offering a modular, scalable, and user-oriented alternative for the digital transformation of urban mobility.

Finally, the proposal aims to highlight potential benefits for urban mobility management, such as reducing service fragmentation, strengthening trust in transactions, and encouraging sustainable practices. Additionally, it intends to contribute to both academic and practical fields by presenting guidelines, tools, and preliminary evidence that support the use of emerging technologies — such as blockchain, MaaS, and AIoT — in building smarter, more integrated, and citizen-centered cities.

Keywords: *Urban Mobility; Blockchain; Smart Cities; Mobility as a Service (MaaS); Sustainability; Decentralized Application (dApp); Artificial Intelligence of Things (AIoT); Smart Contract; Minimum Viable Product (MVP); Decentralization; Interoperability.*

LISTA DE FIGURAS

1.1	Mapa mental da estrutura da dissertação. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	20
1.2	Transporte urbano no cotidiano. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	22
2.1	Conhecimento do termo smart city pelos cidadãos. Fonte: (Cunha et al., 2016)	26
2.2	Cenários comparativos de deslocamento com e sem MaaS. Fonte: Confederação Nacional do Transporte (2022)	28
2.3	Database Tradicional. Fonte: (CoinSpectator, 2025)	31
2.4	Blockchain Database. Fonte: (CoinSpectator, 2025)	31
2.5	Arquitetura em camadas dos sistemas <i>blockchain</i> , da infraestrutura física aos protocolos de escalabilidade. Fonte: (Gangwal et al., 2023).	33
2.6	Um exemplo de <i>blockchain</i> é uma cadeia contínua de blocos interligados. Fonte: (Zheng et al., 2017).	35
2.7	Representação esquemática da estrutura de um bloco em uma <i>blockchain</i> . Fonte: (Zheng et al., 2017).	35
2.8	Um exemplo de <i>blockchain</i> é uma cadeia contínua de blocos interligados. Fonte: (Zheng et al., 2017).	38
2.9	Representação esquemática da estrutura de um bloco em uma <i>blockchain</i> . Fonte: (Zheng et al., 2017).	39
3.1	Modelo com estágios de evolução <i>Smart Cities</i> . Fonte: (Cunha et al., 2016)	43
3.2	Proporção de domicílios com computador, por região do Brasil. Fonte: (Cunha et al., 2016)	44
3.3	Cases internacionais. Fonte: (Cunha et al., 2016)	45
3.4	Diagrama arquitetônico do sistema de otimização de tráfego em cidades inteligentes. Fonte: (Jaramillo-Alcazar et al., 2023)	47
3.5	Arquitetura de alto nível do framework. Fonte: (Ozpinar, 2023)	49
3.6	Proposta de arquitetura baseada em <i>blockchain</i> . Fonte: (Nguyen et al., 2023)	51
4.1	Processo Metodológico proposto Munari. Fonte: Munari (1981).	57
4.2	Etapas do método de Bruno Munari aplicadas ao processo de desenvolvimento do produto. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	59
4.3	Etapas do método de Bruno Munari aplicadas ao processo de desenvolvimento do produto. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	60
4.4	Comparação dos dados OD - BH 2002 á 2012. Fonte: (Costa da, 2016)	66
4.5	Análise Comparativa dos Resultados de Pesquisa sobre o Uso do Transporte Público em Belo Horizonte. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	67
4.6	Análise Comparativa dos principais meios de transporte utilizados no dia a dia. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	68
4.7	Comparativo dos Tempos de Trajeto na Cidade de Belo Horizonte. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	68
4.8	Avaliação dos Usuários sobre as Condições do Trânsito em Belo Horizonte. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	69

4.9	Avaliação dos principais problemas que você percebe no transporte público Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	70
4.10	Avaliação de Iniciativas para a Promoção de Meios de Transporte Mais Sustentáveis. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	70
4.11	Familiaridade com o Conceito de <i>Smart City</i> entre os Respondentes. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	71
4.12	Conhecimento sobre o Conceito de MaaS	71
4.13	Proposta de um modelo de serviço digital descentralizado. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	73
4.14	Visão Geral da Arquitetura. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	74
4.15	Arquitetura de integração entre a aplicação web e a blockchain e utilização dos serviços AWS. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	75
4.16	Exibição do smart contract utilizado para gerenciamento de informações de mobilidade urbana, destacando os principais atributos e funções.Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	77
4.17	Deploy do Smart Contract na Binance Smart Chain Testnet. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	78
4.18	Visualização das transações associadas ao Smart Contract registradas na Binance Smart Chain Testnet por meio da interface do BscScan. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	79
4.19	Detalhes da Transações do Smart Contract. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	79
4.20	Configuração e utilização da MetaMask. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	81
4.21	Enviando transações com a MetaMask. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	82
4.22	Processo de autenticação utilizando o e-mail do Google. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	83
4.23	Detalhamento das Jornadas e Deslocamentos dos Usuários. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	83
4.24	Cadastramento de novas Jornadas. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	85
4.25	Importância das variáveis no modelo Gradient Boosting. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	86
4.26	Comparativo entre valores reais e previstos de <i>gasFeeBNB</i> . Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	88
4.27	Resíduos do modelo de regressão linear na previsão da <i>gasFee</i> . Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.	88

LISTA DE TABELAS

4.1	Resumo das etapas metodológicas da pesquisa	56
4.2	Comparação entre modelos aplicados	86

LISTA DE SIGLAS

AI Artificial Intelligence	18
IoT Internet das Coisas	18
MaaS Mobility as a Service	20
PlanMob-BH Plano Diretor de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte	22
ICP Índice de Cumprimento da Programação	22
ICV Índice de Conforto da Viagem	22
ISV Índice de Segurança da Viagem	22
BRT Bus Rapid Transit	22
MVP Mínimos Produtos Viáveis	24
TIC Tecnologia da Informação e Comunicação	25
dApps Decentralized Applications	32
TPS transações por segundo	32
PoW Proof-of-Work	36
PoS Proof-of-Stake	36
PoS Proof-of-Stake	36
DPoS Delegated Proof-of-Stake	36
PoA Proof-of-Authority	36
PoET Proof-of-Elapsed Time	36
SGX Software Guard Extensions	36
PoB Proof-of-Burn	37
PoI Proof-of-Importance	37
PoW Proof-of-Work	39
PoS Proof-of-Stake	39
PoS Proof-of-Stake	39
DPoS Delegated Proof-of-Stake	39
PoA Proof-of-Authority	40
PoET Proof-of-Elapsed Time	40
SGX Software Guard Extensions	40
PoB Proof-of-Burn	40
PoI Proof-of-Importance	40
PNMC Política Nacional sobre Mudança do Clima	44
EA Enterprise Architecture	48
TIC Tecnologias da Informação e Comunicação	48
PoC Prova de Conceito	49
ITS Sistemas de Transporte Inteligentes	50
OTP OpenTripPlanner	50
ZKP Zero-Knowledge Proofs	51
DAG Directed Acyclic Graph	52
IPFS InterPlanetary File System	52
NeTEx Network Timetable Exchange	52
SIRI Service Interface for Realtime Information	52

OSM OpenStreetMap	52
MAASiFiE <i>Mobility as a Service for Linking Europe</i>	65
AWS Amazon Web Services	75
REST Representational State Transfer	76
HTTP Hypertext Transfer Protocol	76
dApp Decentralized Application	76
UUID <i>Universally Unique Identifier</i>	78
OSF <i>Open Software Foundation</i>	78
BNB Binance Coin	78
BNB Binance Coin	78
ETH Ether	81
ERC-20 Ethereum Request for Comments 20	81
NFTs Tokens Não Fungíveis	81
EVM Ethereum Virtual Machine	81
DeFi Finanças Descentralizadas	81
JSON JavaScript Object Notation	84
RMSE Raiz Do Erro Quadrático Médio	87
TRL Technology Readiness Level	91
DAOs Decentralized Autonomous Organizations	92
TRL Technology Readiness Level	98

SUMÁRIO

1	Introdução	17
1.1	Organização do Trabalho	19
1.2	Definição do Problema	21
1.3	Pergunta de pesquisa	23
1.4	Objetivos	24
1.4.1	Objetivos Específicos	24
1.5	Contribuições	24
2	Fundamentos conceituais	25
2.1	Smart Cities	25
2.1.1	Mobility as a Service (MaaS)	27
2.2	Blockchain	30
2.2.1	Plataformas Blockchain	32
2.2.2	Algoritmos de consenso	34
2.2.3	Algoritmos de consenso	38
3	Trabalhos Relacionados	42
3.1	Smart Cities	42
3.2	Mobilidade Sustentável com Blockchain e AIoT	46
3.3	Gamificação, Blockchain e MaaS para Sustentabilidade em Smart Cities	48
3.4	Aplicações de Blockchain e Desafios Operacionais	50
3.5	Análise Crítica da Literatura	53
4	Metodologia	55
4.1	Abordagem Metodológica de Bruno Munari	56
4.2	Estudo de caso: Aplicação do método de Bruno Munari para adaptação do processo	58
4.2.1	Problema	61
4.2.2	Definição do Problema	61
4.2.3	Componentes do problema	64
4.2.4	Coleta de Dados e Análise de Dados	64
4.2.5	Criatividade	72
4.2.6	Materiais, Tecnologia e Experimentação	74
4.2.7	Modelo e Verificação	84
4.3	Considerações Finais sobre o Método de Bruno Munari	89
5	Conclusão e Trabalhos Futuros	90
5.1	Avaliação TRL	91
5.2	Limitações	91
5.3	Trabalhos Futuros	92
	REFERÊNCIAS	94

Capítulo 1

Introdução

Durante a evolução humana, a sociedade passou por diversas revoluções industriais. A primeira delas teve início no século XVIII. Antes desse período, a produção era totalmente manual e o crescimento populacional, aliado à crescente demanda por produtos, tornou esse método de fabricação insuficiente.

Uma análise apresentada dos períodos mais transformadores da história moderna, destacando-se pela profunda transformação econômica e social ocorrida especialmente na Inglaterra. Trata-se de uma era marcada por avanços tecnológicos significativos, como a invenção da máquina a vapor e a mecanização da indústria têxtil. Essas inovações não apenas revolucionaram os processos produtivos, como também transformaram profundamente a dinâmica do trabalho. As fábricas passaram a ser construídas longe dos rios o que anteriormente eram indispensáveis como fonte de energia hidráulica. Esse avanço aumentou significativamente a produção e a eficiência industrial, porém reduziu a demanda por mão de obra artesanal, promovendo uma reestruturação do mercado de trabalho (Hobsbawm, 2015).

O trabalho passou a ser regulado pelo ritmo das máquinas, o que tornou o tempo um recurso ainda mais valioso e uma nova ética de trabalho que priorizava a produtividade em um contexto industrializado para aqueles que buscavam maximizar seus ganhos. Essa transformação não ocorreu de maneira uniforme e que sim as mudanças sociais que acompanharam tais revoluções geraram tensões e desafios, incluindo a exploração do trabalho, as condições precárias nas fábricas e o surgimento de uma nova classe trabalhadora (Hobsbawm, 2015).

Por fim a Revolução Industrial, portanto, não apenas estabeleceu as bases para a economia industrializada, mas também lançou as fundações para os movimentos sociais e políticos que buscariam reformar as injustiças emergentes, ela nos ajuda a compreender a complexidade desse período, que foi fundamental para moldar o mundo moderno, trazendo tanto progresso quanto novos desafios sociais.

No final do século XIX e início do século XX, a Segunda Revolução Industrial introduziu avanços significativos que transformaram a vida cotidiana, destacando-se a eletricidade e suas múltiplas aplicações. A eletricidade passou a ser amplamente utilizada, não apenas para iluminação pública e doméstica, mas também para melhorar as condições de vida, estendendo as horas produtivas e possibilitando o desenvolvimento de novas indústrias. Esse período foi também marcado pelo desenvolvimento de novas formas de comunicação, como a invenção do telégrafo e do telefone, que revolucionaram a transmissão de informações e conectaram regiões distantes, acelerando o comércio e a troca de informações.

Essas inovações tecnológicas que surgiram isoladamente foram fruto de um ambiente de progresso contínuo, o qual tanto as grandes invenções, conhecidas como macro-invenções, quanto as melhorias incrementais ou microinvenções, desempenharam papéis cruciais. Embora as macro-invenções como a eletricidade e o telefone tenham tido um impacto imediato e visível, foram as microinvenções que, ao longo do tempo, garantiram a constante evolução e refinamento das tecnologias. O conhecimento tecnológico, que ele distingue como "saber como", cresceu em importância e se expandiu a partir de uma base de conhecimento científico que, por sua vez, foi influenciado e refinado pelas necessidades tecnológicas da época (Mokyr, Strotz, 1998). Assim, a Segunda Revolução Industrial não foi apenas um período de novas descobertas, mas também de uma maior eficiência na aplicação do conhecimento existente, resultando em um avanço generalizado nas capacidades produtivas da sociedade.

Esse ciclo de retroalimentação entre ciência e tecnologia também explica o avanço das indústrias químicas, de materiais e de medicina, que, embora inicialmente desprovidas de uma base científica robusta,

acabaram por impulsionar o desenvolvimento de novos métodos de pesquisa e aperfeiçoamento tecnológico. Eventualmente, o contínuo progresso tecnológico levou a uma maior compreensão dos processos naturais, eliminando práticas arcaicas e ineficazes e abrindo caminho para inovações mais fundamentadas e eficientes (Mokyr, Strotz, 1998).

A Terceira Revolução Industrial iniciou-se na década de 1970, marcada pelo advento de tecnologias digitais e pela transformação dos processos industriais e sociais. Com a introdução e popularização dos computadores, houve um avanço significativo na automação e na eficiência das operações industriais. Esses novos sistemas computacionais permitiram a automação de tarefas complexas e repetitivas, o que aumentou a produtividade e reduzindo os custos operacionais (Greenwood, 1997).

O autor destaca também como a invenção e expansão da Internet e das redes globais conectaram o mundo de maneira sem precedentes, o que facilitou o compartilhamento instantâneo de informações e a colaboração entre pessoas e organizações. Isso permitiu a globalização dos mercados e a integração das cadeias de suprimentos internacionais. No campo das relações sociais, a revolução tecnológica alterou a forma como as pessoas interagem e trabalham. A digitalização e as novas ferramentas de comunicação promoveram a criação de novas formas de trabalho e interação social, formando uma sociedade mais conectada e informada. A Terceira Revolução Industrial mudou a maneira como as pessoas pensam sobre a importância da sustentabilidade e da eficiência energética, com um crescente foco em desenvolver tecnologias que minimizem o impacto ambiental.

Por fim, em 2011, iniciou-se a Quarta Revolução Industrial, também conhecida como Indústria 4.0. Essa fase se caracteriza pela integração e interconexão de tecnologias digitais, físicas e biológicas, levando a uma transformação profunda nos processos industriais e na sociedade. A Quarta Revolução Industrial é marcada pela adoção de tecnologias avançadas, como Inteligência Artificial (**AI**), que permite sistemas autônomos e aprendizado de máquina; a robótica avançada, que inclui robôs colaborativos e autônomos que aumentam a eficiência e flexibilidade da produção; e a computação em nuvem, que oferece escalabilidade e acessibilidade de dados e serviços através da *Internet*. Além disso, a Internet das Coisas (**IoT**) conecta uma vasta gama de dispositivos e sistemas, o que permite a coleta e análise de dados em tempo real para otimizar operações e processos. Tecnologias emergentes, como a impressão 3D e a biotecnologia, também desempenham um papel crucial, e promove inovações na fabricação e na saúde (Schwab, 2019).

É destacado também que essa revolução não apenas transforma a forma como se produz e se consome, mas também altera a dinâmica do trabalho, com novos modelos de negócios e mudanças nas relações profissionais. Traz consigo oportunidades significativas para inovação e eficiência, mas também apresenta desafios, como questões de privacidade, segurança cibernética e a necessidade de requalificação da força de trabalho. Representa uma nova era de interconectividade e automação, moldando o futuro da economia e da sociedade de maneira global e abrangente.

Ao longo das quatro revoluções industriais, a mobilidade urbana enfrentou uma série de desafios, incluindo o aumento do fluxo de veículos nas cidades, o congestionamento das vias urbanas e a poluição. Com o tempo, tornou-se necessário integrar diversos sistemas de transporte, como ferrovias, bondes e automóveis.

A crescente complexidade das cidades modernas intensificou a demanda por sistemas de mobilidade inteligentes e soluções sustentáveis. A integração eficiente de diferentes meios de transporte requer inovações tecnológicas que otimizem rotas, reduzam o tempo de viagem e aprimorem a experiência do usuário, com um enfoque crescente em práticas ecológicas. Investimentos em infraestruturas, como ciclovias e a promoção de alternativas de transporte, como bicicletas e scooters elétricos, estão se tornando cada vez mais comuns. Esses esforços não apenas buscam aliviar o congestionamento, mas também promover um estilo de vida mais saudável e sustentável.

No entanto, é importante destacar os desafios enfrentados pelos governantes na implementação

de políticas habitacionais populares. O preço mais baixo da terra em áreas distantes dos centros comerciais frequentemente resulta em políticas habitacionais que reforçam o imobilismo dos mais pobres e contribuem para a formação de cidades-dormitório. Essa dinâmica aumenta a pressão sobre o custo global do transporte (Carvalho, 2016).

No contexto atual de cidades cada vez mais complexas e conectadas, a integração de tecnologias digitais avançadas mostra-se fundamental para aprimorar os sistemas de mobilidade urbana. Entre essas inovações, a tecnologia *blockchain* destaca-se pelo potencial de oferecer maior transparência, segurança e confiabilidade nas transações e no compartilhamento de informações entre diferentes atores do ecossistema de transporte. Sua aplicação pode favorecer a integração entre modais como ônibus, trens e bicicletas compartilhadas, viabilizar uma coordenação mais eficiente e reduzir gargalos operacionais. A análise de dados em tempo real, combinada à descentralização, abre caminho para soluções que otimizam rotas, reduzem congestionamentos e melhoram a alocação de recursos. Adicionalmente, a convergência com dispositivos da *Internet of Things* (IoT) permite a comunicação direta entre sensores, veículos e plataformas digitais, ampliando as possibilidades de monitoramento e tomada de decisão.

1.1 Organização do Trabalho

A estrutura deste trabalho está organizada de forma sintética e hierárquica na Figura 1.1, com o intuito de proporcionar uma visão clara e objetiva dos principais temas, capítulos e etapas que compõem a pesquisa. O tema central — *Mobilidade Urbana Descentralizada com Blockchain* — ocupa a posição central do diagrama, a partir da qual se desdobram os eixos que norteiam o trabalho.

O texto introdutório apresentado anteriormente oferece uma contextualização histórica das revoluções industriais e de suas consequências sociais, econômicas e tecnológicas. Essas transformações estruturaram o mundo contemporâneo e exerceram influência direta sobre os padrões de urbanização e mobilidade. Além disso, a introdução aborda os impactos do processo de industrialização sobre a dinâmica das cidades, os desafios enfrentados pela mobilidade urbana e a necessidade crescente de soluções sustentáveis e integradas. Com isso, justifica-se a relevância do tema tratado. A seção também delimita os objetivos gerais e específicos da pesquisa, situando-a no campo das tecnologias emergentes aplicadas à gestão urbana.

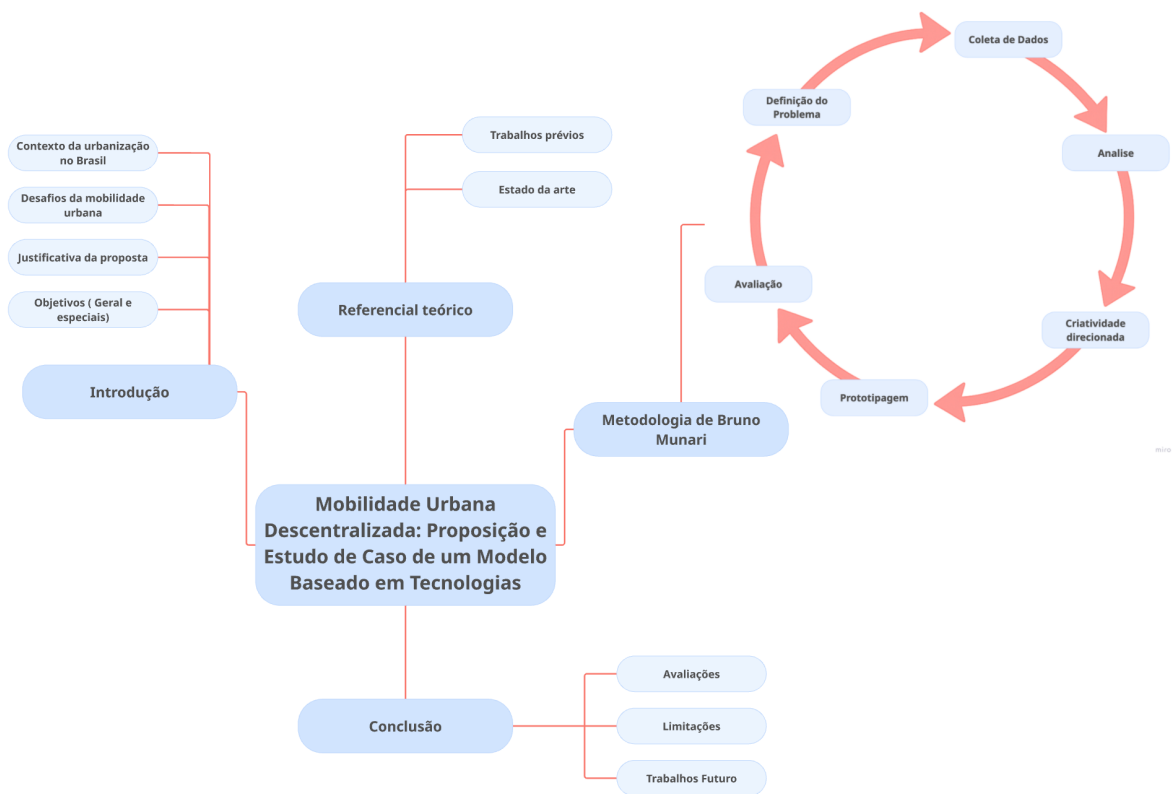


Figura 1.1: Mapa mental da estrutura da dissertação. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Dando continuidade à estrutura do trabalho, o capítulo seguinte apresenta a Definição do Problema, com a exposição crítica dos principais entraves enfrentados pelos sistemas de mobilidade urbana atuais, especialmente aqueles associados a modelos centralizados e fragmentados. Essa seção destaca os desafios relacionados à integração entre diferentes modais de transporte, à ausência de interoperabilidade entre sistemas, à escassez de dados confiáveis em tempo real e aos impactos negativos dessa realidade sobre a experiência dos usuários e a eficiência dos serviços. A análise é complementada com a demonstração de como a centralização das informações compromete a eficácia das políticas públicas e acentua desigualdades no acesso à mobilidade.

A partir dessa problematização, os capítulos subsequentes apresentam a pergunta de pesquisa, os objetivos gerais e específicos, e as contribuições esperadas do estudo. Essas seções delineiam a proposta de um modelo descentralizado de mobilidade urbana fundamentado na tecnologia *blockchain*, com ênfase em seu potencial para promover segurança, transparência, eficiência operacional e participação cidadã em um ecossistema urbano inteligente e resiliente.

O segundo ramo, dedicado aos referenciais teóricos, apresenta os fundamentos conceituais que sustentam a pesquisa. A seção reúne uma revisão da literatura sobre temas centrais, como *Smart Cities*, *Blockchain*, algoritmos de consenso e o conceito de *Mobility as a Service (MaaS)*. Além disso, contempla a análise de trabalhos correlatos e do estado da arte, situando a proposta no contexto acadêmico e tecnológico contemporâneo.

- Trabalhos prévios;
- Estado da arte.

Inspirada na proposta metodológica de Bruno Munari, a seção 4.1 adota sua abordagem para decompor o problema e analisar cada uma de suas partes de forma sistemática, com o objetivo de elaborar soluções mais precisas, funcionais e coerentes com a realidade observada. Como parte desse processo, foram desenvolvidos protótipos e Mínimos Produtos Viáveis MVP a fim de validar o estado da arte, testar hipóteses e aprimorar a proposta com base em evidências concretas.

A parte final do trabalho apresenta a síntese dos principais resultados, verifica o alcance dos objetivos propostos e oferece recomendações para pesquisas futuras, com destaque para possíveis aplicações da proposta em diferentes contextos urbanos. São abordados, ainda, os seguintes tópicos:

- Avaliações: Discussão dos resultados obtidos com base nas métricas de desempenho analisadas.
- Limitações: Identificação de aspectos que restringiram o escopo ou a generalização dos resultados.
- Trabalho Futuro: Propostas de aprimoramento da solução e continuidade da pesquisa em ambientes mais amplos ou com novos recursos tecnológicos.

A partir de uma contextualização histórica e da problematização atual, o trabalho avança para a construção de um referencial teórico, fundamentado nas transformações tecnológicas e urbanas contemporâneas. Esse arcabouço é complementado por uma análise do estado da arte, que identifica lacunas na literatura e destaca os avanços mais relevantes no uso de tecnologias descentralizadas aplicadas à mobilidade urbana.

1.2 Definição do Problema

Atualmente, os sistemas projetados para auxiliarem a mobilidade urbana operam de forma centralizada ou colaborativa entre seus usuários, nos quais cada provedor de transporte é responsável por deter as informações e os dados relativos aos seus serviços. Muitos usuários recorrem a diversos provedores de transporte para se deslocar a diferentes destinos, uma prática cada vez mais comum, especialmente nos grandes centros urbanos. Nesse contexto, modais como metrô, carro elétrico, patinete e bicicleta são utilizados de forma independente e, frequentemente, combinados em um mesmo trajeto.

Frequentemente, novos provedores e oportunidades de locomoção surgem para otimizar os deslocamentos e oferecer vantagens como maior eficiência energética, redução do tempo de viagem e mais conforto. No entanto, essas alternativas muitas vezes são ignoradas pelos usuários devido à falta de conhecimento ou à ausência de integração entre os serviços, já que as informações não são devidamente comparadas no momento da decisão conforme ilustrado na Figura 1.2.

Além disso, a centralização das informações pode criar um ecossistema fragmentado, o que resulta em serviços ineficazes. Esse cenário favorece a disseminação de informações desatualizadas ou inconsistentes, o que compromete tanto a confiabilidade quanto a precisão dos dados, que são cruciais para a melhoria do sistema de mobilidade. Além desses aspectos, torna-se essencial priorizar o incentivo ao uso do transporte coletivo em detrimento do transporte individual, uma vez que sistemas coletivos bem estruturados reduzem a sobrecarga viária, promovem maior equidade no acesso e contribuem significativamente para a sustentabilidade urbana.

O *Balanço da Mobilidade de 2022* traça um panorama detalhado da mobilidade urbana em Belo Horizonte, que considera um contexto ainda fortemente impactado pelos efeitos da pandemia de COVID-19 (BHTRANS, ObsMob-BH, 2025). O relatório teve como principal objetivo acompanhar a execução do

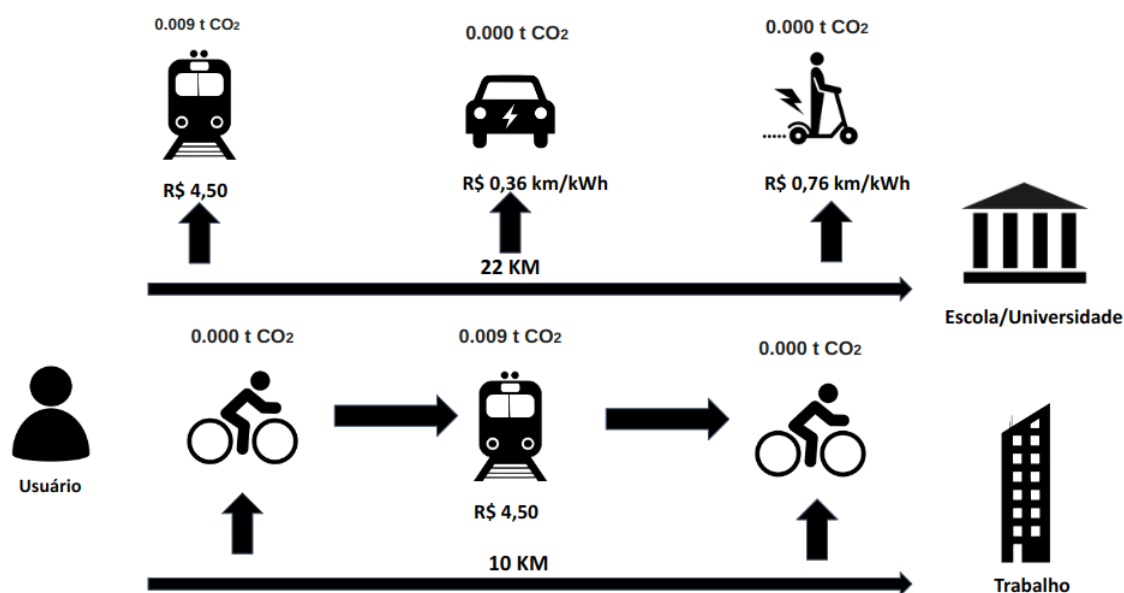


Figura 1.2: Transporte urbano no cotidiano. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

PlanMob-BH, a partir da análise de suas diretrizes e metas estruturantes. Três eixos centrais nortearam essa avaliação:

- **Efetividade das estratégias de mobilidade urbana:** o balanço examinou se as ações implementadas conseguiram, de fato, promover melhorias na fluidez, acessibilidade e sustentabilidade do sistema de transporte.
- **Cumprimento de metas temporais:** foram avaliados os níveis de atingimento das metas estipuladas para três horizontes — curto prazo (2022), médio prazo (2025) e longo prazo (2030), o que permite verificar o ritmo de progresso das iniciativas.
- **Monitoramento de indicadores-chave:** o relatório contemplou 101 indicadores, abrangendo temas como transporte coletivo, mobilidade ativa, segurança viária, aspectos ambientais e acessibilidade. Contudo, 29 desses indicadores não puderam ser apurados por limitações metodológicas ou indisponibilidade de dados.

A pesquisa revela um aumento expressivo do uso de transporte individual motorizado, principalmente automóveis e motocicletas. A participação do automóvel cresceu de 19,6% (1995) para 32,6% (2012). Em contrapartida, a participação do transporte coletivo caiu 37% entre 2002 e 2012 em comparação com pesquisas anteriores. Já as viagens a pé aumentaram, enquanto as de bicicleta reduziram 43% no mesmo período. Essa tendência acende um alerta quanto à sustentabilidade da mobilidade urbana. Em resposta a esse cenário, passaram a ser monitorados diversos indicadores de desempenho operacional, como o Índice de Cumprimento da Programação (**ICP**), o Índice de Conforto da Viagem (**ICV**) e o Índice de Segurança da Viagem (**ISV**), com o objetivo de acompanhar e qualificar os serviços prestados. Apesar desses esforços, os sistemas MOVE Bus Rapid Transit (**BRT**) e o transporte convencional registraram uma redução nas avaliações positivas por parte dos usuários, apontando para a necessidade de investimentos e melhorias que resgatem a atratividade e a confiança da população no transporte coletivo.

A infraestrutura voltada a pedestres e ciclistas em Belo Horizonte também apresentou avanços tímidos, reflexo da dificuldade de consolidação de uma mobilidade ativa de qualidade.

Embora o balanço apresentado reúna um conjunto abrangente de dados relevantes sobre a mobilidade urbana, a metodologia empregada apresenta limitações que comprometem a confiabilidade e a comparabilidade de parte dos indicadores. A pesquisa de opinião não foi realizada em 2020, e os dados de 2019 foram reutilizados para manter a continuidade da série histórica. Em 2022, a coleta dos dados referentes ao ano-base 2021 utilizou métodos alternativos, como entrevistas por telefone e formulários on-line, em substituição à abordagem domiciliar tradicional. Essas mudanças impactaram a estrutura dos questionários e dificultaram a comparação de diversos indicadores, especialmente os relacionados à avaliação dos sistemas MOVE e convencional (BHTRANS, ObsMob-BH, 2025).

Esse crescimento, impulsionado pelo processo de industrialização, impôs desafios significativos à infraestrutura urbana, especialmente aos sistemas de transporte. Até poucas décadas atrás, a maior parte da população brasileira residia em áreas rurais. Atualmente, cerca de 85% dos brasileiros vivem em centros urbanos. Dessas cidades, 36 possuem mais de 500 mil habitantes e 40 regiões metropolitanas concentram aproximadamente 80 milhões de pessoas. Esse processo de urbanização ocorreu de forma acelerada e sem os investimentos necessários em transporte público de massa e infraestrutura urbana, o que resultou em déficits críticos que comprometem a qualidade da mobilidade e a equidade no acesso aos serviços urbanos (Carvalho, 2016).

Nesse cenário, marcado pela urbanização acelerada, expansão desordenada das cidades e por deficiências estruturais, torna-se essencial analisar o desempenho atual dos sistemas de mobilidade urbana nas grandes cidades brasileiras. A análise dos impactos das políticas públicas, aliada à compreensão dos avanços alcançados e dos desafios ainda existentes, fundamenta a formulação de decisões mais eficazes e sustentáveis. Para que esse processo alcance resultados satisfatórios, é fundamental contar com dados confiáveis, atualizados e acessíveis, que sirvam de base para um diagnóstico preciso das condições de mobilidade. A ausência ou a inconsistência dessas informações compromete a formulação de políticas públicas, reduz a eficiência na alocação de recursos e dificulta o controle sobre o cumprimento das metas, o que afeta diretamente a qualidade dos serviços prestados à população.

Diante desses desafios, este trabalho propõe uma abordagem voltada ao aprimoramento da mobilidade urbana, com o objetivo de promover a integração eficiente entre diferentes modais de transporte e assegurar a disponibilidade de informações precisas e atualizadas aos usuários. A utilização de tecnologias descentralizadas e colaborativas permite mitigar os problemas relacionados à centralização dos dados e oferece uma visão unificada das opções de deslocamento. Com isso, os cidadãos passam a tomar decisões mais informadas, otimizam seus trajetos com base em critérios como tempo de deslocamento, custo, conforto, sustentabilidade e preferência modal. Além disso, a adoção de alternativas sustentáveis e a gestão eficiente da infraestrutura de transporte reduzem a dependência do transporte individual e contribuem para a diminuição dos congestionamentos, da emissão de poluentes e de outros impactos negativos associados à mobilidade urbana.

1.3 Pergunta de pesquisa

Como a adoção de um modelo descentralizado baseado *blockchain* pode superar as limitações do modelo centralizado na gestão da mobilidade urbana e impulsionar cidades inteligentes e soluções MaaS.

1.4 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é propor um modelo de mobilidade urbana descentralizada, fundamentado na tecnologia *blockchain* para a construção de sua infraestrutura, cuja viabilidade será validada por meio do desenvolvimento e avaliação de um Mínimos Produtos Viáveis (**MVP**) em ambiente experimental.

1.4.1 Objetivos Específicos

Além dos objetivos centrais que orientam esta pesquisa, o trabalho busca alcançar metas que ampliam sua relevância científica, tecnológica e social. Um dos principais diferenciais está na aplicação de tecnologias descentralizadas a um domínio tradicionalmente estruturado sobre soluções centralizadas, como ocorre na mobilidade urbana. Ao demonstrar o potencial da tecnologia *blockchain* em contextos operacionais, o estudo contribui para a modernização das práticas de gestão urbana, ao promover maior transparência, ampliar a autonomia dos usuários e assegurar maior confiabilidade dos dados.

O trabalho também estimula o debate sobre alternativas ao modelo centralizado vigente, ao propor novas abordagens de planejamento urbano que incorporem a participação dos cidadãos, a descentralização da infraestrutura e o uso racional dos recursos. Ao inserir essas questões no centro da discussão acadêmica, o estudo abre caminho para futuras pesquisas e aplicações voltadas à construção de cidades mais justas, conectadas e resilientes.

1.5 Contribuições

Contribuir para a melhoria da mobilidade urbana por meio da pesquisa e desenvolvimento de soluções inovadoras que incentivem a adoção de modelos descentralizados, com o objetivo de:

- Facilitar a digitalização completa dos sistemas de mobilidade.
- Verificar em que medida é possível aumentar a conectividade entre os diversos meios de transporte disponíveis.
- Investigar se é possível garantir o compartilhamento seguro e confiável de informações
- Oferecer modelos de MaaS, com a integração de diferentes formas de transporte em uma única plataforma, a fim de melhorar a experiência dos usuários e otimizar recursos urbanos.

Além das contribuições práticas, este trabalho busca gerar impacto acadêmico ao ampliar o conhecimento sobre a aplicação da tecnologia *blockchain* na mobilidade urbana. Espera-se que os resultados obtidos sirvam como base para futuras pesquisas e estimulem novas abordagens teóricas e metodológicas sobre descentralização, infraestrutura digital e inovação em transporte.

Capítulo 2

Fundamentos conceituais

Este capítulo tem como finalidade estabelecer a base teórica que sustenta a proposta deste trabalho, ao apresentar os conceitos essenciais que orientam sua estrutura e desenvolvimento. As transformações recentes nos contextos urbanos e de mobilidade são analisadas, com ênfase na importância de modelos mais integrados, sustentáveis e centrados no cidadão. A partir dessa perspectiva, o texto esclarece os princípios que orientam novas abordagens para a organização dos serviços de transporte e para a gestão de dados e interações entre os diversos participantes do sistema. Ao reunir e articular esses fundamentos, o capítulo oferece o suporte conceitual necessário para compreender as motivações, os desafios e as contribuições do trabalho proposto.

2.1 Smart Cities

A rápida urbanização global tem provocado profundas transformações econômicas, sociais e ambientais nas cidades, o que torna urgente a adoção de estratégias voltadas à melhoria da gestão urbana e da qualidade de vida da população. Nesse cenário, o conceito de *smart cities* surge como resposta às novas exigências urbanas, ao integrar tecnologias de informação e comunicação (TIC) à infraestrutura e aos serviços urbanos (Yin et al., 2015).

Entre 1950 e 2014, a parcela da população mundial residente em áreas urbanas aumentou de 30% para 54%, com projeções que indicam a possibilidade de atingir 66% até 2050. Esse crescimento tem ocorrido de forma ainda mais acentuada em países em desenvolvimento, como China e diversas nações africanas. Embora a urbanização proporcione benefícios significativos, como melhoria da infraestrutura, ampliação do acesso à saúde e à educação e incremento na geração de empregos, também impõe desafios estruturais. Entre os principais estão a poluição, a degradação ambiental, os congestionamentos, a criminalidade e os *deficits* na infraestrutura urbana.

Ainda não há uma definição única e universalmente aceita para o termo *smart city*, uma vez que diferentes pesquisadores e atores institucionais interpretam o conceito sob diversas perspectivas. Os autores propõem uma taxonomia conceitual composta por quatro dimensões principais: infraestrutura técnica, domínios de aplicação, integração de sistemas e processamento de dados (Yin et al., 2015).

A infraestrutura técnica compreende o uso de sensores, redes, dispositivos móveis, computação em nuvem e IoT para coleta e transmissão de dados urbanos. Os domínios de aplicação englobam áreas como governança eletrônica, mobilidade, meio ambiente, educação, saúde e economia. A integração de sistemas refere-se à capacidade de interligar diferentes subsistemas urbanos de maneira coerente e funcional. O processamento de dados, por sua vez, inclui etapas como coleta, armazenamento, análise, visualização e transformação dos dados em informações úteis para a tomada de decisão.

Com base nessa fundamentação, define-se uma cidade inteligente como a integração sistêmica de infraestruturas tecnológicas, sustentada por processamento avançado de dados, com o objetivo de tornar a governança mais eficiente, os cidadãos mais satisfeitos, os negócios mais prósperos e o ambiente urbano

mais sustentável.

No entanto, a efetiva implementação de cidades inteligentes enfrenta diversos desafios estruturais. Entre eles, destacam-se o equilíbrio entre a acurácia dos modelos analíticos e os custos computacionais, a necessidade de reduzir o acoplamento entre dados irrelevantes e a importância de estabelecer correlações significativas entre dados oriundos de diferentes domínios urbanos. Além disso, há também uma abordagem multidisciplinar, capaz de integrar conhecimentos das áreas de ciência da computação, engenharia, transporte, sociologia, meio ambiente e políticas públicas (Yin et al., 2015).

Corroborando esses desafios, a disseminação e a compreensão do conceito de smart city no Brasil ainda permanecem restritas. Esse cenário aparece ilustrado na Figura 2.1, que evidencia a adoção incipiente desse paradigma no contexto nacional (Cunha et al., 2016).

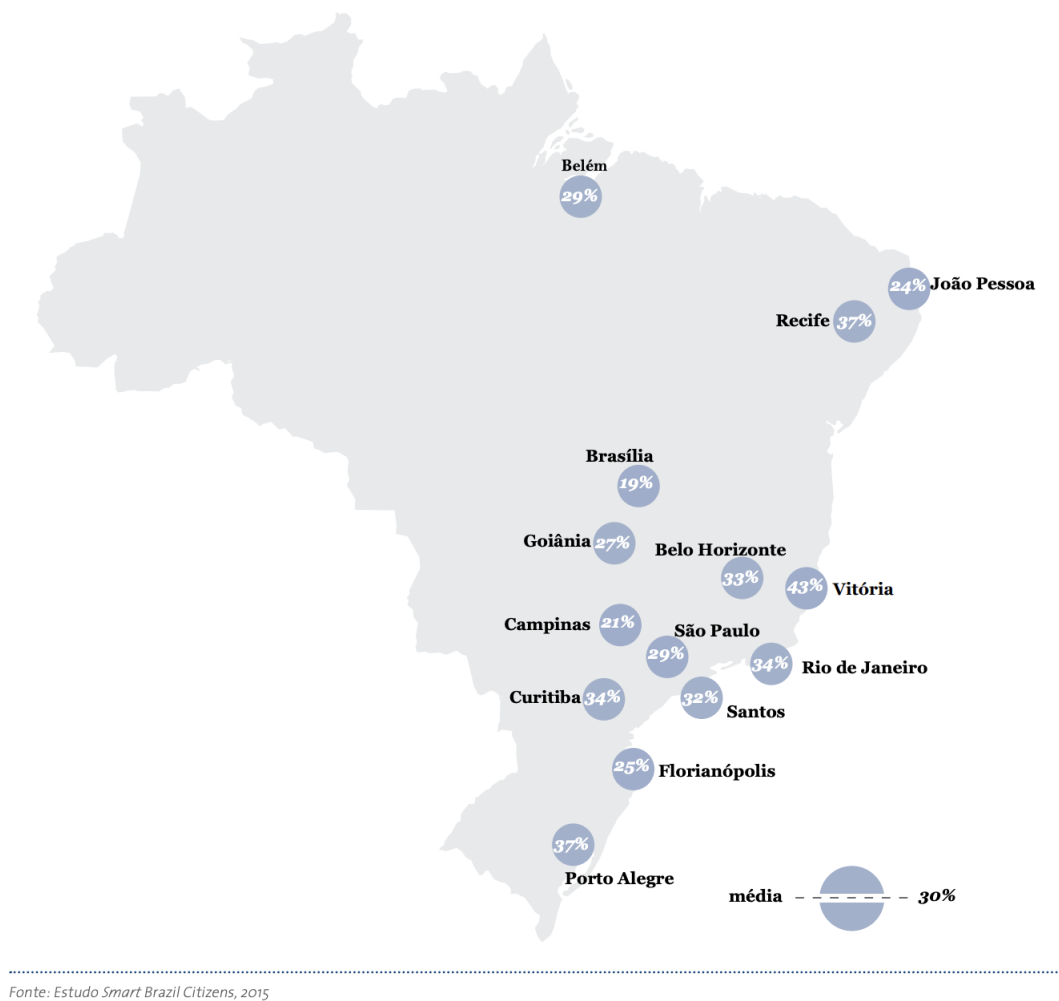


Figura 2.1: Conhecimento do termo smart city pelos cidadãos. Fonte: (Cunha et al., 2016)

Apenas 30% da população demonstra familiaridade com o termo, com uma concentração maior entre os homens (38%) e menor entre as mulheres (23%). Outro dado relevante indica que, entre os 30% de brasileiros que conhecem o termo, apenas 39% compreendem seu significado.

Ao serem questionados sobre o conceito, as respostas se distribuem em três eixos principais: tecnologia (28%), eficiência e inovação (17%) e atenção ao cidadão (14%). Esses dados revelam que a população associa a ideia de cidade inteligente à expectativa de melhorias na qualidade de vida e nos serviços públicos, atribuindo à administração pública um papel essencial na concretização dessas transformações (Cunha et al., 2016).

Isso reforça a necessidade de estabelecer políticas públicas claras e participativas, que assegurem o consentimento informado dos cidadãos quanto ao uso de seus dados, promovam a transparência nas decisões tecnológicas e fortaleçam a confiança nas soluções adotadas pelas *smart cities*.

Esse cenário reforça a necessidade de formular políticas públicas claras, inclusivas e orientadas pela participação cidadã. Tais políticas devem garantir o consentimento informado da população quanto à coleta e ao uso de dados pessoais, promover a transparência nas decisões tecnológicas e fortalecer a confiança nas soluções adotadas no âmbito das *smart cities*. Torna-se, ainda, essencial explicar e disseminar amplamente o conceito de cidades inteligentes, de forma acessível e contextualizada, para que a população compreenda seu papel nesse novo modelo urbano e se engaje ativamente em sua construção.

Diante desse panorama, adota-se uma abordagem descentralizada para avaliar as contribuições potenciais dessa estratégia no fortalecimento das *smart cities*. Busca-se investigar de que forma a descentralização, aliada à interoperabilidade e à gestão inteligente de dados, pode favorecer a transparência, a confiabilidade e a resiliência das infraestruturas urbanas.

2.1.1 Mobility as a Service (MaaS)

O conceito de MaaS constitui uma inovação central no contexto das *smart cities*, ao propor a integração de diversos modos de transporte públicos e privados, individuais e coletivos, dentro de uma mesma área geográfica. Esse modelo visa oferecer itinerários personalizados e eficientes, ajustados às necessidades e preferências dos usuários, com a finalidade de proporcionar uma experiência de mobilidade mais coesa e integrada (Confederação Nacional do Transporte (2022)).

A Figura 2.2 apresenta, de forma esquemática, quatro cenários hipotéticos de deslocamento entre residência e local de trabalho. Três deles utilizam a lógica de integração promovida pelo conceito de MaaS, enquanto o quarto representa um deslocamento tradicional, sem integração entre os modais.

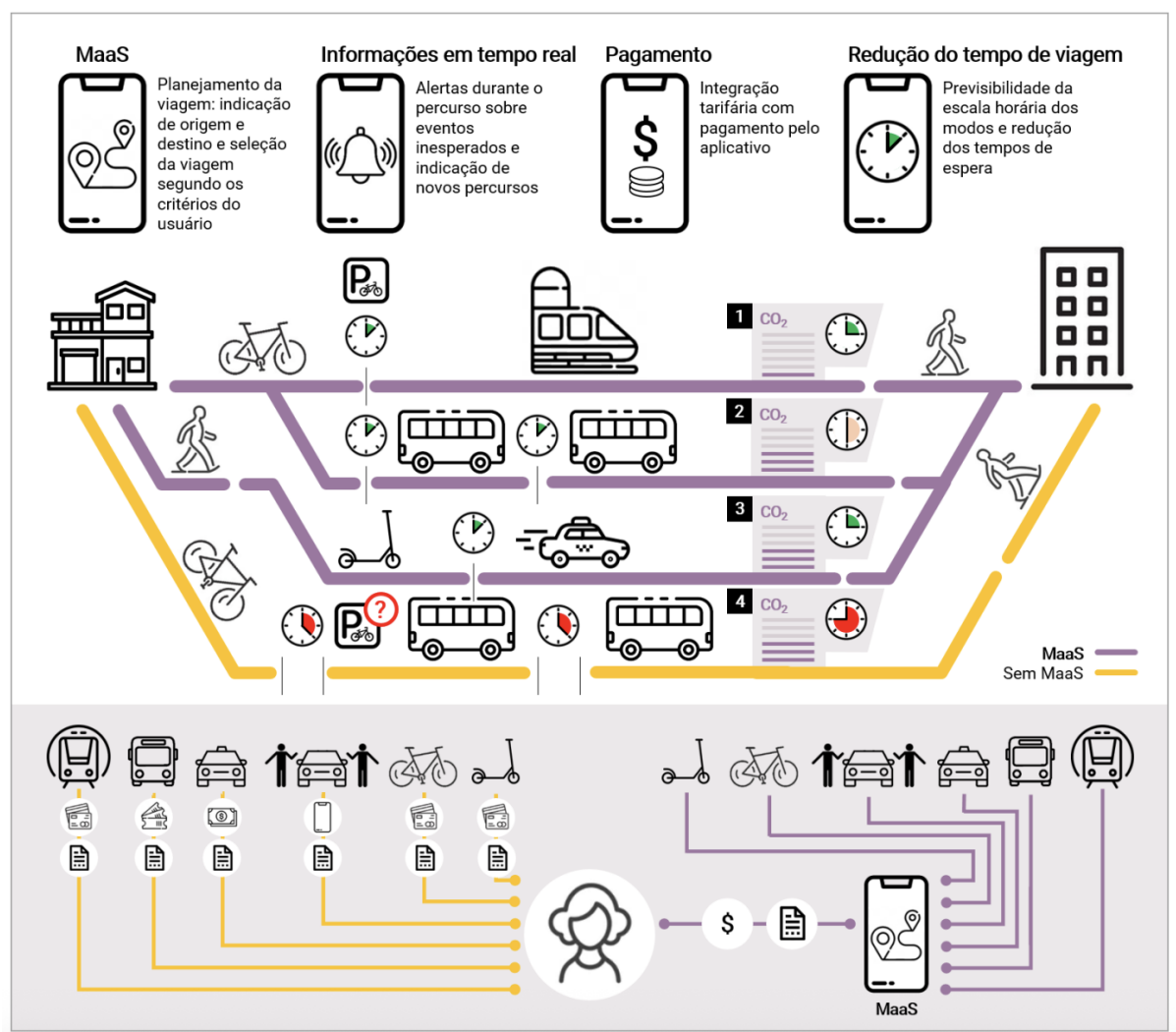


Figura 2.2: Cenários comparativos de deslocamento com e sem MaaS. Fonte: **Confederação Nacional do Transporte (2022)**

Cada cenário considera o tempo de viagem e as emissões de CO₂, conforme os modais utilizados. No primeiro e no quarto cenários, o uso de bicicleta está condicionado à existência de local para estacionamento, com e sem conhecimento prévio da disponibilidade de vagas, respectivamente. Observa-se que o acesso antecipado a essas informações facilita a adoção de meios ativos e reduz o tempo necessário para a transição entre os modais.

O cenário 1 mostra o menor índice de emissões de gases de efeito estufa, devido à ausência de veículos movidos por combustíveis fósseis. Por outro lado, o cenário 4 apresenta o maior tempo total de deslocamento, o que evidencia a ineficiência provocada pela falta de integração modal.

A parte inferior da Figura 2.2 ilustra as formas de pagamento e acesso a informações. Na ausência do MaaS, o usuário precisa lidar com múltiplos canais de informação e pagamento, o que compromete a fluidez da experiência. Com o MaaS, o usuário conta com um sistema unificado, acessado via aplicativo, que reúne informações em tempo real, planejamento de rotas, integração tarifária e previsibilidade dos horários, conforme descrito por (CNT).

O modelo de MaaS é descrito como um sistema agregador de serviços de mobilidade que atua em colaboração com autoridades públicas e operadores privados como empresas de táxi e serviços de carona, com o objetivo de otimizar a eficiência dos deslocamentos urbanos. Uma das vantagens apontadas é a

possibilidade de os usuários manterem um orçamento mensal fixo para suas viagens, o que contribui para um planejamento financeiro mais eficaz. Contudo, os autores destacam que muitas implementações do MaaS utilizam plataformas de software proprietárias e impõem restrições na escolha dos provedores de serviço, o que pode comprometer a diversidade da oferta e a flexibilidade do sistema (Alyavina et al., 2020).

Os fatores que influenciam a aceitação e o uso sustentável do modelo MaaS, com foco nas percepções dos usuários, nas barreiras enfrentadas e nos incentivos à substituição do automóvel particular (Alyavina et al., 2020). A pesquisa utilizou uma abordagem qualitativa, com entrevistas semiestruturadas aplicadas a 40 participantes residentes nas cidades de Londres, Birmingham e Huddersfield, no Reino Unido. A escolha dessas localidades permitiu analisar distintos contextos urbanos e níveis de congestionamento. Utilizou-se uma amostragem não probabilística, com técnicas de auto-seleção e snowball sampling, na qual a investigação se inicia com um grupo de participantes que atendem aos critérios definidos e, a partir deles, novos indivíduos com características semelhantes são indicados. Esse processo forma uma cadeia sucessiva de recrutamento, eficaz para alcançar públicos específicos ou de difícil acesso. Os critérios de inclusão exigiram residência em uma das cidades-alvo, prática regular de deslocamento e diversidade sociodemográfica.

As entrevistas seguiram um roteiro estruturado em seis seções: introdução, dados demográficos, práticas de deslocamento, apresentação do MaaS, percepções sobre a proposta e encerramento. Todas as entrevistas foram gravadas e transcritas integralmente pelos autores. A análise dos dados adotou o método de análise temática, com codificação manual realizada de forma independente por três pesquisadores. A triangulação entre os autores assegurou alta confiabilidade, com 90% de concordância, e permitiu organizar os dados em cinco grandes temas: dependência do automóvel, confiança, externalidades humanas, valor percebido e custo.

Os resultados revelaram que, apesar da receptividade teórica ao conceito de MaaS, a adoção prática mostrou-se limitada. A dependência emocional e funcional do carro particular surgiu como a principal barreira, sustentada por fatores como conveniência, controle, conforto, status social e sensação de liberdade (Alyavina et al., 2020). Muitos entrevistados enxergam o carro como uma extensão da própria identidade e relutam em substituí-lo, mesmo com alternativas integradas.

Questões relacionadas à confiança também surgiram como fatores limitantes. Os participantes relataram receios quanto à precisão das informações fornecidas pelo MaaS, à segurança digital e à confiabilidade das redes de transporte integradas (Alyavina et al., 2020). Além disso, manifestaram preocupações quanto à exclusão digital de usuários idosos ou com baixa familiaridade tecnológica. As externalidades negativas associadas ao comportamento humano em meios de transporte coletivos, como incivilidade, insegurança e negligência, reforçaram o desejo por privacidade e autonomia associadas ao automóvel particular (Alyavina et al., 2020).

Apesar dessas barreiras, o MaaS foi reconhecido como útil para viagens ocasionais, lazer e turismo, ser valorizado pela praticidade, integração modal e capacidade de facilitar o planejamento das rotas. Entretanto, os entrevistados destacaram que o valor percebido do MaaS depende diretamente da qualidade da infraestrutura de transporte público, a qual ainda se mostra insuficiente para atender às demandas de mobilidade. O custo também se apresentou como um fator crítico. A maioria dos entrevistados demonstrou resistência em pagar por um serviço que ainda consideram inferior ao uso do carro. Muitos preferem planejar seus deslocamentos por conta própria, utilizando ferramentas já disponíveis gratuitamente. Por outro lado, alguns participantes indicaram que incentivos financeiros, como descontos, bônus por uso sustentável e subsídios públicos, poderiam favorecer a adesão ao MaaS (Alyavina et al., 2020).

O modelo de MaaS representa uma alternativa promissora para enfrentar os desafios contemporâneos da mobilidade urbana. Ao promover a integração operacional, informacional e transacional

entre diferentes modais de transporte, o MaaS contribui para a criação de sistemas mais eficientes, acessíveis e sustentáveis. Seus benefícios vão além da otimização dos deslocamentos, pois favorecem a redução das emissões de poluentes, ampliam o acesso à mobilidade para populações vulneráveis e estimulam o uso do transporte público em lugar do automóvel particular. Torna-se necessário adotar políticas públicas, campanhas educativas e incentivos econômicos. Além disso, é recomendável implementar pilotos que familiarizem a população com o sistema e permitam corrigir percepções negativas. Contudo, sua aplicação exige a superação de barreiras estruturais, tecnológicas e culturais, como a fragmentação entre operadores e a dependência histórica do transporte individual. Diante das tendências globais que valorizam a qualidade de vida e a sustentabilidade ambiental, o avanço do MaaS surge como um caminho necessário e urgente para transformar as dinâmicas urbanas e redefinir o futuro da mobilidade.

Portanto, o trabalho proposto deve priorizar o desenvolvimento de opções de viagem multimodal que incentivem o uso responsável, por meio de benefícios como bônus e isenções fiscais voltadas à promoção da mudança de comportamento. É essencial fortalecer o transporte público integrado e acessível, além de limitar o uso de veículos individuais, por meios de incentivos monetários e a criação de zonas livres de carros. Esse equilíbrio é fundamental para promover um futuro urbano mais sustentável e inclusivo.

2.2 Blockchain

Em 1992, surgiu a proposta de um banco de dados público imutável baseado em uma cadeia de blocos criptografada, embora ainda limitada pela tecnologia disponível na época. Somente em 2008 ocorreu a primeira aplicação concreta desse conceito, com a criação do Bitcoin. A *blockchain*, concebida como uma espécie de livro-razão digital, distribui a criptomoeda entre usuários e colaboradores, o que proporciona maior transparência e segurança nas operações (Cao, 2022).

Para evitar conflitos entre transações — como a tentativa de um usuário transferir os mesmos fundos para vários destinatários simultaneamente — o sistema registra uma sequência consistente de blocos de transações por meio de um esquema de prova de trabalho. Esse processo é realizado por participantes conhecidos como mineradores. Cada usuário verifica todos os blocos de transações e, entre várias sequências válidas, considera autoritária aquela que apresenta a maior quantidade de prova de trabalho (O'Connor, 2017).

Nas redes transacionais, conforme mostrado na Figura 2.3, os membros negociam entre si. Seus dados permanecem centralizados e sob a gestão de uma autoridade central ou de entidades detentoras dessas informações. Cada participante mantém registros separados das transações, o que pode gerar inconsistências e exigir intermediários para validar e reconciliar os dados.

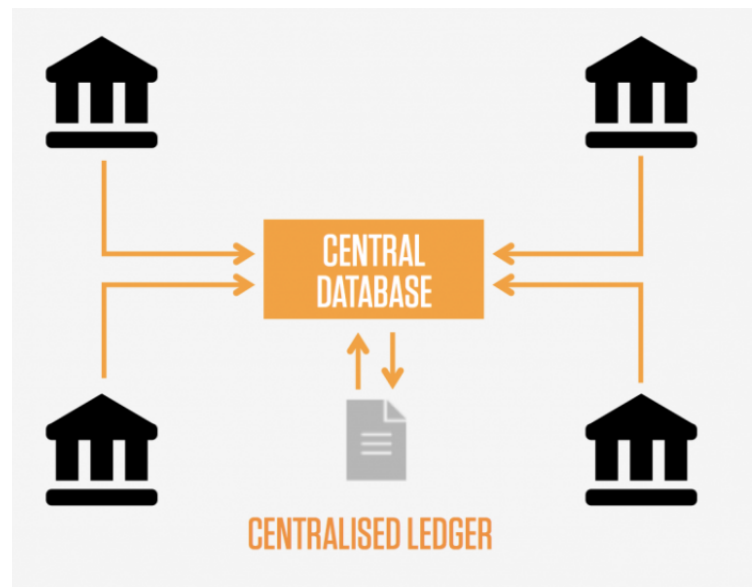


Figura 2.3: Database Tradicional. Fonte: (CoinSpectator, 2025)

Em contraste, a *blockchain* representa uma mudança fundamental ao eliminar a necessidade de uma entidade centralizadora. Essa tecnologia estabelece uma rede descentralizada, na qual todos os participantes possuem uma cópia única, imutável e sincronizada dos registros de transações, conforme ilustrado na Figura 2.4. As redes, em sua maioria públicas e de código aberto, oferecem acesso irrestrito, e permite que qualquer pessoa se conecte e participe. A segurança e a integridade das transações ficam garantidas por algoritmos de consenso, que validam e adicionam novos blocos à cadeia, e isso assegura a consistência e a imutabilidade dos registros.

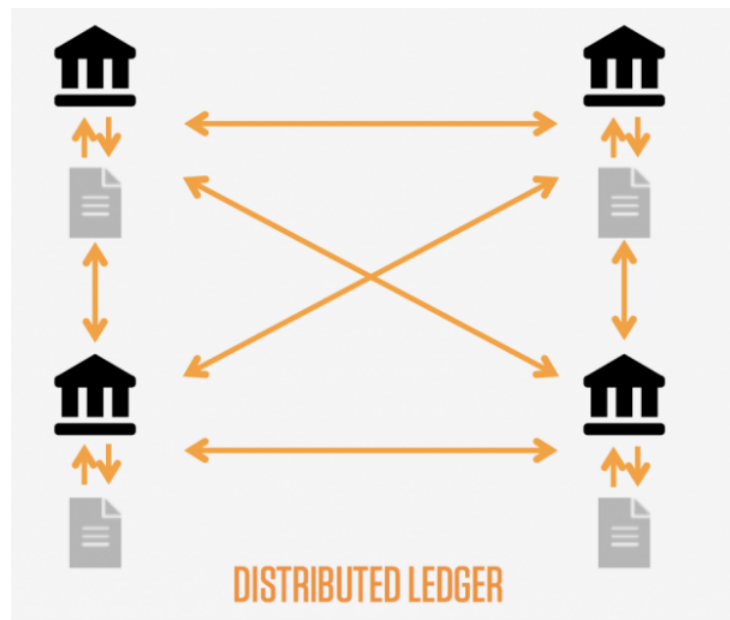


Figura 2.4: Blockchain Database. Fonte: (CoinSpectator, 2025)

O *Bitcoin* foi o primeiro protocolo a empregar a tecnologia *blockchain* na criação de uma criptomoeda segura e descentralizada, sem necessidade de permissões. Esse sistema incorpora uma linguagem de programação embutida chamada *Bitcoin Script*, baseada em pilha e inspirada na linguagem *Forth*,

desenvolvida na década de 1970. A linguagem *Forth* é amplamente reconhecida por sua simplicidade e eficiência, características que a tornaram comum em sistemas com recursos limitados, especialmente em aplicações que demandam controle direto do hardware e alto desempenho.

De forma análoga, o *Bitcoin Script* manipula uma pilha de dados, sobre a qual as operações ocorrem de maneira linear. Essa estrutura elimina a necessidade de variáveis intermediárias complexas. As instruções são processadas na ordem de entrada, e os resultados temporários permanecem diretamente na pilha. Todas as operações implementadas no *Bitcoin Script* funcionam como funções puras, determinadas exclusivamente pelo estado da máquina. A verificação de assinaturas, por exemplo, depende da geração de um hash a partir de dados da transação, o que torna o resultado do programa determinístico.

Uma das funções hash fundamentais no *Bitcoin* é a SHA-256, que transforma qualquer entrada em um valor de 256 bits (ou 64 caracteres em hexadecimal). Esse processo é irreversível, garantindo que os dados originais não possam ser reconstruídos, mesmo quando os valores hash são amplamente divulgados (O'Connor, 2017).

Com a *blockchain*, cada transação ou evento vinculado às jornadas pode ser armazenado de forma imutável e segura, o que assegura a integridade e a confiabilidade das informações. Essa abordagem é especialmente útil para o monitoramento e a gestão do desempenho de sistemas de transporte, pois permite a identificação de falhas e a realização de melhorias no uso dos recursos.

2.2.1 Plataformas Blockchain

Diversas plataformas de *blockchain* se destacam no cenário atual e constituem uma base sólida para o desenvolvimento de aplicações descentralizadas e soluções empresariais. Cada uma dessas plataformas apresenta características únicas, que as tornam adequadas para diferentes casos de uso. Ao escolher uma plataforma para desenvolvimento, é crucial considerar fatores como a taxa de transações (denominada *gas fee*), o nível de segurança da rede, a reputação e o suporte da comunidade, além da compatibilidade da plataforma com os objetivos específicos do projeto.

O *Ethereum* permite a comunicação entre diferentes *blockchains*, o que amplia a interoperabilidade de dados e valores. Sua arquitetura *peer-to-peer* possibilita que os dispositivos conectados atuem simultaneamente como clientes e servidores. O uso de criptografia assimétrica e funções de *hash* garante a segurança das transações. Os usuários que desejam enviar transações precisam pagar uma pequena taxa, conhecida como *gas*, o que contribui para a sustentabilidade da rede. Além disso, o *Ethereum* destaca-se como a principal plataforma para o desenvolvimento de contratos inteligentes e aplicações descentralizadas (**dApps**), é amplamente utilizada em iniciativas relacionadas a finanças descentralizadas, *tokens* não fungíveis e organizações autônomas descentralizadas (Dannen, 2017).

O *gas* é calculado com base no esforço computacional necessário para processar as operações e é expresso em *ether* ou *wei*, no caso da *Ethereum*. O custo varia conforme a complexidade das transações e a demanda da rede. Em períodos de alta atividade ou quando o preço do *ether* está elevado, o custo do *gas fee* também se eleva. A otimização do *gas* busca equilibrar o custo da transação e o tempo de espera, por meio da eliminação de código desnecessário e da escolha de tipos de dados que reduzem o consumo de *gas* (Dannen, 2017).

A escalabilidade tornou-se um fator crítico na escolha de plataformas *blockchain*, especialmente diante das limitações no número de transações por segundo (**TPS**) observadas em soluções de primeira camada *Layer 1*, como a *Bitcoin* e a *Ethereum*. Com o aumento da demanda por desempenho e eficiência,

surgiram os protocolos de segunda camada *Layer 2*, que introduzem abordagens inovadoras para ampliar a capacidade de processamento, reduzir custos operacionais e preservar a segurança garantida pela cadeia principal.

A arquitetura dos sistemas *blockchain* pode ser representada em uma estrutura hierárquica de múltiplas camadas, conforme ilustrado na Figura 2.5. A *Layer -1* refere-se à camada física, composta pelo *hardware* responsável por sustentar toda a infraestrutura técnica. Em seguida, a *Layer 0* engloba a rede *peer-to-peer*, que permite a comunicação entre os nós da rede de maneira distribuída (Gangwal et al., 2023).

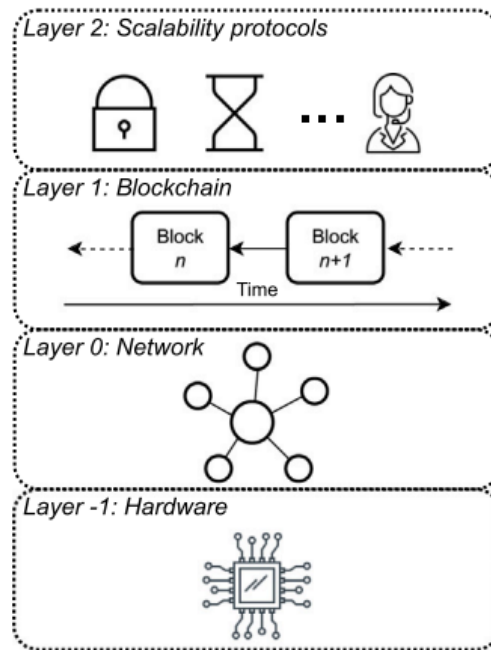


Figura 2.5: Arquitetura em camadas dos sistemas *blockchain*, da infraestrutura física aos protocolos de escalabilidade. Fonte: (Gangwal et al., 2023).

A *Layer 1* corresponde ao núcleo do protocolo da *blockchain*, nessa camada, estão definidos o mecanismo de consenso, a estrutura dos blocos e as regras de validação das transações. Ela é responsável pela execução direta das transações e dos contratos inteligentes. Sua arquitetura apresenta restrições consideráveis em termos de desempenho e escalabilidade, especialmente em ambientes de alta demanda (Gangwal et al., 2023).

Para superar essas limitações sem comprometer a descentralização e a segurança, foram desenvolvidas as soluções de segunda camada *Layer 2*. Essa camada se apoia sobre a cadeia principal e permite processar transações fora dela (*off-chain*), com o registro apenas dos resultados finais ou as informações essenciais na *Layer 1*. Essa estratégia contribui para aliviar a carga da rede principal, aumentar a taxa de processamento de transações e reduzir os custos operacionais (Gangwal et al., 2023).

Complementarmente, algumas abordagens introduzem uma terceira camada, a *Layer 3*, voltada às aplicações específicas e interfaces de usuário, como as dApps. Outra frente relevante envolve os mecanismos de interoperabilidade entre diferentes blockchains, conhecidos como *cross chains*, os quais viabilizam a transferência segura de ativos e dados entre redes distintas. Essa arquitetura modular baseada em camadas proporciona maior escalabilidade, flexibilidade e eficiência para o desenvolvimento de soluções baseadas em *blockchain* (Gangwal et al., 2023).

A plataforma escolhida para o desenvolvimento do trabalho foi o *Ethereum*, por fornecer uma rede com suporte nativo a contas e à sua própria moeda, o *ether*, além de permitir a implementação de *smart contracts* que executam instruções automaticamente com base em condições previamente estabelecidas. Ao contrário do *Bitcoin*, que se limita a transações simples, o *Ethereum* possibilita a criação de aplicações descentralizadas complexas, o que favorece a automação de processos e a formulação de novos modelos de negócios. Sua expressividade computacional, aliada à ampla adoção e ao suporte contínuo da comunidade de desenvolvedores, justifica sua escolha como base tecnológica desta pesquisa. Adicionalmente, sua compatibilidade com soluções de segunda camada *Layer 2* oferece maior escalabilidade e eficiência, características essenciais para o alcance dos objetivos propostos.

2.2.2 Algoritmos de consenso

Os algoritmos de consenso são essenciais para garantir a sincronização das transações em uma *blockchain*, responsáveis por assegurar que os registros sejam atualizados apenas com a aprovação dos participantes autorizados. Esses participantes, conhecidos como mineradores ou validadores, são nós da rede com permissão para validar e confirmar novas transações por meio desses algoritmos antes da incorporação à *blockchain*. Esse processo de validação garante que as transações sejam registradas na ordem correta e de forma imutável, preservando a integridade do sistema (Zheng et al., 2017).

O bloco da cadeia, conforme ilustrado na Figura 2.8 armazena um registro de várias transações e inclui uma assinatura criptográfica única que valida a integridade e autenticidade dos dados. Após a adição à cadeia, o bloco não pode ser alterado ou excluído. Além disso, cada bloco possui um identificador único e contém uma seção destinada ao identificador do bloco anterior e outra reservada aos dados das transações.

A estrutura de um bloco em uma *blockchain*, representada na Figura 2.9, é composta por diversos componentes. Cada elemento exerce um papel essencial na preservação da integridade e da segurança da cadeia, conforme demonstrado a seguir:

- **Header (Cabeçalho):**

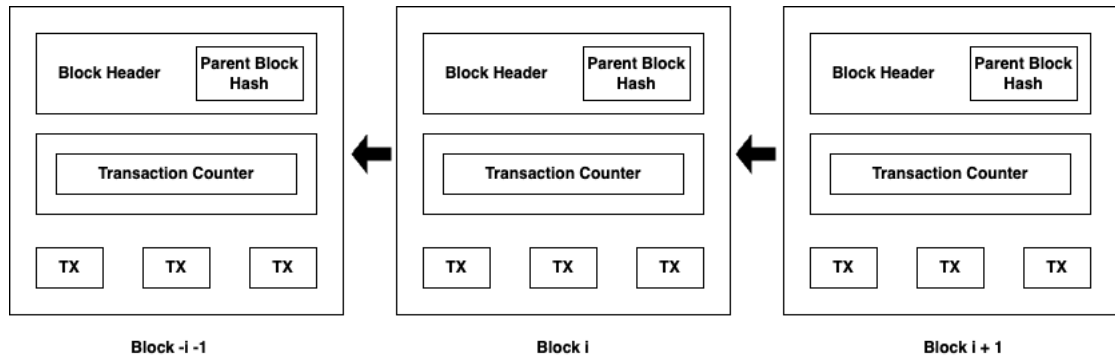


Figura 2.6: Um exemplo de *blockchain* é uma cadeia contínua de blocos interligados. Fonte: (Zheng et al., 2017).

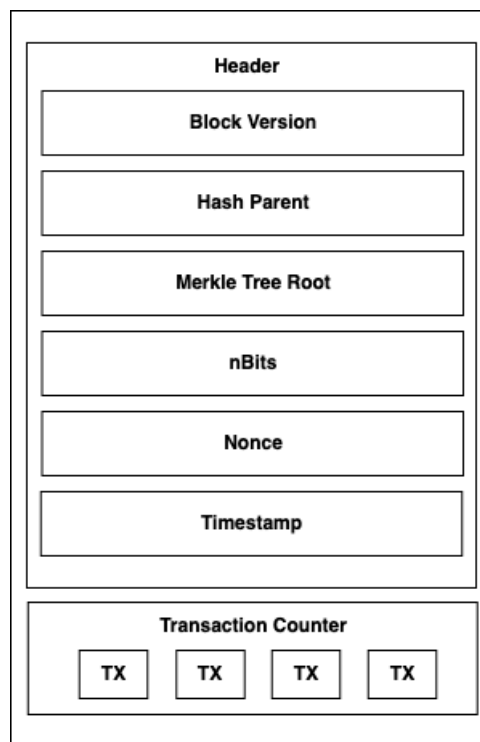


Figura 2.7: Representação esquemática da estrutura de um bloco em uma *blockchain*. Fonte: (Zheng et al., 2017).

- **Block Version:** Indica o protocolo ou a versão do software utilizado na criação ou validação, o que é essencial para assegurar a compatibilidade com os demais da cadeia.
- **Hash Parent:** Um valor hash que aponta para o bloco imediatamente anterior na cadeia. Isso cria uma ligação entre blocos, formando a estrutura encadeada da blockchain.
- **Merkle Tree Root:** Um valor hash que resume todas as transações no bloco.
- **Timestamp:** A data e a hora em que o bloco foi minerado ou adicionado à blockchain.
- **nBits:** Define o *target* ou alvo que o hash de um bloco deve atingir para que seja considerado válido.
- **Nonce:** Um número inteiro único que se utiliza durante o processo de mineração. Ele é continuamente ajustado pelos mineradores até que se encontre um valor que, quando com-

binado com o restante dos dados do bloco, gere um hash que atenda ao nível de dificuldade estabelecido pela rede.

- **Corpo do Bloco (Block Body):**

- **Transações (Transactions):** O conjunto de transações incluídas no bloco, cada transação contém detalhes como os remetentes, destinatários e valores transferidos.

Entre os algoritmos de consenso mais amplamente utilizados, destacam-se:

- **Proof-of-Work (PoW):** Utilizado pelo Bitcoin e outras criptomoedas, este algoritmo depende da resolução de desafios matemáticos complexos para validar as transações e adicionar novos blocos à cadeia de blocos. O processo envolve que mineradores compitam para resolver um problema criptográfico complexo e o primeiro a resolver o problema é recompensado com a criação de um novo bloco. Essa abordagem garante a segurança e a integridade da rede, mas uma das principais críticas ao PoW é o seu elevado consumo de energia e poder de computação. À medida que a dificuldade dos problemas criptográficos aumenta para manter a segurança da rede, o consumo de recursos também cresce exponencialmente. Esse impacto ambiental tem gerado debates sobre a sustentabilidade e a eficiência do PoW em comparação com outros algoritmos de consenso, como o Proof-of-Stake (PoS) Nakamoto (2008).
- **Proof-of-Stake (PoS):** Utilizado em criptomoedas que não depende da resolução de desafios matemáticos complexos como no PoW, mas sim da "apostação" (*staking*) de moedas para validar as transações e adicionar novos blocos à cadeia de blocos. O PoS é considerado um algoritmo de consenso mais eficiente e ecologicamente correto em comparação ao PoW, uma vez que não requer uma grande quantidade de poder computacional para resolver desafios matemáticos complexos Nair, Dorai (2021).
- **Delegated Proof-of-Stake (DPoS):** Utilizado por criptomoedas como *EOS* e *Lisk*, este algoritmo utiliza a votação dos detentores de tokens para escolher os validadores que irão validar as transações e adicionar novos blocos à cadeia de blocos. O DPoS é uma extensão do PoS que aprimora a segurança do mecanismo original. No DPoS, mineradores delegados são responsáveis pela mineração dos blocos e alguns deles precisam assinar os blocos criados para torná-los válidos. Esse processo contribui significativamente para resolver as vulnerabilidades associadas ao PoS, como a centralização e a falta de segurança na validação de blocos. O sistema de votação permite que os participantes da rede escolham os validadores de forma mais eficiente, garantindo que o processo de validação seja conduzido por entidades confiáveis e comprometidas com a integridade da rede Nair, Dorai (2021).
- **Proof-of-Authority (PoA):** É um mecanismo projetado para otimizar o PoS e geralmente utilizado em redes permissionadas. Em vez de selecionar os mineradores de blocos com base na posse de tokens de criptomoeda, o PoA escolhe um pequeno grupo de autoridades como validadores de transações, considerando suas identidades ou reputações na rede. Para atuar como validador, o usuário deve passar por um processo formal de notificação, no qual apresenta documentação que comprove sua identidade real e permita vinculá-la à identidade registrada na cadeia, estabelecendo assim sua reputação digital. Os validadores existentes podem votar pela inclusão de novos usuários no grupo de autoridades. Um sistema baseado em PoA também recompensa as autoridades pela certificação e ordenação das transações, o que estimula comportamentos honestos e garante a moderação da rede (Zhang, Dubey, 2019).
- **Proof-of-Elapsed Time (PoET):** Proposto para redes que utilizam a tecnologia *Intel Software Guard Extensions (SGX)*, o algoritmo PoET baseia-se no tempo decorrido para selecionar o validador

responsável por adicionar um novo bloco. Ele distribui tempos de espera aleatórios entre os nós, que só podem criar blocos após esse intervalo, enquanto a plataforma SGX gera provas desses tempos de espera, verificadas posteriormente por outros nós. O PoET oferece duas principais vantagens: eficiência, por não exigir cálculos computacionais intensivos, e imparcialidade, ao adotar o princípio de "um CPU, um voto". Este princípio visa garantir que todos os participantes da rede tenham a mesma oportunidade de criar novos blocos, independentemente de seu poder computacional, para promover uma participação mais justa no processo de validação. No entanto, a computação confiável, como o SGX, não é totalmente à prova de falhas. Uma estrutura teórica foi desenvolvida para avaliar a segurança do PoET, revelando vulnerabilidades que surgem quando uma pequena fração dos nós é comprometida. Especificamente, ao comprometer uma fração $\Theta\left(\frac{\log \log n}{\log n}\right)$ dos nós, um adversário pode simular o nó mais rápido, dificultando a detecção de ataques por meio de testes estatísticos. Essa fração é consideravelmente menor que o limite de 50% presente em sistemas baseados em PoW, como o *Bitcoin* conforme demonstrado no trabalho de (Chen et al., 2017).

- **Proof-of-Burn (PoB):** É um mecanismo de consenso na tecnologia blockchain que permite aos participantes eliminarem irreversivelmente uma quantidade específica de criptomoeda para obter o direito de validar transações e criar novos blocos. Esse método surge como uma alternativa aos algoritmos de consenso intensivos em energia, como o PoW. Particularmente útil para o lançamento de novas criptomoedas, o PoB permite gerar uma prova de destruição verificável, que pode ser enviada para a nova *blockchain* em troca de recompensas. O PoB foi implementado de várias formas, incluindo como um contrato inteligente em plataformas como o *Ethereum*. Apesar de ser um algoritmo de consenso menos conhecido e não ter alcançado a mesma adoção que o PoW e o PoS, o PoB foi utilizado em alguns projetos, como o *Slimcoin*, lançado em 2014. O *Slimcoin* visa oferecer uma alternativa aos sistemas tradicionais de mineração baseados em (PoW), conhecidos por seu alto consumo de energia e complexidade (Karantias et al., 2020).
- **Proof-of-Importance (PoI):** é um algoritmo de consenso utilizado na *blockchain NEM*, uma plataforma lançada em 2015 com o objetivo de redefinir o funcionamento dos sistemas financeiros. O PoI é empregado para determinar quais nós são elegíveis para adicionar blocos à rede, um processo conhecido como "harvesting". Esse mecanismo se destaca por sua abordagem única, que considera não apenas a quantidade de criptomoedas que um usuário possui, mas também sua contribuição geral para a segurança e integridade da rede. Ao avaliar a contribuição total de um usuário para a rede, o PoI promove um ambiente mais inclusivo e equitativo, reconhece e recompensa a importância de cada participante. Essa abordagem não só melhora a segurança da rede, como também incentiva um maior envolvimento dos usuários, o que resulta em um ecossistema *blockchain* mais robusto e dinâmico (Zhang, Dubey, 2019).

Com a escolha da plataforma *Ethereum* para o desenvolvimento deste trabalho, adota-se o algoritmo PoS. A *Ethereum* passou a utilizar o PoS após substituir o antigo mecanismo PoW por meio de uma atualização significativa conhecida como *The Merge*, concluída em setembro de 2022 (Ethereum Foundation (2022)). Essa transição representou uma mudança fundamental na validação das transações e na garantia da segurança da rede. O PoS apresenta diversas vantagens em relação ao PoW, como maior eficiência energética e menor consumo de recursos computacionais, o que está em consonância com os objetivos de sustentabilidade e escalabilidade da plataforma.

2.2.3 Algoritmos de consenso

Os algoritmos de consenso são essenciais para garantir a sincronização das transações em uma *blockchain*, responsáveis por assegurar que os registros sejam atualizados apenas com a aprovação dos participantes autorizados. Esses participantes, conhecidos como mineradores ou validadores, são nós da rede com permissão para validar e confirmar novas transações por meio desses algoritmos antes da incorporação à *blockchain*. Esse processo de validação garante que as transações sejam registradas na ordem correta e de forma imutável, preservando a integridade do sistema (Zheng et al., 2017).

O bloco da cadeia, conforme ilustrado na Figura 2.8 armazena um registro de várias transações e inclui uma assinatura criptográfica única que valida a integridade e autenticidade dos dados. Após a adição à cadeia, o bloco não pode ser alterado ou excluído. Além disso, cada bloco possui um identificador único e contém uma seção destinada ao identificador do bloco anterior e outra reservada aos dados das transações.

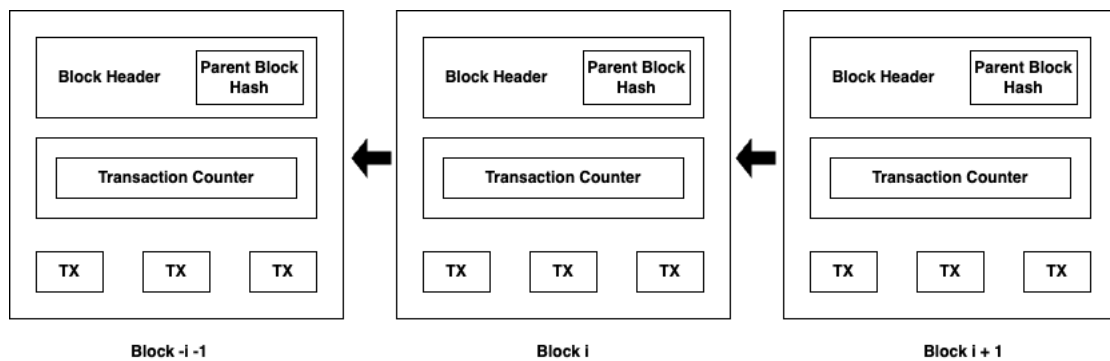


Figura 2.8: Um exemplo de *blockchain* é uma cadeia contínua de blocos interligados. Fonte: (Zheng et al., 2017).

A estrutura de um bloco em uma *blockchain*, representada na Figura 2.9, é composta por diversos componentes. Cada elemento exerce um papel essencial na preservação da integridade e da segurança da cadeia, conforme demonstrado a seguir:

- **Header (Cabeçalho):**

- **Block Version:** Indica o protocolo ou a versão do software utilizado na criação ou validação, o que é essencial para assegurar a compatibilidade com os demais da cadeia.
- **Hash Parent:** Um valor hash que aponta para o bloco imediatamente anterior na cadeia. Isso cria uma ligação entre blocos, formando a estrutura encadeada da blockchain.
- **Merkle Tree Root:** Um valor hash que resume todas as transações no bloco.
- **Timestamp:** A data e a hora em que o bloco foi minerado ou adicionado à blockchain.
- **nBits:** Define o *target* ou alvo que o hash de um bloco deve atingir para que seja considerado válido.
- **Nonce:** Um número inteiro único que se utiliza durante o processo de mineração. Ele é continuamente ajustado pelos mineradores até que se encontre um valor que, quando combinado com o restante dos dados do bloco, gere um hash que atenda ao nível de dificuldade estabelecido pela rede.

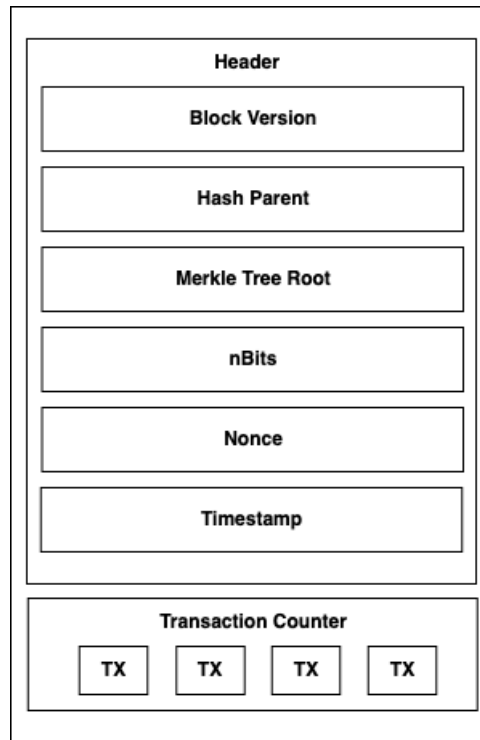


Figura 2.9: Representação esquemática da estrutura de um bloco em uma *blockchain*. Fonte: (Zheng et al., 2017).

- **Corpo do Bloco (Block Body):**

- **Transações (Transactions):** O conjunto de transações incluídas no bloco, cada transação contém detalhes como os remetentes, destinatários e valores transferidos.

Entre os algoritmos de consenso mais amplamente utilizados, destacam-se:

- **Proof-of-Work (PoW):** Utilizado pelo Bitcoin e outras criptomoedas, este algoritmo depende da resolução de desafios matemáticos complexos para validar as transações e adicionar novos blocos à cadeia de blocos. O processo envolve que mineradores compitam para resolver um problema criptográfico complexo e o primeiro a resolver o problema é recompensado com a criação de um novo bloco. Essa abordagem garante a segurança e a integridade da rede, mas uma das principais críticas ao PoW é o seu elevado consumo de energia e poder de computação. À medida que a dificuldade dos problemas criptográficos aumenta para manter a segurança da rede, o consumo de recursos também cresce exponencialmente. Esse impacto ambiental tem gerado debates sobre a sustentabilidade e a eficiência do PoW em comparação com outros algoritmos de consenso, como o Proof-of-Stake (PoS) Nakamoto (2008).
- **Proof-of-Stake (PoS):** Utilizado em criptomoedas que não depende da resolução de desafios matemáticos complexos como no PoW, mas sim da "apostação" (*staking*) de moedas para validar as transações e adicionar novos blocos à cadeia de blocos. O PoS é considerado um algoritmo de consenso mais eficiente e ecologicamente correto em comparação ao PoW, uma vez que não requer uma grande quantidade de poder computacional para resolver desafios matemáticos complexos (Nair, Dorai, 2021).
- **Delegated Proof-of-Stake (DPoS):** Utilizado por criptomoedas como *EOS* e *Lisk*, este algoritmo utiliza a votação dos detentores de tokens para escolher os validadores que irão validar as transações e

adicionar novos blocos à cadeia de blocos. O DPoS é uma extensão do PoS que aprimora a segurança do mecanismo original. No DPoS, mineradores delegados são responsáveis pela mineração dos blocos e alguns deles precisam assinar os blocos criados para torná-los válidos. Esse processo contribui significativamente para resolver as vulnerabilidades associadas ao PoS, como a centralização e a falta de segurança na validação de blocos. O sistema de votação permite que os participantes da rede escolham os validadores de forma mais eficiente, garantindo que o processo de validação seja conduzido por entidades confiáveis e comprometidas com a integridade da rede (Nair, Dorai, 2021).

- **Proof-of-Authority (PoA)**: É um mecanismo projetado para otimizar o PoS e geralmente utilizado em redes permissionadas. Em vez de selecionar os mineradores de blocos com base na posse de tokens de criptomoeda, o PoA escolhe um pequeno grupo de autoridades como validadores de transações, com base em suas identidades ou reputações na rede. Para atuar como validador, o usuário deve passar por um processo formal de notificação, no qual apresenta documentação que comprove sua identidade real e permita vinculá-la à identidade registrada na cadeia, estabelecendo assim sua reputação digital. Os validadores existentes podem votar pela inclusão de novos usuários no grupo de autoridades. Um sistema baseado em PoA também recompensa as autoridades pela certificação e ordenação das transações, o que estimula comportamentos honestos e garante a moderação da rede (Zhang, Dubey, 2019).
- **Proof-of-Elapsed Time (PoET)**: Proposto para redes que utilizam a tecnologia Intel *Software Guard Extensions (SGX)*, o algoritmo PoET baseia-se no tempo decorrido para selecionar o validador responsável por adicionar um novo bloco. Ele distribui tempos de espera aleatórios entre os nós, que só podem criar blocos após esse intervalo, enquanto a plataforma SGX gera provas desses tempos de espera, verificadas posteriormente por outros nós. O PoET oferece duas principais vantagens: eficiência, por não exigir cálculos computacionais intensivos, e imparcialidade, ao adotar o princípio de "um CPU, um voto". Este princípio visa garantir que todos os participantes da rede tenham a mesma oportunidade de criar novos blocos, independentemente de seu poder computacional, para promover uma participação mais justa no processo de validação. No entanto, a computação confiável, como o SGX, não é totalmente à prova de falhas. Uma estrutura teórica foi desenvolvida para avaliar a segurança do PoET, revelando vulnerabilidades que surgem quando uma pequena fração dos nós é comprometida. Especificamente, ao comprometer uma fração $\Theta\left(\frac{\log \log n}{\log n}\right)$ dos nós, um adversário pode simular o nó mais rápido, dificultando a detecção de ataques por meio de testes estatísticos. Essa fração é consideravelmente menor que o limite de 50% presente em sistemas baseados em PoW, como o *Bitcoin* conforme demonstrado no trabalho de (Chen et al., 2017).
- **Proof-of-Burn (PoB)**: É um mecanismo de consenso na tecnologia blockchain que permite aos participantes eliminarem irreversivelmente uma quantidade específica de criptomoeda para obter o direito de validar transações e criar novos blocos. Esse método surge como uma alternativa aos algoritmos de consenso intensivos em energia, como o PoW. Particularmente útil para o lançamento de novas criptomoedas, o PoB permite gerar uma prova de destruição verificável, que pode ser enviada para a nova *blockchain* em troca de recompensas. O PoB foi implementado de várias formas, incluindo como um contrato inteligente em plataformas como o *Ethereum*. Apesar de ser um algoritmo de consenso menos conhecido e não ter alcançado a mesma adoção que o PoW e o PoS, o PoB foi utilizado em alguns projetos, como o *Slimcoin*, lançado em 2014. O *Slimcoin* visa oferecer uma alternativa aos sistemas tradicionais de mineração baseados em (PoW), conhecidos por seu alto consumo de energia e complexidade (Karantias et al., 2020).
- **Proof-of-Importance (PoI)**: é um algoritmo de consenso utilizado na *blockchain NEM*, uma plataforma lançada em 2015 com o objetivo de redefinir o funcionamento dos sistemas financeiros. O

PoI é empregado para determinar quais nós são elegíveis para adicionar blocos à rede, um processo conhecido como "harvesting". Esse mecanismo se destaca por sua abordagem única, que considera não apenas a quantidade de criptomoedas que um usuário possui, mas também sua contribuição geral para a segurança e integridade da rede. Ao avaliar a contribuição total de um usuário para a rede, o PoI promove um ambiente mais inclusivo e equitativo, reconhece e recompensa a importância de cada participante. Essa abordagem não só melhora a segurança da rede, como também incentiva um maior envolvimento dos usuários, o que resulta em um ecossistema *blockchain* mais robusto e dinâmico (Zhang, Dubey, 2019).

Com a escolha da plataforma *Ethereum* para o desenvolvimento deste trabalho, adota-se o algoritmo PoS. A *Ethereum* passou a utilizar o PoS após substituir o antigo mecanismo PoW por meio de uma atualização significativa conhecida como *The Merge*, concluída em setembro de 2022 (Ethereum Foundation (2022)). Essa transição representou uma mudança fundamental na validação das transações e na garantia da segurança da rede. O PoS apresenta diversas vantagens em relação ao PoW, como maior eficiência energética e menor consumo de recursos computacionais, o que está em consonância com os objetivos de sustentabilidade e escalabilidade da plataforma.

Capítulo 3

Trabalhos Relacionados

O referencial teórico deste trabalho reúne os principais conceitos e fundamentos que sustentam a proposta de um modelo descentralizado para a mobilidade urbana, baseado na tecnologia *blockchain*. A revisão crítica da literatura abrange temas centrais, como o conceito de *smart cities*, os desafios da mobilidade nos centros urbanos, o papel da descentralização tecnológica e a aplicação de plataformas de MaaS. Além disso, o capítulo apresenta estudos e experiências relevantes que compõem o estado da arte, o que permite posicionar a proposta no panorama acadêmico e tecnológico contemporâneo. Ao evidenciar lacunas, avanços e perspectivas, o referencial contribui para a fundamentação da pesquisa e para a delimitação dos seus diferenciais metodológicos e conceituais.

3.1 Smart Cities

O conceito de *smart cities* no século XXI, ao destacar a urbanização acelerada e a revolução digital como forças estruturantes da transformação urbana (Cunha et al., 2016). As cidades inteligentes são apresentadas como um modelo emergente para lidar com desafios históricos e novos problemas urbanos, incluindo segurança, saúde, educação, meio ambiente, mobilidade e habitação. O papel das inovações tecnológicas na melhoria da gestão de serviços públicos, da qualidade de vida nos centros urbanos e da governança colaborativa. Ao final, reforça a importância de as cidades desenvolverem capacidades adaptativas frente às dinâmicas contemporâneas, com o uso da tecnologia como instrumento estratégico para promover soluções eficazes e inclusivas (Cunha et al., 2016).

O impacto do crescimento urbano no cotidiano da população brasileira. Na década de 1960, o Brasil ainda era majoritariamente rural, com 54,9% da população localizada no meio rural. Já na década seguinte, o cenário se inverteu: 56% dos brasileiros passaram a viver em áreas urbanas. Essa rápida transição impulsionou processos de mecanização e industrialização, motivada pela busca por melhores condições de vida e pela consolidação de um modelo urbano-industrial, o que marcou uma nova etapa no processo de urbanização do país (Cunha et al., 2016).

A pesquisa baseada em entrevistas com profissionais e cidadãos brasileiros, além de especialistas internacionais, busca compreender como as cidades inteligentes são definidas e implementadas. Seu estudo apresenta uma tipologia que compara diferentes níveis de maturidade do conceito de *smart cities*, que vão desde a aplicação pontual de tecnologias em serviços urbanos até modelos de gestão integrada em tempo real. Na Figura 3.1, descreve os estágios de transição das cidades rumo à inteligência urbana, que permite a adoção inicial de tecnologias até a consolidação de uma governança digital articulada (Cunha et al., 2016).

Apesar dos desafios estruturais destacados, o Brasil apresenta avanços significativos no processo de digitalização da sociedade. Estima-se que existam aproximadamente 306 milhões de dispositivos conectados à internet — uma média de três por cada dois habitantes — Os *smartphones* os mais utilizados (Cunha et al., 2016). Em 2014, cerca de 50% dos domicílios já contavam com acesso à internet, embora

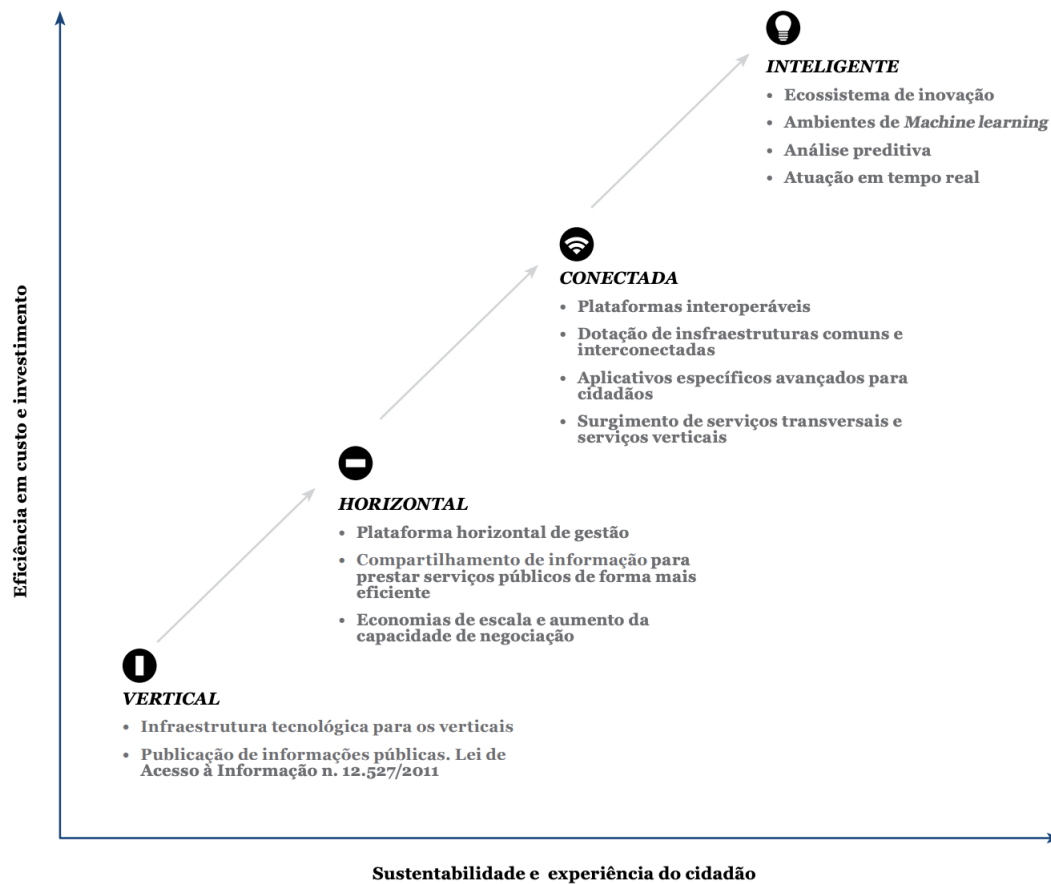


Figura 3.1: Modelo com estágios de evolução *Smart Cities*. Fonte: (Cunha et al., 2016)

persistam desigualdades regionais e socioeconômicas, conforme ilustrado na Figura 3.2. O uso da internet por meio de dispositivos móveis cresceu de forma expressiva nos últimos anos, e 84% dos usuários declararam acessá-la diariamente. Para ampliar esse acesso, sobretudo em áreas rurais e entre populações em situação de vulnerabilidade, o governo brasileiro lançou iniciativas como o Programa Nacional de Banda Larga [Agência Nacional de Telecomunicações \(Anatel\) \(2020\)](#) e o projeto Cidades Digitais [Ministério das Comunicações \(Brasil\) \(2020\)](#). Essas políticas públicas visam promover a inclusão digital, qualificar cidadãos e servidores públicos no uso de tecnologias e possibilitar que os municípios ofereçam serviços online com maior eficiência.

A ascensão da economia colaborativa, fortemente associada ao avanço das *smart cities*, já que ambas compartilham princípios como a integração tecnológica, o uso intensivo de dados e a promoção da sustentabilidade (Cunha et al., 2016). Esse modelo emergente representa uma ruptura nos paradigmas tradicionais de produção e consumo, ao viabilizar o aproveitamento de recursos ociosos por meio de plataformas digitais como Uber e Airbnb. A lógica colaborativa amplia o acesso a bens e serviços, mas também impõe desafios regulatórios relevantes, especialmente em grandes centros urbanos como São Paulo e Rio de Janeiro, onde estruturas jurídicas e modelos empresariais convencionais enfrentam dificuldades de adaptação. Simultaneamente, essa transformação fomenta inovações em mobilidade, engajamento comunitário e geração de oportunidades econômicas, reforçando a convergência entre práticas colaborativas e estratégias de gestão urbana inteligente.

A mobilidade urbana, sobretudo no que diz respeito ao transporte público, continua a ser uma das maiores preocupações, devido à sua influência direta na qualidade de vida da população (Cunha et al.,

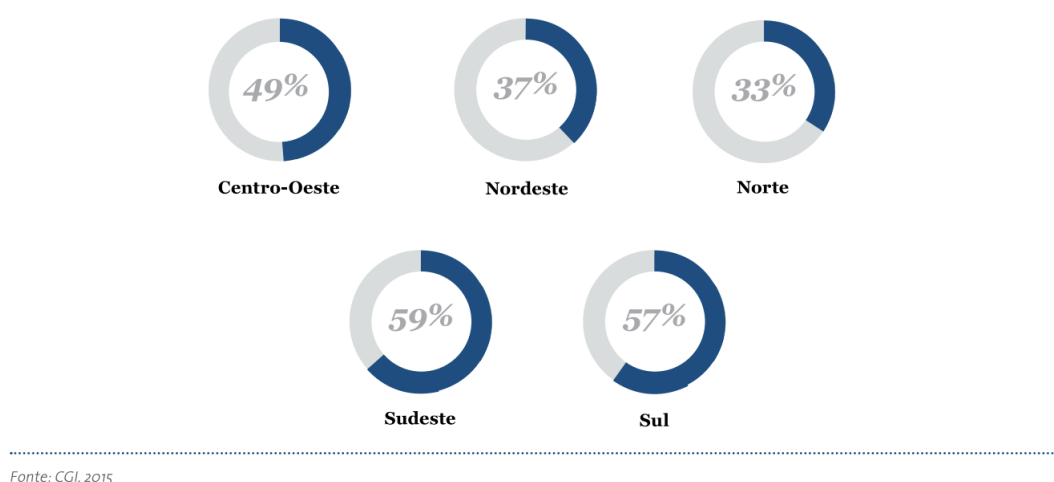


Figura 3.2: Proporção de domicílios com computador, por região do Brasil. Fonte: (Cunha et al., 2016)

2016). As principais expectativas concentram-se na redução do tempo e dos custos de deslocamento, no alívio dos congestionamentos, na ampliação da oferta de estacionamentos e na promoção de estilos de vida mais saudáveis. O estudo evidencia o papel da tecnologia como elemento transformador nesse contexto, com destaque para melhorias no transporte coletivo, incentivo ao uso de bicicletas, ampliação da frota de veículos elétricos e híbridos, bem como maior eficiência na gestão do trânsito e diminuição do uso de veículos particulares.

A sustentabilidade urbana é outro tema central, impulsionado por fatores como crescimento desordenado, dependência do transporte rodoviário, turismo em expansão, consumo excessivo de recursos naturais e os efeitos das mudanças climáticas (Cunha et al., 2016). Para enfrentar esses desafios, as administrações públicas vêm adotando medidas como a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC), que estabeleceu a meta de reduzir em até 38,9% as emissões de gases de efeito estufa até 2020. A Política Nacional de Resíduos Sólidos também contribui, ao definir diretrizes para o desenvolvimento sustentável com incentivo à cooperação entre setores e valorização de resíduos recicláveis e reutilizáveis.

Há uma expectativa clara de que o governo exerça um papel proativo por meio da formulação de políticas públicas voltadas à integração de tecnologias inovadoras, à melhoria da infraestrutura urbana e ao aumento da eficiência dos serviços oferecidos à população. Nesse contexto, as parcerias entre os setores público e privado tornam-se fundamentais para assegurar a acessibilidade das soluções tecnológicas e reduzir as desigualdades sociais e regionais (Cunha et al., 2016).

As experiências internacionais na implementação de *smart cities* evidenciam uma ampla diversidade de abordagens, refletindo contextos culturais, econômicos e institucionais distintos. Iniciativas de destaque em cidades como Cingapura, Amsterdã e Hong Kong consolidaram esses centros urbanos como referências globais em inovação, sustentabilidade e governança inteligente (Cunha et al., 2016). Paralelamente, surgem experiências em menor escala, como os chamados *SmartLabs*, que promovem soluções tecnológicas adaptadas a realidades locais. Grandes metrópoles, como Londres, Tóquio e Nova York, concentram-se na inovação como estratégia de competitividade global, enquanto cidades secundárias adaptam esses modelos a nichos específicos, como indústrias criativas ou mobilidade sustentável. Apesar dos diferentes graus de maturidade, os desafios comuns — como segurança, desigualdade e infraestrutura — incentivam a busca por soluções colaborativas e replicáveis. Esses exemplos oferecem lições valiosas para outras cidades que buscam consolidar trajetórias rumo à inteligência urbana Figura 3.3.

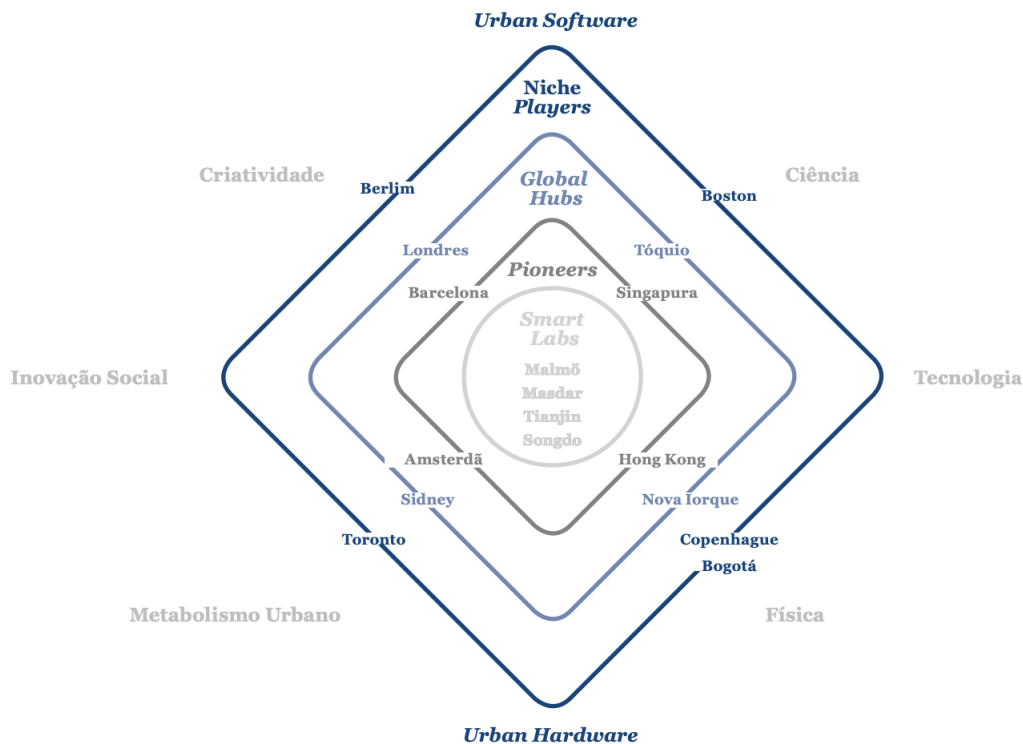


Figura 3.3: Cases internacionais. Fonte: (Cunha et al., 2016)

- **Pioneers:** Cidades de médio porte como Singapura, Amsterdã e Hong-Kong, reconhecidas por inovações em gestão urbana e pela autonomia administrativa na alocação de recursos para iniciativas avançadas.
- **Smart Labs:** Assentamentos menores — bairros ou pequenas cidades — onde se aplicam projetos experimentais com tecnologias emergentes adaptadas às realidades locais.
- **Global hubs:** Grandes metrópoles como Londres, Tóquio, Sidney e Nova Iorque, que utilizam a tecnologia para manter a liderança global. Apesar dos recursos disponíveis, enfrentam o desafio de integrar inovações a estruturas urbanas complexas.
- **Niche players:** Cidades com atuação focada em nichos específicos, como Berlim (cidade criativa), Boston (centro científico), Toronto (gestão sustentável de recursos) e Copenhague (mobilidade sustentável).

A relevância estratégica das cidades inteligentes como eixo fundamental para a modernização urbana e o desenvolvimento sustentável. As evidências analisadas demonstram que a transformação digital dos ambientes urbanos contribui diretamente para o progresso econômico, social e cultural, ao mesmo tempo em que amplia a qualidade de vida da população (Cunha et al., 2016).

A diversidade de iniciativas identificadas vão desde intervenções pontuais, como iluminação pública inteligente, até projetos estruturantes de requalificação urbana e incentivo à economia criativa. Revelam a amplitude do conceito e sua aplicabilidade em diferentes escalas e contextos (Cunha et al., 2016). Essa multiplicidade de abordagens reforça a importância de políticas públicas flexíveis e adaptadas às realidades locais.

Apesar do potencial, persistem desafios significativos, entre eles as desigualdades estruturais, a fragmentação institucional, a escassez de recursos e as barreiras culturais. A superação desses obstáculos exige planejamento estratégico, capacidade de gestão e, sobretudo, uma visão integrada de longo prazo. A gestão qualificada do capital humano aparece como vetor essencial para o avanço das *smart cities*, ao favorecer a atração e retenção de talentos, impulsionar a inovação e fomentar ecossistemas urbanos criativos e resilientes para (Cunha et al., 2016).

Por fim, a consolidação de uma abordagem colaborativa baseada no diálogo entre governo, iniciativa privada, academia e sociedade civil, representa um caminho promissor para o fortalecimento das capacidades institucionais e a construção de modelos urbanos mais inclusivos, inteligentes e sustentáveis. Ao internalizar essas diretrizes, as cidades estarão mais preparadas para enfrentar os desafios contemporâneos e transformar-se em espaços mais habitáveis, eficientes e centrados nas pessoas (Cunha et al., 2016).

3.2 Mobilidade Sustentável com Blockchain e AIoT

A integração entre IA e IIoT, denominada AIoT, potencializa transformações significativas na superação de desafios urbanos e na promoção da sustentabilidade (Jaramillo-Alcazar et al., 2023). enfatiza os impactos econômicos, sociais e ambientais dessa convergência tecnológica, a partir de um estudo de caso voltado à otimização do tráfego veicular. A aplicação conjunta de *blockchain* e visão computacional no contexto da mobilidade urbana sintetiza os objetivos, a metodologia adotada e as principais contribuições da pesquisa, evidenciando seu caráter inovador e sua aplicabilidade em ambientes urbanos complexos.

A coleta de dados ocorreu por meio de uma rede de sensores distribuídos em pontos estratégicos da malha viária urbana. Esses sensores registraram informações como velocidade média, densidade do tráfego e tempos de viagem. Durante um período experimental de três meses, mais de 100 mil registros foram obtidos, representando distintos momentos do dia e dias da semana. A visão computacional complementou o monitoramento, com mais de 50 mil imagens capturadas por câmeras posicionadas em locais críticos da infraestrutura urbana, e permite uma análise visual detalhada dos padrões de circulação.

Os dados foram processados com o uso de técnicas avançadas de aprendizado de máquina. Aplicaram-se algoritmos de agrupamento para identificar padrões de congestionamento e avaliar a distribuição de veículos por tipo e horário, conforme ilustrado na Figura 3.4.

Também foi desenvolvido um modelo preditivo baseado em redes neurais, com o objetivo de anteciper níveis de tráfego em interseções críticas. O processamento dos dados em tempo real resultou em uma redução de 20% nos congestionamentos durante os horários de pico. Em seu trabalho a tecnologia *blockchain* foi empregada para garantir a integridade, segurança e imutabilidade dos dados, ampliando a confiabilidade do sistema e fomentando práticas sustentáveis no ambiente urbano. A modelagem matemática utilizada baseou-se na maximização da eficiência do tráfego e na minimização da congestão. As seguintes expressões fundamentaram as estratégias de controle:

$$C = f(D, V) \quad (3.1)$$

onde:

- C representa o nível de congestionamento;

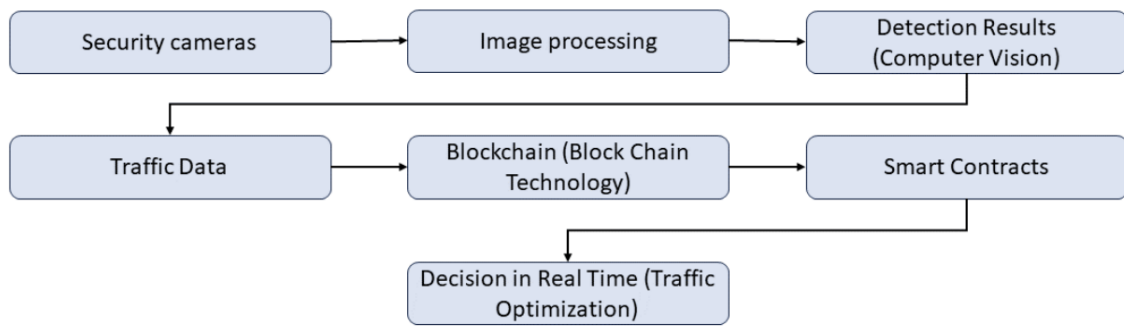


Figura 3.4: Diagrama arquitetônico do sistema de otimização de tráfego em cidades inteligentes. Fonte: (Jaramillo-Alcazar et al., 2023)

- D refere-se à densidade de veículos;
- V corresponde à velocidade média no ponto da rede.

Para mensurar a eficiência, utilizou-se:

$$E = g(V, T) \quad (3.2)$$

onde:

- E representa a eficiência no trecho de via;
- V corresponde à velocidade média;
- T indica o tempo de deslocamento.

Essas formulações subsidiaram a tomada de decisões em tempo real na gestão de tráfego. A função de minimização também contemplou a densidade de veículos para mitigação de pontos críticos de congestionamento. A avaliação da solução proposta por (Jaramillo-Alcazar et al., 2023) demonstrou seu potencial de aplicação em contextos urbanos complexos. Em ambiente simulado, os resultados evidenciaram redução de 15% nos congestionamentos e melhoria de 10% nos tempos de deslocamento. A acurácia de 95% na detecção de comportamentos anômalos confirmou a robustez do sistema para fins de segurança viária.

A evolução das *smart cities* exige pesquisas contínuas que ampliem as soluções já exploradas e enfrentem limitações técnicas, éticas e operacionais. Integração de tecnologias de comunicação Veicular na qual a troca direta de dados entre veículos e entre veículos e a infraestrutura urbana tem potencial para transformar a gestão de tráfego em tempo real. Pesquisas futuras podem focar na interoperabilidade entre essas tecnologias e redes *blockchain*, assegurando descentralização, transparência e integridade dos dados (Jaramillo-Alcazar et al., 2023).

A inserção de veículos autônomos pode contribuir significativamente para a fluidez do tráfego e a redução de acidentes. No entanto, essa evolução exige o desenvolvimento de modelos analíticos mais robustos. Abordagens fundamentadas em redes neurais profundas, aprendizado por reforço e séries temporais mostram-se promissoras para a previsão de padrões de congestionamento e a adaptação dinâmica dos sistemas de mobilidade urbana. Além disso, futuras investigações podem aprofundar o uso de sensores aplicados ao monitoramento do fluxo viário, da qualidade do ar e da ocupação das vias. A gestão descentralizada desses dados, por meio de *smart contracts*, pode permitir assegurar maior transparência, segurança e participação social (Jaramillo-Alcazar et al., 2023).

A viabilização dessas soluções em larga escala exige o estabelecimento de parcerias público-privadas. Além disso, torna-se necessário considerar a padronização de protocolos de comunicação, o desenvolvimento de APIs abertas e a integração das soluções tecnológicas em frotas de veículos comerciais (Jaramillo-Alcazar et al., 2023). O autor também ressalta a importância de abordar questões éticas e regulatórias, como a privacidade dos dados, a segurança informacional e os princípios de justiça algorítmica. A conformidade com legislações nacionais e internacionais, aliada à adoção de práticas de governança ética, constitui um requisito fundamental para a aceitação e a legitimidade dessas tecnologias no contexto urbano contemporâneo.

3.3 Gamificação, Blockchain e MaaS para Sustentabilidade em Smart Cities

Diversas atividades humanas, como o tráfego intenso, a agricultura e a urbanização, contribuem de forma significativa para a emissão de gases de efeito estufa, o que gera degradação ambiental e impactos negativos sobre os seres humanos e outras formas de vida. Nesse cenário, a sociedade busca adaptar-se a um ecossistema em transformação, por meio do planejamento de *Smart Cities* capazes de mitigar tais efeitos (Ozpinar, 2023).

Para garantir o sucesso dessas cidades a importância de serviços urbanos centrados no usuário, com integração plena e evolução contínua com base em novas tecnologias. A infraestrutura proposta deve ser distribuída, flexível e de fácil manutenção, respeitando a privacidade dos cidadãos e atendendo às demandas de todas as partes envolvidas. A arquitetura contempla módulos essenciais, como gamificação, *blockchain*, transações de *commodities* e cálculos de carbono, além de um sistema de integração robusto. Esses módulos também dão suporte à segurança, governança e proteção de dados (Ozpinar, 2023).

Uma abordagem de Arquitetura Corporativa (**EA**) conforme mostrado na figura 3.5 para desenvolver estratégias voltadas à redução do consumo energético e da pegada de carbono no setor de transporte, com base na implementação de MaaS em *smart cities*. A estrutura de Tecnologias da Informação e Comunicação (**TIC**) apresentada visa integrar o comportamento dos cidadãos com o objetivo de otimizar a mobilidade urbana. Um estudo de caso ilustra a aplicação prática desse modelo em área metropolitana, evidenciando os benefícios proporcionados (Ozpinar, 2023).

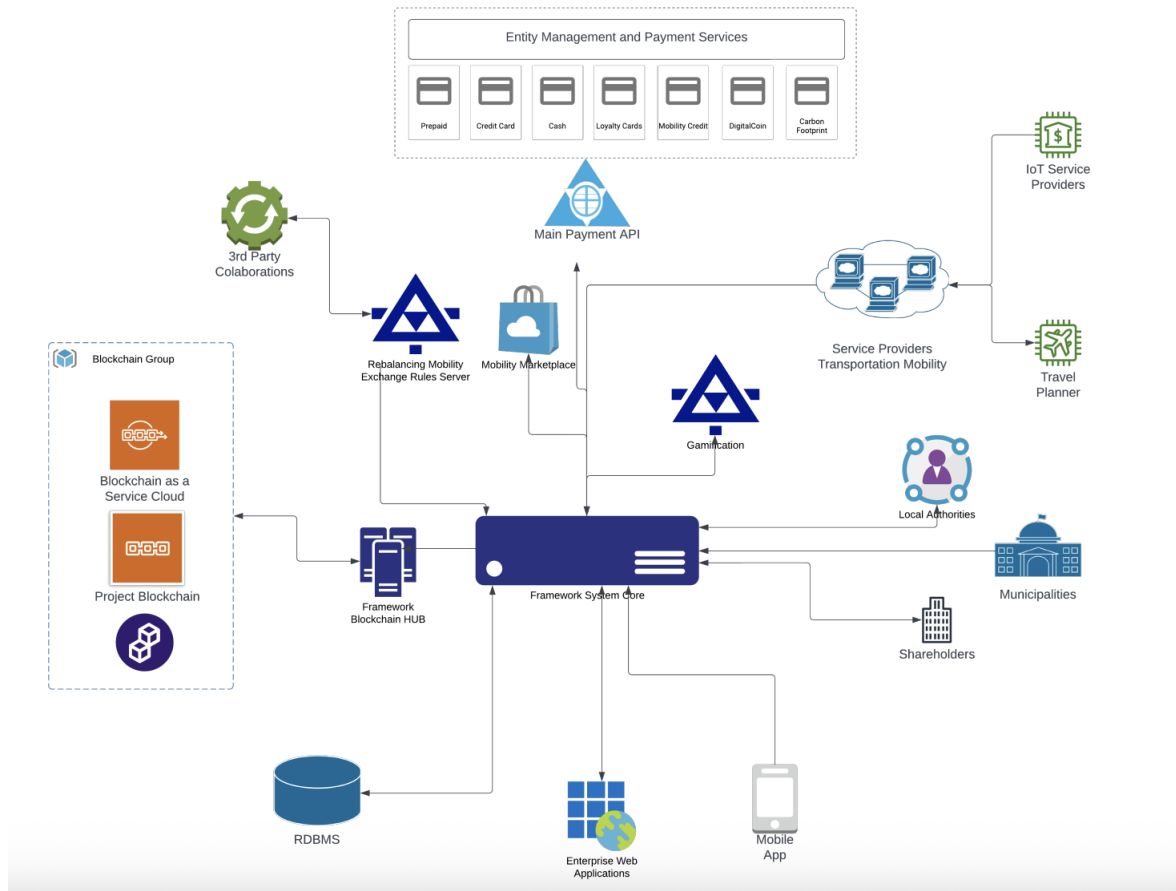


Figura 3.5: Arquitetura de alto nível do framework. Fonte: (Ozpinar, 2023)

Aplicações urbanas podem ser implementadas por meio de *frameworks*, aplicativos móveis e metodologias educativas. No qual o sistema permite que cidadãos recebam recompensas em formas de gamificação por práticas sustentáveis, como utilizar bicicletas, transporte público ou veículos elétricos, além de participar de eventos e campanhas de conscientização ambiental Ozpinar (2023). Nesse caso a tecnologia *blockchain* cumpre um papel central na comercialização de créditos de carbono por meio de *smart contracts*, assegurando transparência e segurança nas transações. O modelo aborda tanto os créditos de conformidade, utilizados por empresas e governos para atender metas regulatórias, quanto os créditos voluntários, voltados à compensação de emissões por indivíduos ou organizações.

Os *smarts contracts* executam automaticamente as regras e condições das transações, eliminando a necessidade de intervenção humana e reduzindo o risco de erros e fraudes. Uma abordagem que favorece a criação de um mercado descentralizado, acessível a múltiplos participantes, com interoperabilidade entre *blockchains* distintas, o que facilita o compartilhamento de dados e a verificação de transações em diferentes cidades e regiões.

A cidade de Istambul como cenário ideal para um estudo de caso voltado à validação da arquitetura proposta para o MaaS (Ozpinar, 2023). A capital econômica da Turquia apresenta características estruturais e operacionais que justificam sua escolha, como infraestrutura tecnológica consolidada, diversidade de modais de transporte alternativo e elevada densidade populacional. Com mais de 18 milhões de habitantes, cerca de 2 milhões de estudantes e uma frota estimada em 5 milhões de veículos, Istambul configura-se como um ambiente urbano propício à realização de testes futuros, servindo como referência para uma potencial Prova de Conceito (PoC).

Embora o modelo ainda não tenha sido implementado, a proposta teórica contempla uma análise comparativa entre os usos do transporte público e individual em diferentes faixas horárias, utilizando escalas *fuzzy* que permitem mensurar indicadores subjetivos de sustentabilidade por meio de funções de pertinência, incorporando variáveis como conforto, acessibilidade e conveniência de forma gradual e não binária (Ozpinar, 2023). As simulações indicam que a substituição do transporte particular pelo coletivo apresenta o maior potencial de mitigação do congestionamento e das emissões poluentes. Contudo, os resultados apontam que usuários regulares do transporte público necessitam de incentivos adicionais, sobretudo em relação ao conforto, à acessibilidade e à adequação às rotinas cotidianas.

O papel estratégico das *smart cities* na promoção da qualidade de vida, ao destacar a importância da integração entre tecnologia e eficiência urbana (Ozpinar, 2023). O MaaS é concebido como ferramenta central para a unificação dos diferentes modais de transporte, possibilitando ao cidadão o acesso integrado a múltiplas opções de deslocamento em uma plataforma única e interoperável.

Ressalta-se a importância de aprofundar a análise quantitativa dos comportamentos individuais em ambientes gamificados, com vistas à identificação de estratégias mais eficazes de engajamento. Propõe-se, ainda, a criação de uma infraestrutura robusta de *Big Data*, destinada a registrar as preferências de mobilidade dos usuários do ecossistema MaaS (Ozpinar, 2023). A partir desses dados, pretende-se desenvolver modelos e recomendações personalizadas por meio de algoritmos de inteligência artificial e técnicas de simulação.

Finalmente, a avaliação estatística do impacto ambiental da arquitetura, com foco na mensuração da redução das emissões totais de carbono, constitui etapa fundamental para verificar a efetividade das soluções MaaS no alcance de metas de sustentabilidade urbana. Tais perspectivas ampliam a aplicabilidade do modelo proposto e criam condições para seu aperfeiçoamento contínuo, assegurando maior alinhamento com as complexidades do ambiente urbano contemporâneo (Ozpinar, 2023).

3.4 Aplicações de Blockchain e Desafios Operacionais

A importância estratégica do setor de transportes na mitigação das emissões de carbono resulta na necessidade urgente de medidas eficazes (Nguyen et al., 2023). A proposta apresentada introduz o conceito de MaaS como uma solução inovadora no contexto dos Sistemas de Transporte Inteligentes (ITS), ao integrar múltiplos modais com o objetivo de atender às necessidades dos usuários e, simultaneamente, minimizar os impactos ambientais associados à mobilidade urbana.

Um dos principais desafios e também uma oportunidade na concepção de sistemas MaaS descentralizados consiste na integração da tecnologia *blockchain* com planejadores de viagem já existentes, como o OpenTripPlanner (OTP). Uma plataforma de código aberto voltada para planejamento multimodal de rotas e itinerários. É amplamente utilizado por autoridades de transporte, pesquisadores e desenvolvedores que desejam integrar diferentes meios de transporte (OpenTripPlanner, 2025).

Embora o uso de *blockchain* represente um avanço promissor para garantir transparência e descentralização, sua implementação em sistemas MaaS ainda encontra obstáculos significativos. As principais dificuldades concentram-se em três categorias: (i) a proteção de informações sensíveis, dada a natureza pública e auditável das cadeias de blocos; (ii) limitações de desempenho, especialmente nas operações de escrita e verificação de transações; e (iii) questões relacionadas à segurança e confiabilidade das comunicações entre os diferentes agentes da rede (Nguyen et al., 2023). Esses fatores exigem o desenvolvimento de soluções tecnológicas robustas e mecanismos de governança adequados para que o MaaS descentrali-

zado se torne viável em larga escala.

Um sistema baseado em *blockchain*, com o objetivo de promover maior confiança e transparência no setor de transportes. Para isso, foi apresentada uma arquitetura específica, juntamente com *smart contracts* que viabilizam a implementação de sua proposta (Nguyen et al., 2023). A abordagem contempla tanto a *Hyperledger Fabric*, uma plataforma permissionada, quanto o *Ethereum*, uma *blockchain* pública, o que possibilita comparações técnicas precisas entre ambientes com diferentes níveis de permissão e descentralização.

A Figura 3.6 estrutura o modelo comparativo para analisar o desempenho dessas plataformas, fornecendo subsídios relevantes à seleção de tecnologias em futuras iniciativas. O sistema é composto por três componentes principais: o OTP, responsável pela geração de rotas de viagem; técnicas de aprendizado de máquina, utilizadas para recomendar soluções com base em dados históricos; e a *blockchain*, que assegura uma comunicação descentralizada e segura entre os participantes (Nguyen et al., 2023).

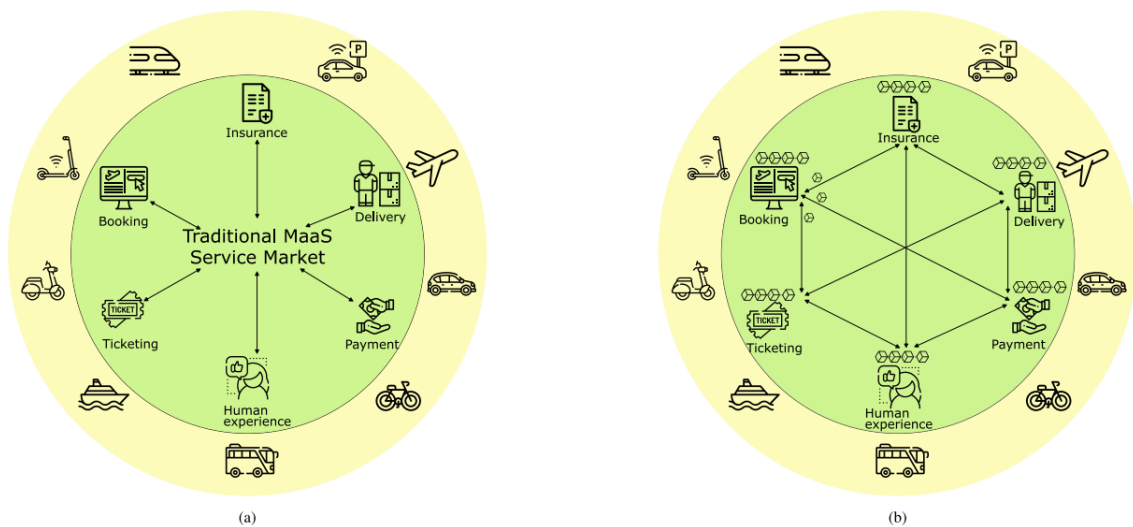


Figura 3.6: Proposta de arquitetura baseada em *blockchain*. Fonte: (Nguyen et al., 2023)

Dois protocolos fundamentais foram propostos: um voltado à gestão de rotas, padronizando a troca de dados entre provedores de transporte, e outro voltado à emissão e verificação de bilhetes baseados em *blockchain*, assegurando sua autenticidade. Os testes ocorreram em diferentes configurações de *hardware*, máquinas virtuais e redes, tendo como referência os dados de transporte das cidades de Tampere e Helsinki (Nguyen et al., 2023).

A seguir, a avaliação experimental com foco nos aspectos de escalabilidade e desempenho das plataformas, com base em métricas como taxa de transferência e tempo médio de confirmação das transações (Nguyen et al., 2023). As variáveis analisadas incluíram diferentes tamanhos de transações e blocos. Os resultados obtidos permitem comparar a eficiência de leitura e escrita nas *blockchains* e fornecem subsídios relevantes para o aprimoramento de soluções MaaS descentralizadas.

No âmbito da segurança e confidencialidade, o principal problema refere-se à exposição de dados sensíveis dos usuários, uma vez que a transparência inerente ao funcionamento da *blockchain* pode permitir o rastreamento de indivíduos (Nguyen et al., 2023). Como mitigação, o estudo recomenda o uso de criptografia, autenticação robusta e pseudonimato, além da verificação seletiva de identidade em contextos específicos, como viagens internacionais. A adoção de *blockchains* permissionadas, como a *Hyperledger Fabric*, é apontada como alternativa mais segura, pois permite maior controle de acesso por meio da utilização de contêineres *Docker*. A aplicação futura de *Zero-Knowledge Proofs* (ZKP) pode reforçar

ainda mais a privacidade dos usuários.

Em relação ao desempenho, destaca que o mecanismo de consenso distribuído, típico das *blockchains* públicas, compromete a eficiência, sobretudo nas operações de escrita (Nguyen et al., 2023). Para contornar esse obstáculo, o estudo sugere o uso de técnicas como *sharding*, que divide a rede em subgrupos para reduzir a sobrecarga de comunicação; tecnologias baseadas em grafos acíclicos direcionados (**DAG**), que viabilizam execuções paralelas; e o armazenamento *off-chain* por meio do *InterPlanetary File System* (**IPFS**) Benet (2014), que reduz a sobrecarga transacional sem comprometer a integridade dos dados, preservada por meio de hashes armazenados na *blockchain*.

Quanto aos desafios relacionados aos planejadores de viagem, destaca, no caso do OTP, a dificuldade de processar informações heterogêneas e dinâmicas em ambientes descentralizados (Nguyen et al., 2023). Para superar essa limitação, recomendou-se a adoção de padrões consolidados, como o *Network Timetable Exchange* (**NeTEx**), um modelo europeu de dados para a troca de informações sobre horários e estrutura de redes de transporte público CEN/TC 278 (2014); o *Service Interface for Realtime Information* (**SIRI**), um protocolo orientado à comunicação de dados em tempo real sobre a operação dos serviços Transmodel-CEN (2024); e o OpenStreetMap (**OSM**), um projeto colaborativo que fornece dados geoespaciais abertos de alta granularidade (OpenStreetMap contributors, 2004). Além disso, sugere-se permitir atualizações incrementais no grafo de tráfego, evitando a necessidade de reconstruções completas. Protocolos de disseminação de dados também são apontados como parte integrante de uma possível solução (Nguyen et al., 2023).

Os resultados experimentais evidenciaram o funcionamento eficaz do OTP e das plataformas *blockchain* (*Hyperledger Fabric* e *Ethereum*) no contexto MaaS (Nguyen et al., 2023). O OTP, configurado com dados reais de transporte de cidades finlandesas, mostrou que o volume de dados gerados depende mais da quantidade de modais e paradas do que da distância percorrida; dado essencial para estimativas de custo computacional em sistemas urbanos complexos.

Em relação às plataformas *blockchain*, os testes indicaram que blocos maiores oferecem melhor desempenho, sobretudo nas operações de escrita. Consultas, por não exigirem consenso, apresentaram tempos de resposta menores. Embora o *Ethereum* tenha se destacado em transações de pequeno porte, o *Hyperledger Fabric* mostrou superioridade em diversos cenários, com vantagens adicionais como menor vazamento de dados e melhor adequação a ecossistemas permissionados — atributos valiosos para soluções MaaS que priorizam privacidade e interoperabilidade (Nguyen et al., 2023).

Com base nesses achados, direções promissoras para pesquisas futuras. A principal delas está relacionada ao aprimoramento da privacidade por meio do uso de provas de ZKP, capazes de validar transações sem expor dados sensíveis, um elemento crucial para a adoção do MaaS em larga escala. Também reforça o potencial de soluções como *sharding*, DAGs e armazenamento *off-chain* via IPFS para aumentar a escalabilidade e reduzir a sobrecarga transacional, mantendo os princípios de descentralização e segurança (Nguyen et al., 2023).

Por fim, destaca-se a importância da padronização de dados e da atualização em tempo real. Para isso, recomenda-se o uso de padrões abertos como NeTEx e SIRI, além da adoção de mecanismos de atualização incremental do grafo e disseminação eficiente das informações.

A contribuição não se limita à implementação técnica de um sistema MaaS baseado em *blockchain*, mas se estende à análise crítica dos principais obstáculos e à proposição de soluções inovadoras com foco em segurança, desempenho e interoperabilidade multilateral no ecossistema do transporte urbano.

3.5 Análise Crítica da Literatura

Por fim, a análise comparativa dos trabalhos relacionados revela a diversidade de enfoques adotados na investigação sobre mobilidade urbana e *smart cities*. A literatura revisada compõe um panorama abrangente do estado da arte, evidenciando a transição do discurso conceitual para propostas aplicadas, sustentadas por tecnologias emergentes como *blockchain*, IA e IoT. Essa evolução indica o amadurecimento do campo, ao substituir modelos teóricos generalistas por arquiteturas e sistemas descentralizados orientados à sustentabilidade, transparência e eficiência operacional no ecossistema da mobilidade urbana.

O trabalho de Cunha et al. (2016) constitui um marco teórico no contexto brasileiro, ao apresentar uma visão abrangente e multifacetada de *smart cities*. Os autores exploram seis eixos estruturantes — governança, economia, mobilidade, meio ambiente, pessoas e qualidade de vida — e destacam o papel da tecnologia como meio, e não como fim, na superação de desafios históricos e contemporâneos do espaço urbano. Seu modelo de maturidade e as frentes de ação propostas oferecem contribuições relevantes para o delineamento de políticas públicas e para o planejamento urbano de longo prazo. No entanto, apesar da abordagem abrangente, o estudo de Cunha et al. (2016) não inclui experimentações técnicas nem validações empíricas em soluções específicas, como os sistemas de mobilidade ou a infraestrutura digital descentralizada.

Nesse vácuo de operacionalização tecnológica, surgem estudos mais recentes, como o de Nguyen et al. (2023), que propõem uma arquitetura de MaaS descentralizada com base na tecnologia *blockchain*. A principal contribuição consiste na construção e validação de uma arquitetura fundamentada em *smart contracts*, com foco na confiabilidade e transparência dos dados transacionais. Esse estudo avança ao realizar experimentos de desempenho que comparam redes permissionadas e públicas, o que proporciona *insights* valiosos sobre eficiência e escalabilidade. Ainda assim, a pesquisa permanece restrita à dimensão técnico-arquitetural, com limitada conexão com dados urbanos reais ou interações com usuários.

Complementarmente, Ozpinar (2023) amplia a abordagem de MaaS ao integrar conceitos de sustentabilidade ambiental e gamificação em um modelo teórico de arquitetura empresarial hiperintegrada. Com o uso da *blockchain* como infraestrutura de confiança e rastreabilidade, os autores propõem um ecossistema de incentivos a comportamentos pró-ambientais, baseado em recompensas vinculadas a créditos de carbono. A proposta destaca-se ao incorporar aspectos de engajamento cidadão e métricas ambientais, mas sua implementação permanece conceitual e dependente de validações futuras. Ademais, o estudo foca em cidades com infraestrutura digital avançada, o que limita sua aplicabilidade imediata ao contexto brasileiro.

Outro trabalho relevante é o de Jaramillo-Alcazar et al. (2023), que apresenta um sistema de gestão de tráfego inteligente por meio da integração entre *blockchain*, AIoT e redes urbanas sensorizadas. A principal contribuição reside na criação de um ecossistema automatizado de controle de tráfego, no qual câmeras e sensores alimentam modelos de IA responsáveis por tomar decisões em tempo real, com segurança e rastreabilidade asseguradas pela tecnologia *blockchain*. Embora apresente ganhos expressivos em simulações quanto à fluidez do tráfego e à resposta adaptativa da rede viária, o estudo ainda se restringe ao ambiente simulado e não foi aplicado em condições urbanas reais. Além disso, desafios relacionados à escalabilidade, à confiabilidade dos modelos preditivos e à gestão ética dos dados permanecem sem solução.

Em síntese, observa-se uma evolução clara no campo da mobilidade urbana e das *smart cities*: de abordagens generalistas e estruturais, como a de Cunha et al. (2016), passando por soluções arquitetônicas com ênfase em *blockchain* (Nguyen et al., 2023), iniciativas orientadas à automação inteligente do tráfego urbano, exemplificadas por Jaramillo-Alcazar et al. (2023), e propostas centradas na sustentabilidade

gamificada, como a de [Ozpinar \(2023\)](#), até alcançar um modelo aplicado e validado experimentalmente. O presente trabalho propõe um avanço ao integrar essas dimensões em uma abordagem teórico-prática, por meio de um modelo descentralizado, implementado com *smart contracts*, testado com dados reais da *BNB Chain Testnet* e analisado por algoritmos de aprendizado de máquina para estimar o tempo de confirmação e o custo transacional. A combinação de métricas como latência, *throughput* e robustez a falhas reforça a viabilidade da solução em contextos operacionais. A adoção do método de Bruno Munari reafirma o caráter projetual e interdisciplinar da pesquisa, consolidando sua contribuição original para o avanço do estado da arte em mobilidade urbana descentralizada.

Capítulo 4

Metodologia

Este capítulo apresenta a metodologia adotada na pesquisa, cujo delineamento metodológico tem como objetivo promover a inovação na gestão de dados e serviços de transporte, com foco em confiabilidade, integração modal e descentralização da infraestrutura. A estrutura metodológica fundamenta-se em três eixos principais: (i) aplicação da abordagem de Bruno Munari para a decomposição e solução sistemática do problema; (ii) coleta e análise empírica de dados sobre mobilidade urbana; e (iii) simulação e validação de um modelo descentralizado em ambiente de *testnet*.

A primeira etapa consistiu na aplicação da metodologia proposta por Bruno Munari, reconhecida por sua abordagem lógica, sistemática e iterativa na resolução de problemas. O método foi utilizado para decompor o problema da mobilidade urbana em componentes funcionais e avaliar possíveis soluções com base em critérios objetivos.

Essa estrutura metodológica orientou a elaboração de protótipos e MVPs, os quais permitiram verificar a aderência da solução às necessidades identificadas. A aplicação do método favoreceu a construção de uma proposta tecnicamente viável e alinhada aos princípios de usabilidade, sustentabilidade e descentralização.

Na sequência, foram coletados dados empíricos sobre padrões de deslocamento urbano. Foram utilizados os dados da Pesquisa de Origem e Destino de Belo Horizonte, publicados por (Costa da, 2016). Para complementar essa base, aplicou-se um formulário a estudantes e professores de diferentes áreas do conhecimento, com o objetivo de comparar percepções, hábitos e preferências em relação à mobilidade urbana.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo das principais etapas metodológicas, seus objetivos e os recursos utilizados em cada fase da pesquisa.

Tabela 4.1: Resumo das etapas metodológicas da pesquisa

Etapa	Objetivo	Ferramentas/Recursos Utilizados
Aplicação do método de Bruno Munari	Estruturar o processo de desenvolvimento e validar protótipos	• Etapas do método (problema, observação, definição, hipóteses, verificação) • MVPs e protótipos iterativos
Coleta de dados empíricos	Obter informações sobre padrões de mobilidade urbana	• Pesquisa OD-BH Costa da (2016) • Formulário aplicado a estudantes e professores • Aplicativos com geolocalização
Análise dos dados	Identificar padrões de deslocamento e necessidades operacionais	• Tratamento e cruzamento de dados qualitativos e quantitativos • Extração de requisitos funcionais
Simulação e validação	Testar a viabilidade técnica e funcional do modelo proposto	• Ambientes de <i>testnet</i> • <i>Smart Contracts</i> • Métricas de desempenho: latência, custo (<i>gas</i>), escalabilidade

4.1 Abordagem Metodológica de Bruno Munari

Um método de projeto pautado pela simplicidade e pela experimentação criativa, articulando reflexões sobre a cidade, a relação entre luz e sombra, as transformações arquitetônicas, o tempo e o cotidiano urbano ([Munari, 1981](#)).

Sua contribuição para o design é marcada por uma abordagem inovadora e experimental. Foi um dos pioneiros a sustentar que o design não se limita à estética, mas também envolve funcionalidade, usabilidade e comunicação eficaz. Defendia a importância de simplificar, experimentar e criar soluções acessíveis e inteligentes. Além disso, concebeu objetos e instalações com materiais simples, a fim de investigar formas, cores e interações. Seu trabalho revolucionário no campo do design e da arte ainda exerce influência em diversas áreas criativas, é amplamente reconhecido por profissionais e estudiosos.

Contrariando a ideia de que o processo criativo segue uma trajetória linear, cartesiana e previsível, demonstrou que a criatividade emerge da experimentação, da tentativa e do erro. Sua abordagem

evidência como a capacidade de enxergar o mundo sob novas perspectivas permite atribuir significados originais a elementos aparentemente simples (Munari, 1981).

A Figura 4.1 apresenta o processo metodológico proposto por Bruno Munari, composto por 12 etapas estruturadas para orientar a construção de uma solução de design. Essa metodologia estabelece uma sequência lógica e progressiva de ações, com o objetivo de acumular conhecimento e desenvolver um processo coerente e completo, desde a identificação do problema até a formulação da solução final.



Figura 4.1: Processo Metodológico proposto Munari. Fonte: Munari (1981).

A adoção de sua metodologia neste trabalho desempenha papel central ao proporcionar uma estrutura sistemática, clara e iterativa para a resolução de problemas complexos relacionados à mobilidade urbana. Essa abordagem viabilizou a decomposição do problema em etapas analíticas, e permite a formulação e a validação de soluções condizentes com os contextos observados. Assim, a sua contribuição transcende o campo do design e consolida-se como um referencial metodológico para a elaboração de propostas inovadoras, sustentáveis e centradas no ser humano, em consonância com os objetivos desta pesquisa.

4.2 Estudo de caso: Aplicação do método de Bruno Munari para adaptação do processo

Ao aplicar os conceitos de análise, síntese e iteração, o trabalho buscou identificar os principais desafios da mobilidade urbana e avaliar o modelo proposto. A Figura 4.3 apresenta um comparativo da estrutura das etapas e das responsabilidades delineadas por Bruno Munari, adaptadas ao contexto desta pesquisa. Observa-se que algumas etapas foram tratadas de forma integrada, principalmente aquelas relacionadas à definição do problema, formulação da ideia e verificação preliminar. Tal integração foi necessária devido à natureza iterativa do processo de desenvolvimento, que exigiu constantes revisões conceituais e ajustes técnicos para garantir coerência entre a proposta teórica e sua aplicação prática. Essa abordagem permitiu maior agilidade e eficiência na construção do protótipo, sem comprometer a profundidade analítica ou o rigor metodológico adotado ao longo da pesquisa.

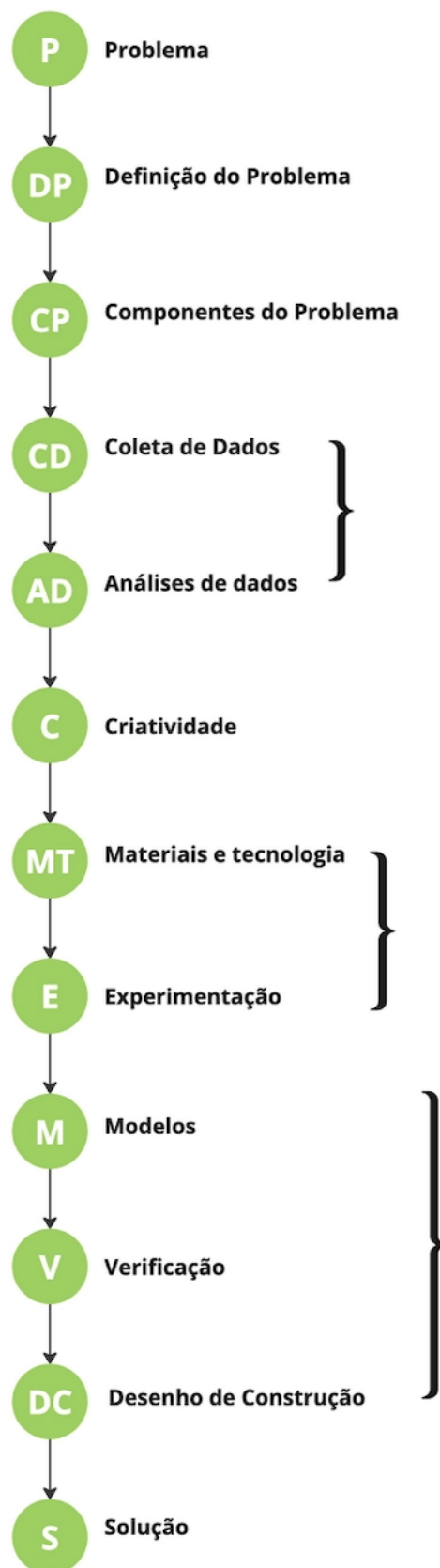


Figura 4.2: Etapas do método de Bruno Munari aplicadas ao processo de desenvolvimento do produto.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

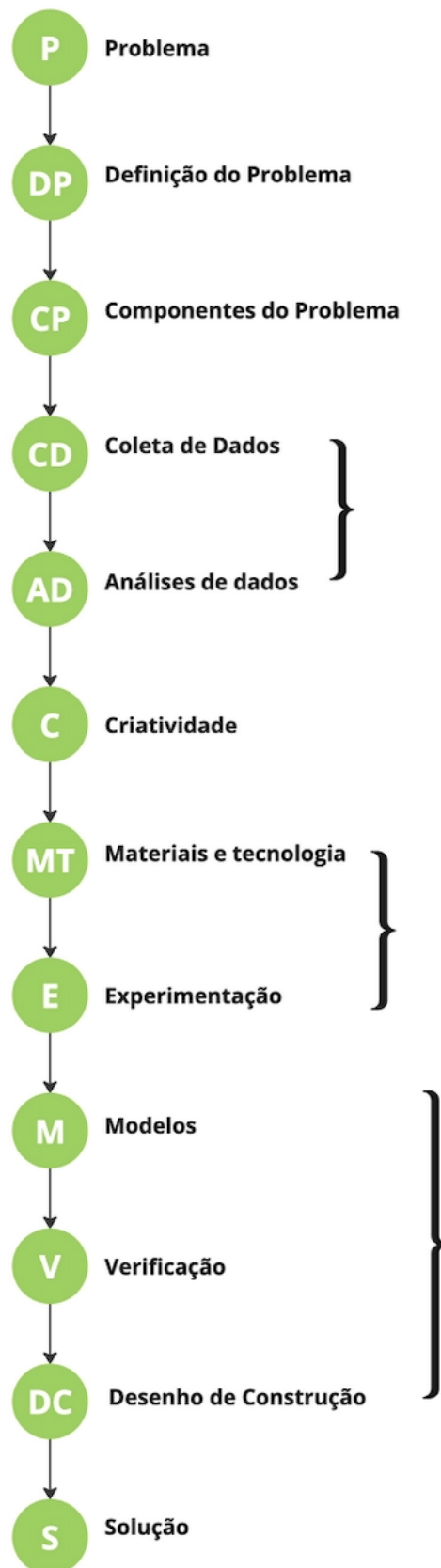


Figura 4.3: Etapas do método de Bruno Munari aplicadas ao processo de desenvolvimento do produto.
Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A seguir, apresenta-se a análise detalhada de cada uma das etapas que compõem a metodologia de Bruno Munari, adaptada neste trabalho para orientar a investigação dos desafios da mobilidade urbana. Essa adaptação permitiu estruturar o processo de forma lógica e progressiva, favorecendo a decomposição do problema, a identificação de suas causas estruturais e a construção fundamentada da proposta de solução.

4.2.1 Problema

Diante da complexidade observada, o problema foi estruturado em etapas analíticas, em conformidade com a metodologia de Bruno Munari, que enfatiza a importância de definir claramente o problema antes de propor qualquer solução. Para o autor, a etapa inicial do processo criativo que exige a identificação precisa da necessidade a ser enfrentada, com o reconhecimento de seus sinais e a reunião de todos os elementos que indicam a existência de uma questão a ser resolvida. Como afirma Munari, “surge uma necessidade, e existem vários indicadores de como resolver o problema” (Munari, 1981). Essa definição fundamentada do problema constitui a base sobre a qual todo o percurso metodológico deve se desenvolver.

Aplicando esse princípio ao contexto da mobilidade urbana, observou-se uma série de fatores críticos que sinalizam a urgência de intervenção: o crescimento desordenado das grandes cidades, a fragmentação dos sistemas de transporte, a ausência de integração entre modais, a sobrecarga da infraestrutura existente, a precariedade das políticas públicas voltadas ao setor e a escassez de incentivos à inovação e à sustentabilidade. Esses elementos, quando analisados de forma conjunta, revelam um cenário de ineficiência estrutural que compromete tanto a qualidade da mobilidade quanto a experiência cotidiana dos usuários.

Com base nessa análise, o problema foi devidamente delimitado: trata-se da **necessidade de melhoria na mobilidade urbana**, com ênfase na promoção da integração física, operacional e digital entre os diversos sistemas de transporte, bem como no fortalecimento de políticas públicas que viabilizem soluções eficazes, acessíveis e sustentáveis.

4.2.2 Definição do Problema

Nesta etapa, torna-se fundamental definir claramente os limites, objetivos e atividades que compõem a solução proposta (Munari, 1981). Para embasar o projeto, realizou-se uma revisão do estado da arte, identificando trabalhos relacionados à mobilidade urbana e aos fatores que afetam a eficiência dos sistemas de transporte.

Os congestionamentos urbanos constituem uma das principais externalidades negativas do transporte motorizado, o que aumenta os níveis de poluição e as emissões de gases de efeito estufa, o que impacta diretamente a saúde da população (Tomasiello et al., 2023). Além disso, níveis mais elevados de congestionamento associam-se a maior ocorrência de acidentes de trânsito e à superação da capacidade da infraestrutura viária, que resulta em lentidão e paralisação do fluxo. A distribuição desigual de

oportunidades e diferenças culturais também influencia a forma como a infraestrutura existente atende à população (Tomasiello et al., 2023).

Políticas de incentivo ao transporte ativo, como a implantação e a melhoria de infraestrutura cicloviária e de pedestres, podem levar à redução dos congestionamentos, de emissão de dióxido de carbono (CO₂) (Tomasiello et al., 2023).

Subsídios para melhorias na qualidade do transporte urbano ao avaliar o nível de satisfação dos usuários em relação ao sistema de transporte por ônibus contribuem para uma gestão mais eficiente e satisfatória. O conhecimento das atitudes e valores dos usuários permite identificar falhas e formular políticas para aprimorar o sistema de transporte coletivo (Antunes, Simões, 2013).

- **Lotação dos veículos:** A lotação excessiva gera maior insatisfação, especialmente nos horários de pico. A maioria dos usuários considera essencial que as empresas respeitem a lotação máxima.
- **Conforto nos veículos:** Nenhuma das cidades alcançou pontuação satisfatória para conforto.
- **Condições dos pontos de ônibus:** Embora a distribuição geográfica e o número de paradas sejam adequados, os abrigos apresentam qualidade insuficiente, provocando alta insatisfação.
- **Sistema de informação:** As informações disponíveis nos pontos de ônibus são precárias, limitando a percepção de eficiência do serviço.
- **Segurança em relação a roubos:** Os usuários percebem certa insegurança quanto a roubos, refletindo negativamente na avaliação do sistema, embora o tema esteja fora do escopo direto do transporte.
- **Confiabilidade:** O atributo de confiabilidade não alcançou nível médio de satisfação, indicando a necessidade de investigar fatores que influenciam essa percepção.

Definir os principais atributos de qualidade sob a perspectiva do usuário constitui ferramenta complementar para planejar e avaliar o transporte público coletivo, sendo essencial estabelecer padrões de serviço que atendam à maioria dos usuários (Antunes, Simões, 2013).

Diversas questões cotidianas relacionadas à mobilidade urbana comprometem a experiência dos usuários e a eficiência dos sistemas de transporte, evidenciando pontos críticos identificados que impactam diretamente essa experiência

- Poluição
- Acidentes de trânsito
- Infraestrutura Adequada
- Desigualdade no acesso ao transporte
- Falta de confiabilidade no serviço oferecido
- Falta de assertividade na escolha da locomoção
- Melhoria em Leis urbanas
- Falta de Integração entre os transportes oferecidos
- Planejamento Urbano
- Transporte público eficiente

Dentro dos itens destacados acima, foram selecionados aqueles que não poderiam entrar no escopo do trabalho proposto, uma vez que alguns foram retirados devido à dependência de órgãos governamentais ou por envolverem um escopo muito amplo, que poderia configurar um estudo independente.

- Congestionamento de Tráfego
- Poluição
- Acidentes de trânsito
- ~~Infraestrutura Adequada~~
- Desigualdade no acesso ao transporte
- Falta de confiabilidade no serviço oferecido
- Falta de assertividade na escolha da locomoção
- ~~Melhoria em Leis urbanas~~
- ~~Falta de Integração entre os transportes oferecidos~~
- ~~Planejamento Urbano~~
- ~~Transporte público eficiente~~

A razão pela qual certos itens não foram incluídos no escopo deste trabalho está relacionada à sua complexidade, à abrangência temática e à dificuldade de tratá-los dentro das limitações de tempo e recursos disponíveis para a pesquisa. Tais elementos demandam abordagens amplas ou estão vinculados a fatores externos à governabilidade direta da proposta, como políticas públicas estruturantes, alterações legislativas ou investimentos em infraestrutura física. Essas dimensões excedem a natureza prática e o foco específico do presente estudo, que se concentra na integração de sistemas de transporte a partir de soluções técnicas e acessíveis.

- **Acidentes de trânsito:** Embora representem uma preocupação relevante, sua redução depende de ações relacionadas a comportamento individual, fiscalização e políticas públicas de segurança viária, o que extrapola os limites operacionais do trabalho.
- **Infraestrutura adequada:** A requalificação da infraestrutura urbana exige investimentos de longo prazo e decisões institucionais em escala governamental, inviabilizando sua abordagem direta no presente projeto.
- **Melhoria em leis urbanas:** A elaboração ou alteração de legislações urbanísticas corresponde a um processo político-legislativo complexo, alheio à atuação técnica da pesquisa.
- **Falta de integração entre os transportes oferecidos:** Embora relevante, essa questão será considerada de forma indireta, por meio da proposição de um modelo de integração multimodal, sem pretensão de reformar os sistemas existentes. A proposta desenvolvida neste trabalho contribui com soluções tecnológicas voltadas à interoperabilidade e à comunicação entre plataformas, especialmente por meio da aplicação de conceitos relacionados à IoT. No entanto, a efetiva integração entre os modais de transporte demanda um esforço conjunto entre os operadores públicos e privados, requer articulação institucional, padronização de sistemas e comprometimento político, fatores que extrapolem a atuação técnica deste estudo.

- **Planejamento urbano e transporte público eficiente:** Ambas as temáticas envolvem fatores institucionais e urbanísticos amplos, cujas soluções exigem articulações intersetoriais e políticas de Estado, não compatíveis com o escopo metodológico delimitado neste estudo.

Dado esse panorama, foram selecionados os problemas que se alinham aos objetivos e à viabilidade técnica do presente estudo, o que possibilita o avanço para a etapa seguinte proposta por (Munari, 1981): a decomposição do problema em seus componentes. Essa etapa aprofunda a análise das partes que o compõem, com o objetivo de orientar a formulação de soluções eficazes e compatíveis com o contexto da mobilidade urbana identificado.

4.2.3 Componentes do problema

Neste estágio, o problema foi decomposto em partes menores (subproblemas) e, quando necessário, subdividido em categorias adicionais. Cada elemento foi analisado de forma individual, o que possibilitou a identificação de características comuns e a estruturação do problema em seus principais componentes, o que resultou em uma compreensão mais aprofundada de sua complexidade.

- Congestionamento de tráfego
- Poluição
- Desigualdade no acesso ao transporte
- Falta de confiabilidade no serviço oferecido
- Falta de assertividade na escolha da locomoção

A organização dos problemas em componentes específicos permitiu construir uma base estruturada para o desenvolvimento das próximas etapas da metodologia (Munari, 1981). Essa sistematização, contribui para o aprofundamento da análise ao facilitar a identificação de causas, relações e impactos de cada subproblema no sistema de mobilidade urbana. Ao reconhecer a interdependência entre os fatores destacados, torna-se possível delinear soluções mais precisas, viáveis e alinhadas aos objetivos propostos pela pesquisa, garantindo coerência metodológica no avanço do processo projetual.

4.2.4 Coleta de Dados e Análise de Dados

Na fase de compreensão do trabalho, a etapa de Coleta de Dados foi integrada às análises propostas por Munari (1981), que enfatiza a importância de reunir informações cruciais e pertinentes antes do início do processo de design de um produto. Essa fase contempla a investigação de dados quantitativos e qualitativos, a análise de padrões de comportamento, a observação de contextos reais de uso e a escuta ativa de diferentes atores sociais envolvidos. Além disso, inclui a identificação de soluções já implementadas em contextos semelhantes, a análise de projetos concorrentes e a avaliação de iniciativas que possam

oferecer referências ou aprendizados aplicáveis. O objetivo consiste em construir uma base empírica e teórica sólida, que fundamente as decisões futuras e assegure a aderência das propostas às necessidades reais dos usuários e à complexidade do problema. Para esta etapa, o foco foi direcionado aos seguintes pilares:

- Pesquisa de Campo
- Análise de Mercado
- Entrevistas e Pesquisas
- Testes e Experimentação

Foi desenvolvido um aplicativo *mobile* para a coleta de dados em tempo real. Com esse recurso, foi possível comparar os custos, avaliar a aceitação e testar a integração com uma plataforma distribuída na *blockchain*. O aplicativo também registrou informações relevantes durante as interações dos usuários, como custos ou problemas nos trajetos, o que contribuiu para a análise de desempenho e para a validação da eficiência do modelo descentralizado em comparação ao modelo centralizado.

Alguns estudos e projetos relacionados ao tema foram analisados, como o projeto de dois anos financiado pelo programa de pesquisa transnacional *Call 2014: Mobility and ITS*, promovido pela Conferência de Diretores Europeus de Estradas (*CEDR*) (Eckhardt et al., 2017). Esse projeto investigou os pré-requisitos para estruturar serviços de mobilidade centrados no usuário e com menor impacto ambiental, com o intuito de oferecer soluções flexíveis, eficientes e de fácil utilização, integrando diferentes modos de transporte sob o princípio de um balcão único. O estudo também examinou a possibilidade de combinar operações de transporte de passageiros e de carga.

O desenvolvimento do MaaS ainda se encontra em estágio inicial, o que dificulta previsões sobre sua consolidação. Fatores como cultura de serviços, avanços tecnológicos, metas ambientais e pressões por eficiência no setor público já promovem a cooperação e a expansão dos serviços. Ainda assim, o êxito dessas soluções depende da aceitação por parte de usuários e empresas. A viabilidade financeira de modelos baseados em *MaaS* permanece pouco comprovada, devido à recente implementação dos projetos-piloto. A adesão a esse tipo de serviço está condicionada à disposição dos usuários em alterar seus hábitos e experimentar soluções fundamentadas na economia compartilhada (Eckhardt et al., 2017).

No âmbito do projeto *Mobility as a Service for Linking Europe (MAASiFiE)*, foi elaborado um *framework* ou arcabouço de avaliação de impacto composto por 17 indicadores nos níveis individual, empresarial e social. Os estudos avaliados demonstraram impactos positivos, como mudanças modais, maior percepção de acessibilidade e transformação de atitudes. Contudo, também foram identificados conflitos, como o aumento do número de viagens. Esse crescimento pode beneficiar o usuário individualmente, mas, em contrapartida, intensificar os problemas sociais devido à elevação das emissões de poluentes e do congestionamento viário.

Foram analisados os dados mostrado na Figura 4.4 os quais mostra que, em Belo Horizonte, a queda no uso de ônibus e bicicletas para viagens urbanas destaca a falta de priorização de modos mais sustentáveis (Costa da, 2016). Entre 2002 e 2012, esses dados revelaram uma redução significativa: a participação de ônibus diminuiu de 43,49% para 23,28% e a de bicicletas caiu de 0,48% para 0,41%. Nesse mesmo período, o uso de carros particulares cresceu de 23,03% para 30,55%, em grande parte devido à migração de usuários do transporte coletivo para modos individuais. Isso resultou em congestionamentos frequentes em horários diversos na cidade. Além disso, o tempo médio gasto em viagens de ônibus aumentou consideravelmente, passando de 42 para 62 minutos entre as pesquisas. A falta de integração eficiente entre os modos de transporte contribui para a preferência pelo transporte individual, exacerbando os problemas de tráfego em várias partes da cidade.

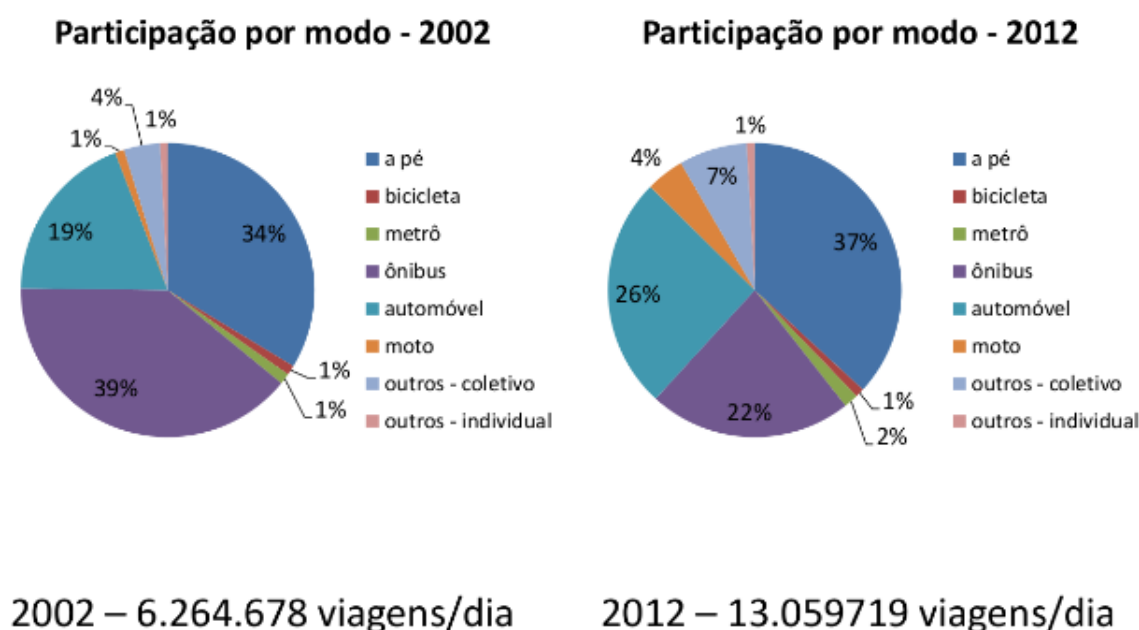


Figura 4.4: Comparação dos dados OD - BH 2002 á 2012. Fonte: (Costa da, 2016)

Todos os dados devem ser analisados, para se averiguar como foram resolvidos certos subproblemas. A análise de todos os dados recolhidos pode fornecer sugestões do que não se deve fazer (Munari, 1981).

Como parte do presente estudo, foi elaborado e distribuído um formulário de pesquisa voltado à coleta de percepções sobre a mobilidade urbana na cidade de Belo Horizonte. A amostragem abrangeu a comunidade universitária — incluindo estudantes, professores e servidores — além de moradores e indivíduos que circulam regularmente pela cidade. Essa etapa da pesquisa teve como propósito identificar os principais desafios enfrentados pelos usuários no deslocamento urbano. As informações obtidas foram analisadas com rigor acadêmico e utilizadas exclusivamente para fins científicos, com a preservação do anonimato dos participantes e a contribuição para o embasamento de propostas voltadas à melhoria da mobilidade urbana.

A pesquisa teve início com a pergunta "Você utiliza transporte público regularmente?", com o intuito de compreender o perfil de deslocamento dos participantes e identificar o grau de dependência dos usuários em relação ao transporte coletivo.

Os dados apresentados na Figura 4.5 indicam que 65% dos respondentes não utilizam o transporte público com frequência, enquanto apenas 35% declaram fazer uso regular desse serviço. Esse resultado revela uma baixa adesão ao transporte coletivo entre os participantes da pesquisa, que pode estar associada à percepção de ineficiência, falta de conforto, sensação de insegurança, cobertura limitada da malha viária e inadequação dos horários e trajetos disponíveis. Esses aspectos foram abordados nas perguntas subsequentes do formulário, com o objetivo de esclarecer as causas da baixa utilização e identificar oportunidades de melhoria na mobilidade urbana, com base em 120 respostas. A pesquisa foi inicialmente distribuída na universidade, podendo alcançar um público mais amplo caso os participantes a compartilhasse.

A pergunta "Qual é o principal meio de transporte que você utiliza no seu dia a dia?" teve como objetivo identificar o modal predominante entre os participantes, a fim de avaliar a dependência dos diferentes meios de transporte — como carro particular, ônibus, metrô, bicicleta ou caminhada.

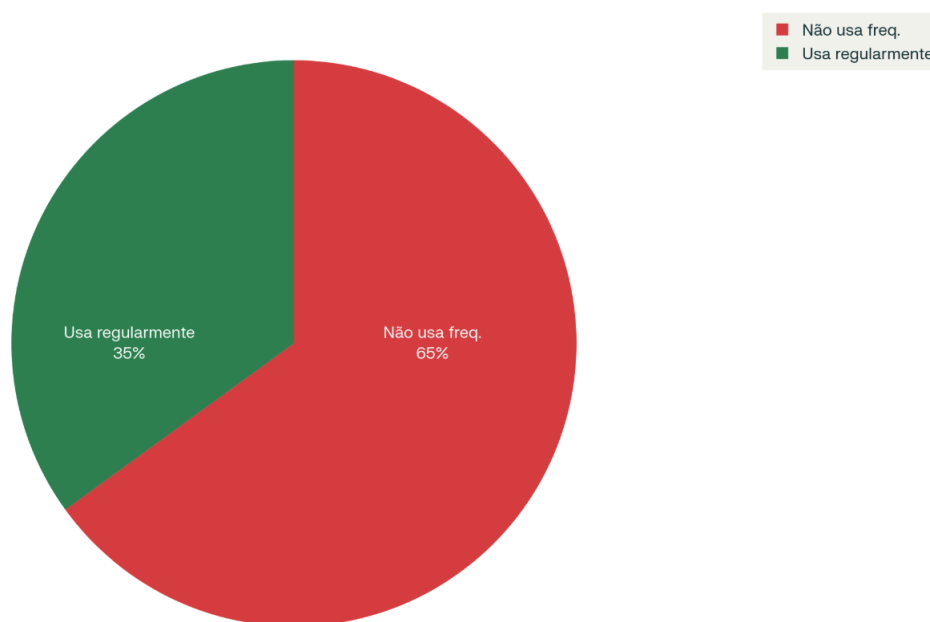


Figura 4.5: Análise Comparativa dos Resultados de Pesquisa sobre o Uso do Transporte Público em Belo Horizonte. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Com base nos resultados apresentados na Figura 4.6, observa-se uma clara predominância do veículo próprio como meio de transporte diário, com 56,7% dos participantes optando por essa modalidade. Esse dado reflete uma forte dependência do transporte individual. Em seguida, o ônibus aparece como o principal meio de transporte entre os que não possuem veículo próprio, com 24,2% dos respondentes que indicam essa opção. Isso revela uma utilização considerável do transporte público, mas também evidencia a necessidade de melhorias em termos de eficiência e qualidade para atrair mais usuários.

Os aplicativos de transporte (Uber, 99, etc.) foram apontados por 11,7% dos participantes, o que demonstra uma adesão crescente a essa forma de mobilidade, especialmente em situações que exigem maior flexibilidade ou quando o transporte público se mostra inadequado. O metrô é utilizado por apenas 2,5%, o que revela uma participação ainda limitada, possivelmente em razão da cobertura restrita desse modal. Por fim, 5% dos participantes indicaram a caminhada como principal meio de transporte, sugerindo que, embora válida para trajetos curtos ou regiões acessíveis, essa opção ainda é menos comum entre os respondentes.

Esses dados revelam uma dependência significativa do transporte privado, o que aponta para desafios relacionados ao trânsito, congestionamentos e impactos ambientais. Ao mesmo tempo, a utilização de transportes públicos e por aplicativo revela oportunidades de aprimoramento na oferta desses serviços, por meio da ampliação de opções, do aumento da confiabilidade e da redução de custos, com vistas a uma mobilidade urbana mais eficiente e sustentável.

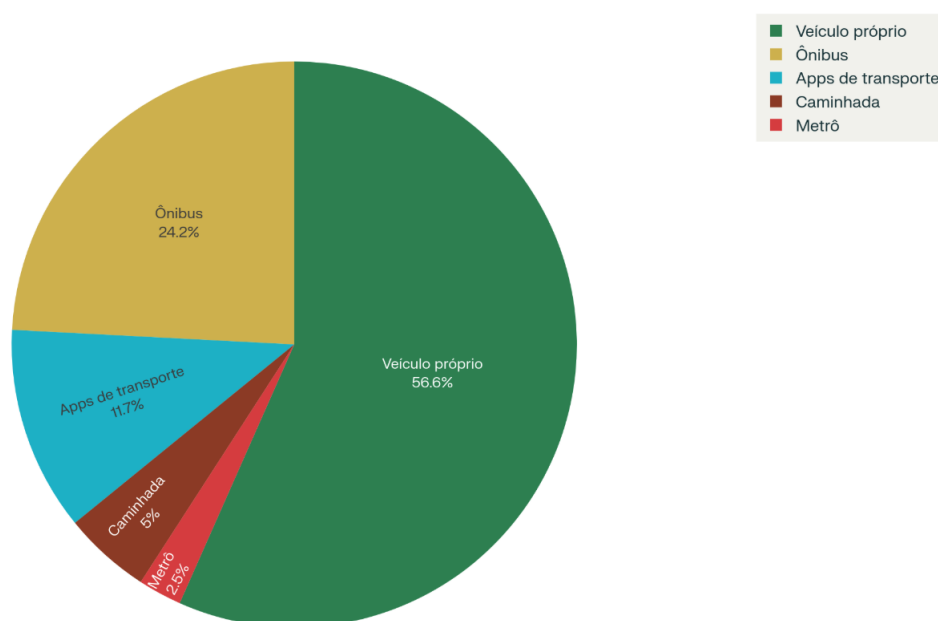


Figura 4.6: Análise Comparativa dos principais meios de transporte utilizados no dia a dia. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A Figura 4.3 apresenta os dados sobre o tempo médio que os participantes gastam no trânsito diariamente, com o intuito de compreender o impacto dos deslocamentos e identificar padrões relacionados à duração das viagens.

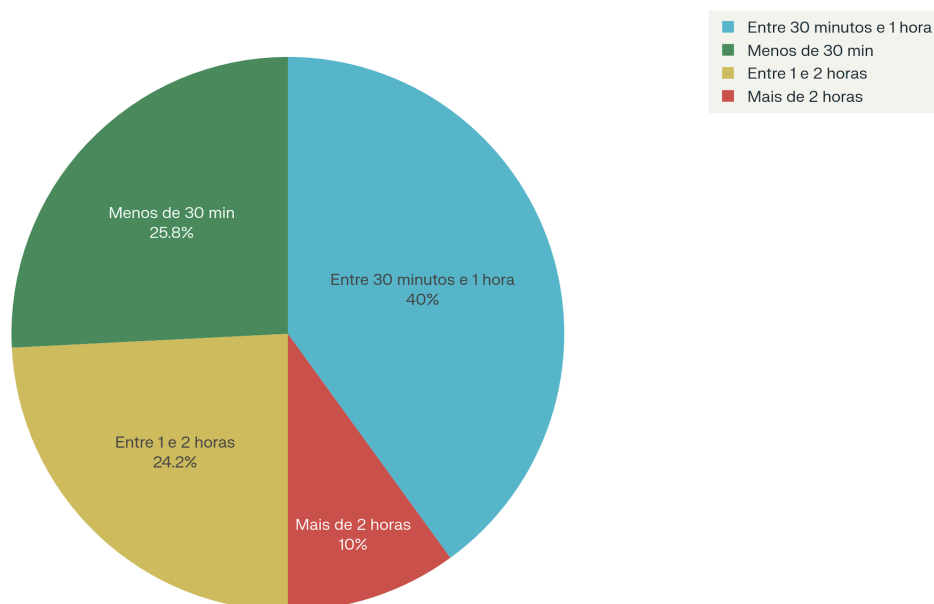


Figura 4.7: Comparativo dos Tempos de Trajeto na Cidade de Belo Horizonte. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Com base nos dados levantados, observa-se que a maioria dos deslocamentos diários ocorre em trajetos de média duração. Cerca de 40% dos usuários levam entre 30 minutos e 1 hora para se deslocar, seguidos por 24,2% que gastam entre 1 e 2 horas — o que indica que uma parcela significativa da população enfrenta tempos consideráveis de viagem. Por outro lado, 25,8% realizam seus trajetos em menos de 30

minutos, o que evidencia que parte dos participantes ainda consegue acessar suas atividades cotidianas com relativa agilidade. Entretanto, o dado mais preocupante é que 10% dos respondentes gastam mais de 2 horas em deslocamento, o que aponta para situações de extrema ineficiência e possível exclusão espacial.

A percepção da população em relação ao trânsito de Belo Horizonte, apresentada na Figura 4.8, revela um cenário majoritariamente negativo. Para 39,8% dos respondentes, o trânsito é considerado ruim, enquanto 35,6% o classificam como regular — o que sugere um nível elevado de insatisfação ou, no mínimo, resignação diante das condições atuais. Um dado ainda mais alarmante é que 19,5% avaliam o trânsito como muito ruim, reforçando a percepção de um sistema viário sobrecarregado, ineficiente ou mal planejado. Apenas 5,1% consideram o trânsito bom, representando uma minoria pouco expressiva.

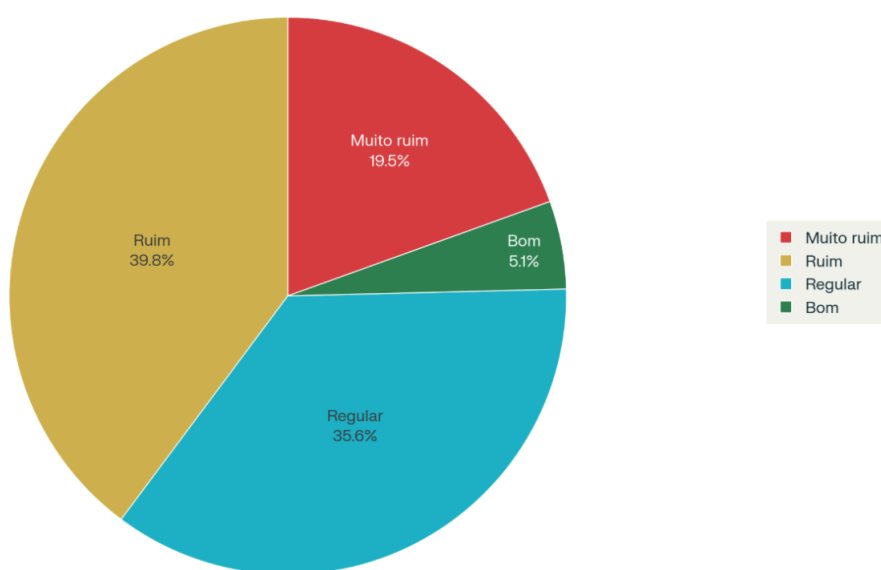


Figura 4.8: Avaliação dos Usuários sobre as Condições do Trânsito em Belo Horizonte. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Os dados coletados e apresentados na Figura 4.9 revelam que a superlotação é, disparadamente, o problema mais apontado pelos usuários do transporte público em Belo Horizonte, mencionada por 87,2% dos respondentes. Esse número expressivo demonstra uma sobrecarga no sistema e o desconforto diário enfrentado pela maioria dos passageiros. Em seguida, aparecem os atrasos frequentes (42,7%) e as condições dos veículos, como limpeza e manutenção (41,9%), o que indica deficiências tanto na pontualidade quanto na qualidade da frota. A falta de segurança também preocupa uma parte significativa dos usuários, citada por 23,9%, enquanto 29,9% destacam a ausência de integração com outros meios de transporte, dificultando a fluidez das viagens multimodais.

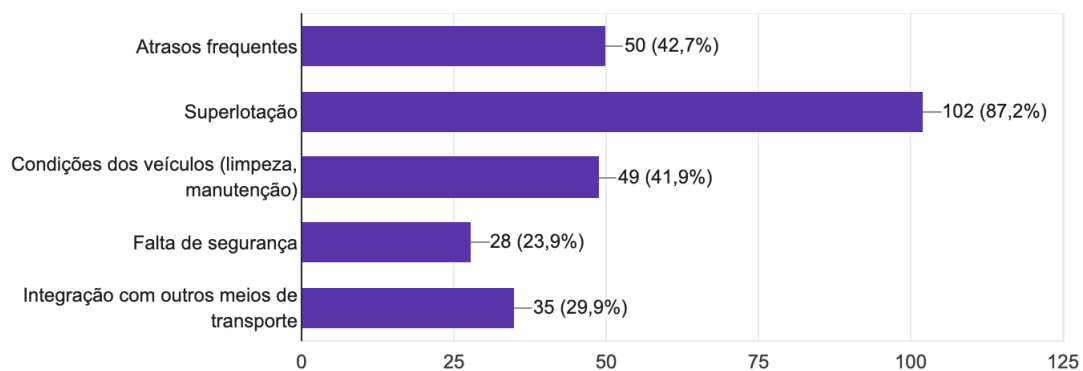


Figura 4.9: Avaliação dos principais problemas que você percebe no transporte público Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Em seguida, a Figura 4.10 demonstra que a segurança nas vias é o fator mais relevante para incentivar a adoção de meios de transporte mais sustentáveis, apontado por 39% dos respondentes. Isso indica que, mais do que infraestrutura física, os usuários priorizam sentir-se seguros ao transitar pelas ruas, especialmente quando se trata de caminhar ou utilizar bicicletas. Em seguida, 29,7% mencionaram a necessidade de uma melhor infraestrutura para pedestres, como calçadas adequadas e acessíveis, enquanto 26,3% destacaram a importância de ciclovias bem estruturadas, o que evidencia a demanda por um ambiente urbano mais adaptado à mobilidade ativa. Apenas 5,1% dos participantes citaram campanhas educativas como fator motivador, o que sugere que ações de conscientização, embora importantes, têm impacto limitado caso não estejam acompanhadas de melhorias práticas na cidade.

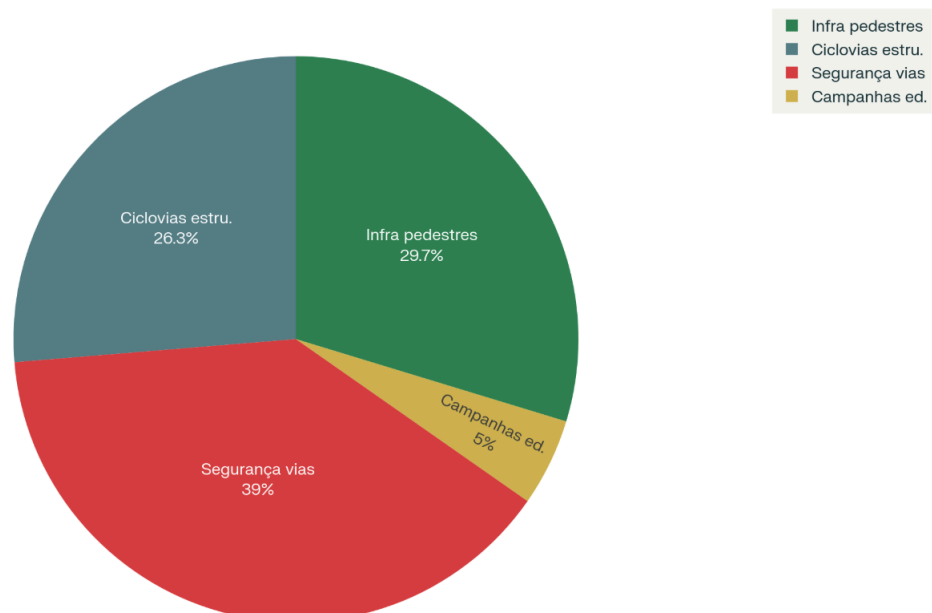


Figura 4.10: Avaliação de Iniciativas para a Promoção de Meios de Transporte Mais Sustentáveis. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Por fim, o formulário de pesquisa teve como objetivo avaliar o nível de conhecimento dos entrevistados sobre os conceitos de *Smart City* e MaaS. Conforme ilustrado na Figura 4.11, apenas 36,7% dos participantes afirmaram conhecer o termo *Smart City*, enquanto a maioria, 63,3%, declarou não ter familiaridade com o conceito. Esse cenário torna-se ainda mais evidente na Figura 4.12, em que apenas 22,5% dos respondentes afirmaram conhecer o termo MaaS, contrastando com os 77,5% que relataram desconhecê-lo.

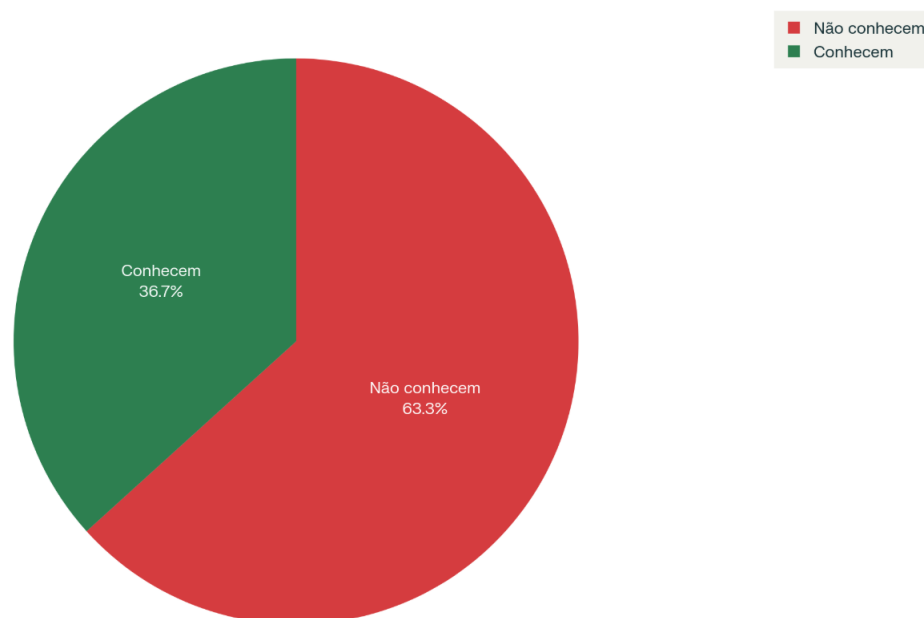


Figura 4.11: Familiaridade com o Conceito de *Smart City* entre os Respondentes. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

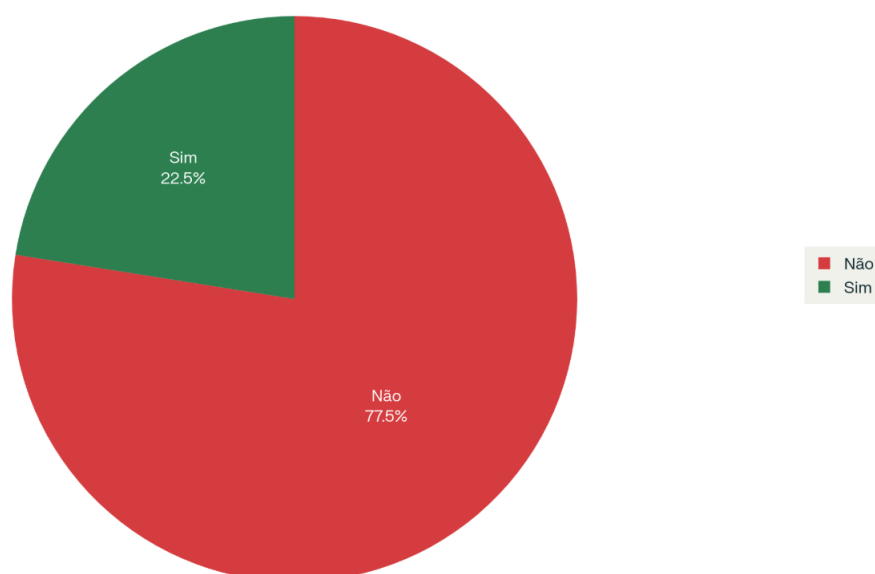


Figura 4.12: Conhecimento sobre o Conceito de MaaS

Como se pode observar, os resultados obtidos na pesquisa de campo sobre mobilidade urbana se

aproximam significativamente das conclusões apresentadas por Costa da (2016), que também evidenciam a predominância dos veículos individuais. Esse cenário representa uma das situações mais desfavoráveis para a mobilidade urbana, pois revela a concentração do uso de transportes menos sustentáveis, contrariando os princípios de uma distribuição mais eficiente e equilibrada dos serviços de mobilidade. Além dos resultados apresentados, observa-se também uma limitada difusão do conhecimento sobre os conceitos de MaaS e *Smart City*, especialmente quando comparados aos dados de Cunha et al. (2016), os quais evidenciam a importância crescente das cidades inteligentes como resposta aos desafios urbanos contemporâneos — como mobilidade, sustentabilidade, inclusão digital e qualidade de vida — e reforçam a expectativa de transformação guiada pela tecnologia e pela participação cidadã.

Entretanto, os dados levantados na pesquisa de campo indicam que, apesar do avanço tecnológico e da alta conectividade digital no Brasil, ainda há um desconhecimento considerável da população em relação a iniciativas de cidades inteligentes e aos serviços integrados de mobilidade. Esse contraste revela um descompasso entre o potencial tecnológico disponível e sua apropriação prática pela sociedade, o que representa uma barreira significativa à implementação efetiva de soluções inovadoras no contexto urbano.

4.2.5 Criatividade

Neste estágio do trabalho, o contexto, as restrições e os objetivos do desafio proposto já estão claramente definidos. O foco recai sobre a geração de ideias, a ampliação das possibilidades e a concepção de soluções adequadas ao problema identificado. Embora haja espaço para a liberdade criativa, a criatividade não se manifesta de forma arbitrária ou improvisada. Ela exige uma conexão direta com o problema e com as informações coletadas nas etapas anteriores, caracterizando-se como uma criatividade orientada por método, e não por inspiração aleatória (Munari, 1981).

Entre as soluções encontradas para problemas de mobilidade urbana, destaca-se a análise do modelo descentralizado proporcionado pela *Web 3.0*. Essa abordagem traz alternativas inovadoras ao colocar o usuário no centro do processo e aumentar a autonomia nas soluções digitais, contribuindo decisivamente para superar limitações oriundas dos modelos convencionais.

Enquanto a **Web 1.0** e a **Web 2.0** são consideradas *Webs Sintáticas*, fundamentadas em palavras literais e na estrutura tradicional de documentos, a **Web 3.0** também chamada de Web Semântica ou Web Descentralizada, representa uma mudança de paradigma significativa. E enquanto as gerações anteriores eram baseadas na apresentação e compartilhamento do conteúdo, a Web 3.0 baseia-se no significado e na interpretação contextual da informação (Koo, 2011).

A Tabela 4.2.5 apresenta uma síntese comparativa entre as três principais gerações da Web — Web 1.0, Web 2.0 e Web 3.0 — com base em suas características técnicas e comportamentais.

Aspecto	Web 1.0	Web 2.0	Web 3.0
Arquitetura	Centralizada	Centralizada com interação social	Descentralizada
Conteúdo	Produzido por empresas	Produzido por usuários	Produzido e validado por usuários e máquinas
Tecnologias chave	HTML estático, HTTP	AJAX, APIs, redes sociais	Blockchain, IA, Web Semântica
Controle de dados	Em servidores de empresas	Compartilhado entre plataformas	Em posse do usuário (data ownership)
Exemplos	Sites institucionais, portais	YouTube, Facebook, Twitter	IPFS, Ethereum, DApps
Valor para o usuário	Acesso à informação	Participação e interação	Propriedade e autonomia

A Web 1.0 foi a primeira geração da internet, caracterizada por páginas estáticas, conteúdo produzido por empresas e pouca ou nenhuma interatividade. O usuário era basicamente um consumi-

dor passivo da informação disponibilizada. Os sites funcionavam como vitrines digitais, com estrutura centralizada e foco na leitura de conteúdo.

Com a chegada da Web 2.0, a internet tornou-se mais dinâmica e colaborativa. O conteúdo passou a ser gerado principalmente pelos próprios usuários, com o crescimento de blogs, redes sociais, fóruns e plataformas de vídeo. A arquitetura continuava centralizada, mas a ênfase estava na interação, participação ativa e no compartilhamento de informações.

Já a Web 3.0, representa uma nova etapa em que o foco está na interpretação do significado dos dados, na autonomia dos usuários e na descentralização das aplicações, muitas vezes com o uso de blockchain, inteligência artificial e contratos inteligentes (Koo, 2011). Nessa fase, o usuário deixa de ser apenas colaborador e passa a ter maior controle sobre seus dados e identidade digital. As aplicações tendem a ser mais inteligentes, seguras e personalizadas.

Além disso, com o avanço das ferramentas semânticas, há um impacto direto na ciência de serviços, promovendo novos modelos de colaboração online, a valorização dos serviços digitais e o crescimento do aprendizado autônomo e adaptativo. Essa abordagem, redefine a troca de conhecimento, incentivando a criação de soluções inovadoras tanto para a economia quanto para a educação online (Koo, 2011).

Com base nesse cenário, o trabalho propõe uma abordagem de um modelo descentralizado com base na Web 3.0 que beneficia tanto os usuários quanto os provedores, oferecendo vantagens para ambas as partes envolvidas, conforme ilustrado na Figura 4.13.

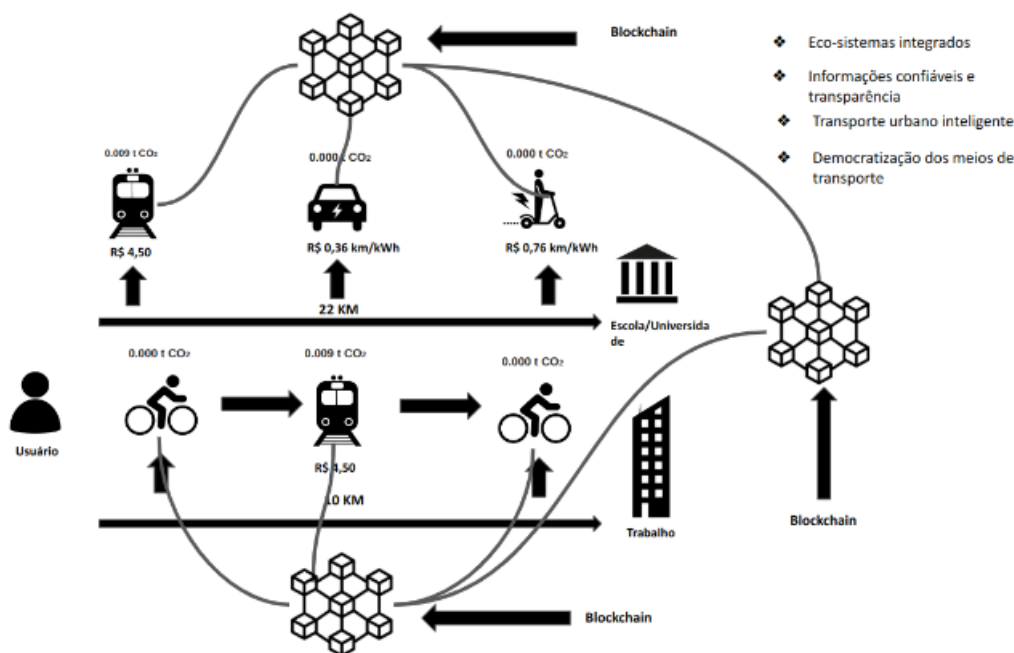


Figura 4.13: Proposta de um modelo de serviço digital descentralizado. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A proposta concentra-se na reintegração dos usuários a ecossistemas mais integrados, com o objetivo de garantir maior confiabilidade, por meio da adoção do uso de um banco de dados público e auditável. Além disso, aplica um modelo mais inteligente, que utiliza dados públicos para a comparação de tempo de deslocamento e custos monetários associados à viagem. Em determinados contextos, uma integração mais profunda permite a medição da sustentabilidade proporcionada pelo serviço. Por fim, a solução oferece uma ferramenta que estimula a exploração de novas alternativas de meios de transporte.

4.2.6 Materiais, Tecnologia e Experimentação

Destaca-se a importância da experimentação como um processo fundamental na criação artística. A interação com diversos materiais e ferramentas não deve ser encarada como um simples meio para alcançar um resultado final, mas como uma parte essencial da descoberta e da inovação. A experimentação permite que o criador explore possibilidades que emergem a partir de erros e do improviso, e transforma o inesperado em oportunidades criativas (Munari, 1981).

As ferramentas, longe de constituírem meros recursos técnicos predefinidos, devem ser vistas como extensões da criatividade, pois abrem espaço para o surgimento natural de novas formas e soluções ao longo do processo. Esse princípio se concretizou na elaboração de uma arquitetura que demonstrou como a experimentação guiou o desenvolvimento e a adaptação das soluções propostas.

A arquitetura de alto nível utilizada neste trabalho, mostrada na Figura 4.14, destaca um aplicativo *mobile* desenvolvido com a tecnologia *Flutter* Google (2024c), uma ferramenta de código aberto criada pelo *Google* para o desenvolvimento de aplicações multiplataforma. Embora voltado principalmente para dispositivos móveis (*Android* e *iOS*), o *Flutter* também oferece suporte para *desktop* (*Windows*, *macOS*, *Linux*) e *web*. Seu principal objetivo consiste em permitir a escrita de um único *código-fonte*, com uso da linguagem *Dart*, que viabiliza a execução do aplicativo em diferentes sistemas operacionais. Essa abordagem reduz de forma significativa o tempo e o custo de desenvolvimento, o que a torna uma solução adequada para aplicações em dispositivos móveis.

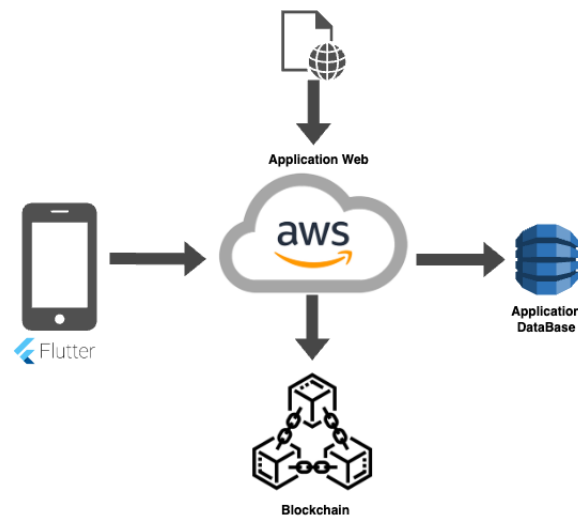


Figura 4.14: Visão Geral da Arquitetura. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O aplicativo desenvolvido em *Flutter* atua como *interface* principal para o usuário, coleta dados de *geolocalização em tempo real* e permite o monitoramento do percurso. Além disso, exibe informações detalhadas sobre os valores das corridas, avaliações de serviço e tempo estimado para a conclusão do trajeto, o que proporciona uma experiência informada e transparente. O aplicativo também fornece atualizações ao longo do percurso e disponibiliza um histórico de viagens, o que aumenta a segurança e a conveniência para o usuário.

A arquitetura desta pesquisa utiliza os serviços sob demanda da Amazon Web Services (**AWS**) como infraestrutura subjacente. A AWS constitui uma plataforma de *cloud computing* amplamente utilizada, que disponibiliza uma variedade de serviços escaláveis e de alto desempenho.

A solução desenvolvida para o trabalho inclui aplicações responsáveis pelo gerenciamento de *smart contracts* e dados transacionais. Essa abordagem proporciona uma visão administrativa detalhada e abrangente, conforme ilustrado na Figura 4.15.

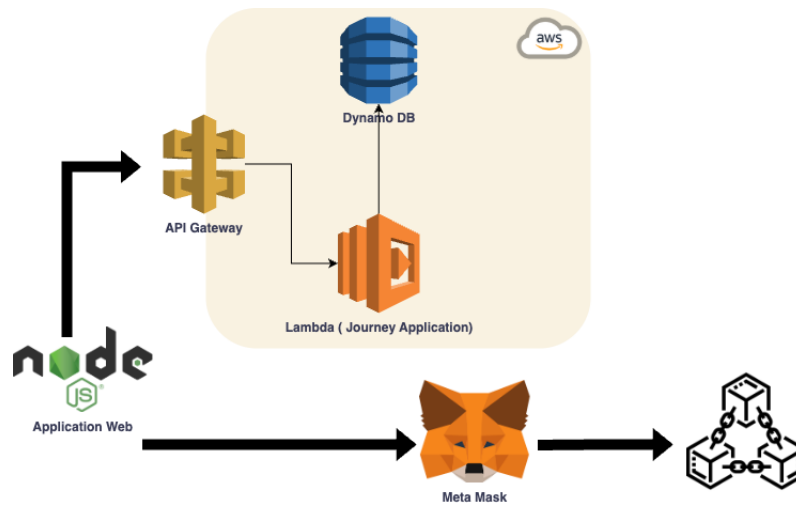


Figura 4.15: Arquitetura de integração entre a aplicação web e a blockchain e utilização dos serviços AWS. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O *API Gateway* [Amazon Web Services \(2024b\)](#) atua como um ponto de entrada centralizado para a *web application* acessar os serviços de *backend*. Ele permite a criação, exposição e gerenciamento de *APIs RESTful* de forma segura e escalável. As *APIs RESTful* seguem o estilo arquitetural Representational State Transfer (**REST**), que define um conjunto de princípios e restrições para a comunicação entre sistemas distribuídos, geralmente por meio do protocolo *Hypertext Transfer Protocol (HTTP)*, utilizando métodos como *GET*, *POST*, *PUT* e *DELETE*. Além de direcionar o tráfego de entrada, o *API Gateway* também aplica políticas de autenticação e autorização, controla limites de acesso e transforma mensagens, quando necessário. Uma de suas principais funções é a integração direta com o *AWS Lambda* [Amazon Web Services \(2024a\)](#), que viabiliza o processamento de requisições sem depender de servidores dedicados.

O *AWS Lambda* é um serviço de computação *serverless* que executa trechos de código em resposta a eventos específicos, como interações com *APIs* ou alterações nos dados. No contexto deste trabalho, o *Lambda* processa eventos relacionados a operações com *smart contracts*, como a criação ou atualização de informações na *blockchain*. Por ser *serverless*, elimina a necessidade de provisionamento e gerenciamento de infraestrutura, o que garante alta escalabilidade, disponibilidade e otimização de custos.

Além de processar os eventos, o *Lambda* também é responsável por registrar os dados transacionais retornados da plataforma *blockchain*. Esses dados são armazenados no *Amazon DynamoDB*, que atua como a solução de persistência da arquitetura. O *DynamoDB* é um banco de dados *NoSQL* gerenciado que oferece alta escalabilidade, baixa latência e alta disponibilidade. Essas características o tornam especialmente adequado para o armazenamento eficiente de grandes volumes de dados não relacionais ([Amazon Web Services, 2024c](#)).

A aplicação *web* desenvolvida neste trabalho utiliza *Node.js* como plataforma para executar *JavaScript*, possibilitando a construção de páginas dinâmicas e a manipulação de dados antes do envio ao navegador ([Tilkov, Vinoski, 2010](#)). Essa abordagem permite o uso da mesma linguagem tanto no servidor quanto no cliente. No contexto da **dApp**, o *Node.js* integra-se à *MetaMask*, uma carteira digital baseada em navegador que viabiliza a interação direta dos usuários com a *blockchain*.

Uma *dApp* é um tipo de aplicação que utiliza *smart contracts* e *blockchain* como base para o processamento e o armazenamento de dados, no qual elimina a necessidade de uma entidade central de controle, como servidores tradicionais ou empresas proprietárias. Ao contrário das aplicações centralizadas, nas quais os dados e regras de negócio ficam sob responsabilidade de um único servidor ou organização, uma *dApp* é executada de forma distribuída e confiável entre os participantes da rede ([Metcalfe, others, 2020](#)).

Por meio da *dApp*, a aplicação consegue se conectar à *MetaMask* para enviar transações e consultar dados de *smart contracts*, garantindo que todas as operações sejam autorizadas pelo próprio usuário de forma segura e transparente. Para viabilizar essa integração, foram utilizadas as bibliotecas *Web3.js* e *Ethers.js*, que fornecem abstrações e utilitários para conectar-se à *blockchain Ethereum*, manipular contratos inteligentes e formatar dados transacionais. Enquanto a *Web3.js* foi empregada principalmente para interações diretas com os contratos no *frontend*, a *Ethers.js* ofereceu recursos mais leves e seguros para assinar transações e ler dados da *blockchain* de forma eficiente. Essa combinação de ferramentas viabilizou a construção de uma aplicação descentralizada com uma camada de integração *blockchain* eficaz e uma experiência de uso fluida e segura.

Na definição do *smart contract* utilizado no trabalho, conforme ilustrado na Figura 4.16, alguns dos requisitos mais importantes incluem a garantia do sigilo de informações confidenciais e a proteção de dados pessoais, em conformidade com a ([Presidência da República, 2018](#)). Como a *blockchain* constitui uma base pública, torna-se fundamental a adoção de medidas que assegurem a privacidade dos dados sensíveis, impedindo sua exposição indevida. Além disso, o *smart contract* deve ser projetado para armazenar informações de geolocalização dos usuários sem permitir sua identificação direta. Esse cuidado é essencial para assegurar que a coleta e o processamento de dados ocorram de maneira segura e ética, ao

mesmo tempo em que preserva a privacidade dos indivíduos e viabiliza a análise de padrões de mobilidade urbana.

```
contract JourneyDataBase {  
  
    struct Location {  
        int32 lat;  
        int32 lon;  
    }  
  
    event JourneyAdded(  
        address indexed user,  
        uint256 journeyId,  
        uint256 start,  
        uint256 end,  
        uint256 totalAmount  
    );  
  
    struct JourneyInfo {  
        uint256 journeyId;  
        uint256 start;  
        uint256 end;  
        Location[] locations;  
        string provider;  
        uint256 totalAmount;  
        string userIdentity;  
    }  
}
```

Figura 4.16: Exibição do smart contract utilizado para gerenciamento de informações de mobilidade urbana, destacando os principais atributos e funções. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O contrato inclui duas estruturas principais: *JourneyInfo* e *UserInfo*. A estrutura *JourneyInfo* armazena informações detalhadas sobre cada jornada, tais como os horários de início e término (*start* e *end*), o provedor do serviço de transporte (*provider*), como *Uber*, ônibus, metrô, entre outros, o valor total da transação (*totalAmount*), quando disponível, e os dados de geolocalização de latitude e longitude da jornada (*lat*, *lon*).

Entretanto, para atender aos requisitos de privacidade, foi utilizado no campo *userIdentity* um Universally Unique Identifier (**UUID**), um identificador de 128 bits projetado para garantir unicidade no espaço e no tempo. Esse padrão foi inicialmente empregado no *Apollo Network Computing System* e, posteriormente, no ambiente de computação distribuída da Open Software Foundation (**OSF**) e nas plataformas *Microsoft Windows* (Leach et al., 2005).

Após a definição do *Smart Contract*, foi realizado o *deploy* com a ferramenta *Remix IDE* **Remix Project** (2024), conectada à *Binance Smart Chain Testnet*. Essa ferramenta oferece um ambiente integrado de desenvolvimento no qual é possível escrever, compilar e testar contratos em *Solidity*, a linguagem de programação mais utilizada na *Ethereum*. Além disso, a plataforma oferece interações diretas com a rede, o que viabiliza a implantação de contratos diretamente na *blockchain*, assim como a depuração e a análise de código, a fim de garantir a integridade e a segurança dos contratos.

Para isso, utilizou-se uma *Faucet*, que fornece pequenas quantidades de *Binance Coin* (**BNB**) de teste — uma criptomoeda fictícia — e viabiliza a execução de transações sem custos reais. A rede *testnet* da *Binance* simula o ambiente da rede principal (*mainnet*) e constitui uma alternativa ideal para testes e validações de contratos inteligentes em um contexto seguro e gratuito. Além disso, o contrato implantado pode ser verificado publicamente por meio da *BscScan Testnet*, disponível em **BscScan** (2024), conforme ilustrado na Figura 4.17, o que assegura a transparência e a rastreabilidade das interações executadas ao longo do desenvolvimento.

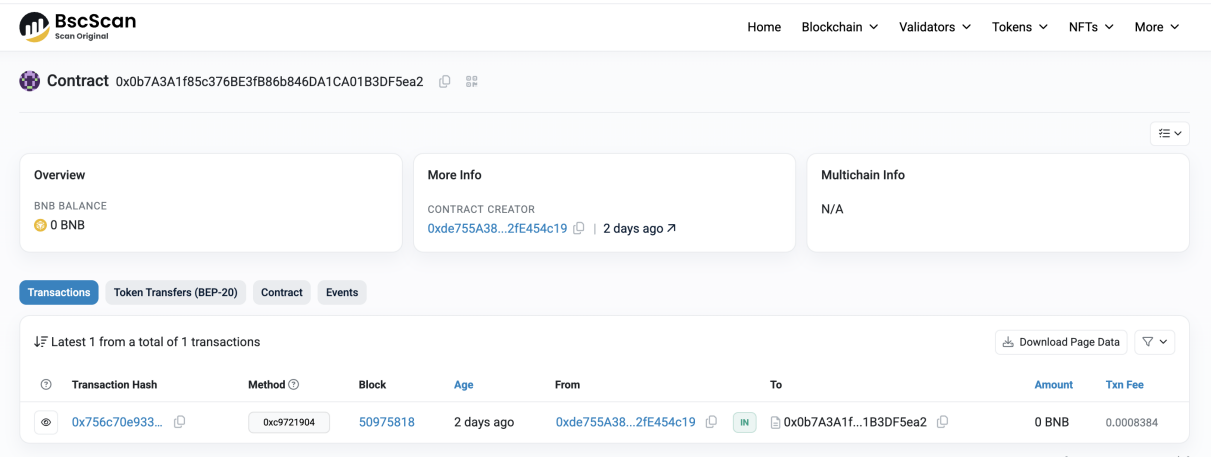


Figura 4.17: Deploy do Smart Contract na Binance Smart Chain Testnet. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A partir da análise da transação por meio da *BscScan Testnet*, foram obtidas informações relevantes quanto ao desempenho e à viabilidade do *Smart Contract*. Dentre os dados disponibilizados, destaca-se o tempo de confirmação, que representa o intervalo entre o envio da transação à rede e sua efetiva inclusão em um bloco validado. Ademais, o painel fornece o consumo de *gas* estimado, expresso em **BNB**, possibilitando a projeção do custo da operação em ambiente de produção. Embora os valores na *testnet* não envolvam ativos reais, a estrutura de validação e cobrança de *gas* reflete as condições da *mainnet*, permitindo inferências precisas acerca do custo em dólar da transação, com base na cotação

vigente da criptomoeda. Esses dados reforçam a importância do ambiente de testes para avaliações preliminares de desempenho, escalabilidade e sustentabilidade econômica da aplicação descentralizada.

É possível visualizar todas as transações realizadas, as chamadas de funções, os valores transferidos e os endereços envolvidos, conforme mostra na Figura 4.18. Essas informações correspondem às transações vinculadas ao *Smart Contract* implantado e estão registradas na *Binance Smart Chain Testnet*, acessíveis por meio da interface do *BscScan*.

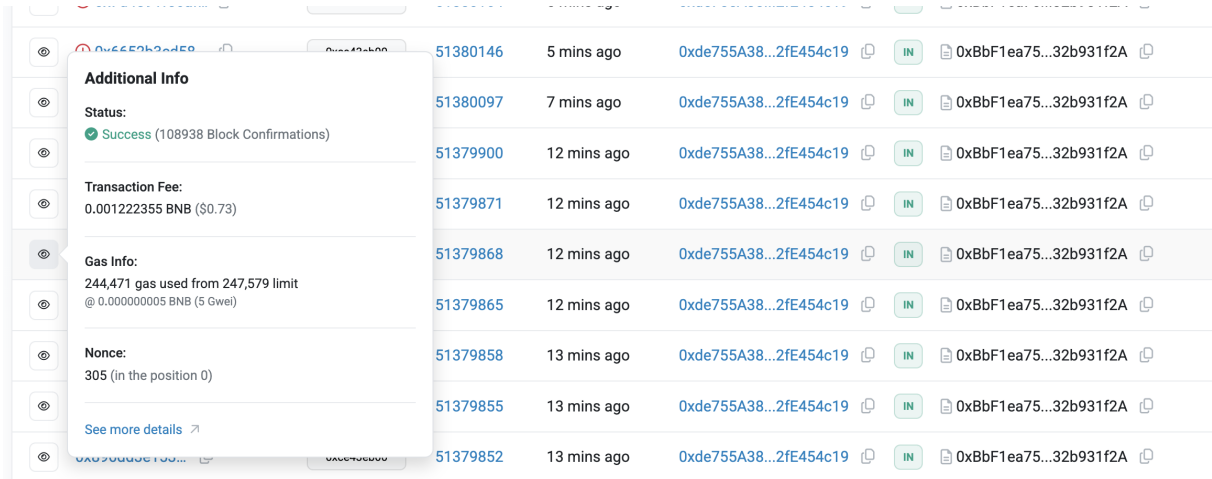


Figura 4.18: Visualização das transações associadas ao Smart Contract registradas na Binance Smart Chain Testnet por meio da interface do BscScan. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Após o *deploy* do contrato, é possível visualizar em detalhes cada transação executada, bem como os eventos emitidos, os dados registrados e os endereços envolvidos. Essas informações são essenciais para fins de auditoria, validação do comportamento do *smart contract* e garantia de transparência no processamento dos dados, conforme ilustrado na Figura 4.19. Os dados técnicos registrados para uma transação realizada no contrato inteligente implantado são descritos a seguir:

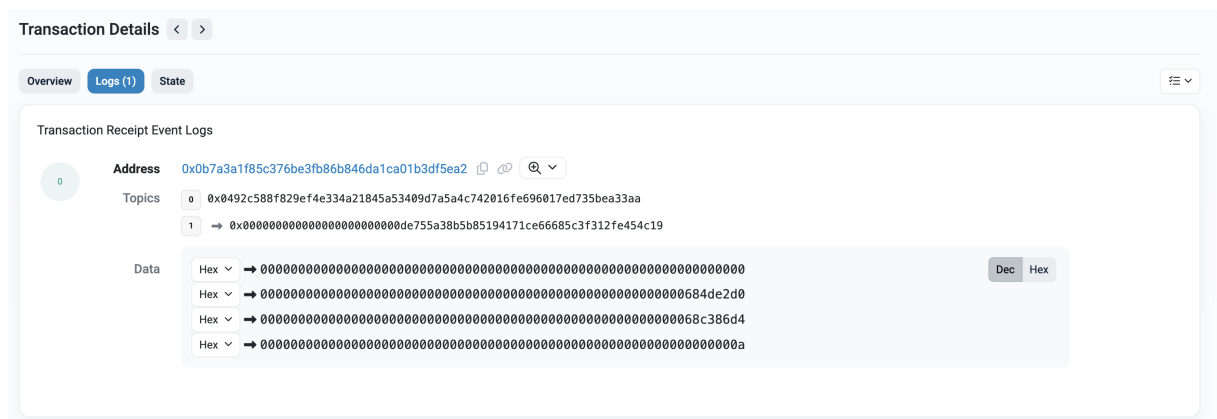


Figura 4.19: Detalhes da Transações do Smart Contract. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

- *Address*

0x0b7a3a1f85c376be3fb86b846da1ca01b3df5ea2

Este é o endereço do contrato inteligente que recebeu ou executou a transação. Ele representa o local onde o contrato foi implantado. Todas as interações com esse contrato, como chamadas de função ou envio de dados, serão associadas a esse endereço.

- *Topics*

São elementos do log de eventos emitidos durante a execução de funções no contrato com eles é permitido a indexação eficiente e busca de eventos específicos.

- Topic[0]:

0x0492c588f829ef4e334a21845a53409d7a5a4c742016fe696017ed735bea33aa

Representa o hash da assinatura do evento emitido pelo contrato (por exemplo, `event JourneyAdded(...)`), tem sido adotado para identificar o tipo de evento disparado.

- Topic[1]:

[illegible]

Este valor corresponde a um parâmetro indexado do evento, como o identificador de usuário (`userIdentity`), representado por um endereço ou UUID anonimizado.

- *Data*

O campo *Data* contém os parâmetros não indexados do evento emitido, codificados em hexadecimal:

[illegible]

Esses valores, quando decodificados, representam:

- 0x0103: Identificador da jornada (`journeyId`), que equivale a 259 em decimal.

- 0x1950d80cde0 e 0x19509c154e0: Possíveis timestamps ou valores monetários, como tempo de início e fim da jornada.

- 0x0: Campo nulo ou opcional, que pode representar ausência de informação adicional.

Esses dados seguem o formato definido no evento Solidity, por exemplo:

```
event JourneyAdded(address user, uint256 journeyId,
                uint256 startTime, uint256 endTime,
                uint256 amount):
```

Nesse caso, o campo *Data* armazena os valores de `journeyId`, `startTime`, `endTime` e `amount`, enquanto o endereço do usuário (`user`) aparece como um dos tópicos indexados.

Foi utilizado no trabalho a *MetaMask* como ferramenta de interação com a *blockchain*, uma digital de criptomoedas utilizada como uma ponte entre o ecossistema o aplicativos descentralizados *dApps* baseados na *Ethereum*. Possui uma extensão no navegador e aplicativo móvel, que proporciona uma interface intuitiva e segura para gerenciar ativos digitais e interagir com uma vasta gama de protocolos *Web3*.

Entre suas principais funcionalidades, destacam-se: o armazenamento seguro de Ether (**ETH**) e de tokens compatíveis com o padrão Ethereum Request for Comments 20 (**ERC-20**); o acesso a milhares de *dApps*; a realização de transações rápidas; o gerenciamento de Tokens Não Fungíveis (**NFTs**); o suporte a múltiplas redes compatíveis com a **EVM**; e a integração com protocolos de Finanças Descentralizadas (**DeFi**).

A *MetaMask* destaca-se por sua segurança, facilidade de uso, flexibilidade e por contar com uma comunidade ativa. Por se tratar de uma carteira não custodial, a responsabilidade pela segurança das chaves privadas recai sobre o próprio usuário, o que torna essencial o armazenamento seguro da frase de recuperação. Assim, a *MetaMask* representa uma ferramenta fundamental para explorar o universo das criptomoedas e das finanças descentralizadas, contribui para a democratização do acesso a novas aplicações financeiras e tecnológicas (MetaMask, 2023).

Após a configuração da carteira *MetaMask*, conforme ilustrado na Figura 4.20, foram carregados créditos de teste por meio de uma *faucet* da rede de testes. Uma *faucet* é um serviço que fornece pequenas quantidades de criptomoedas gratuitas, geralmente em ambientes de teste, e permite que desenvolvedores e usuários realizem transações e interajam com contratos inteligentes sem a necessidade de utilizar dinheiro real. Para este trabalho, foi utilizada a *faucet* da *Binance Smart Chain Testnet*, uma rede de testes compatível com a Ethereum Virtual Machine (EVM).

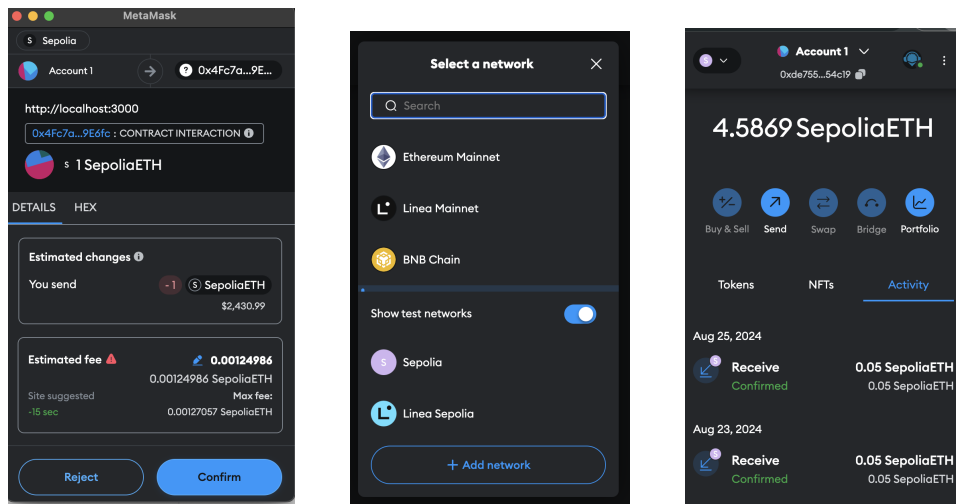


Figura 4.20: Configuração e utilização da MetaMask. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Para cada transação de escrita na *blockchain*, foi utilizada a autorização por meio do aplicativo *MetaMask*. Ao executar uma transação, como a gravação de dados ou o envio de *tokens*, o *MetaMask* solicita ao usuário uma confirmação prévia antes de transmitir a transação para a rede, conforme ilustrado na Figura 4.21. Esse processo de autorização envolve a verificação detalhada dos parâmetros da transação, incluindo o valor em criptomoedas, o endereço de destino e as taxas de rede (*gas fees*). Além disso, o *MetaMask* gera e assina digitalmente a transação com a chave privada do usuário, assegurando a integridade e a segurança dos dados enviados para a *blockchain*.

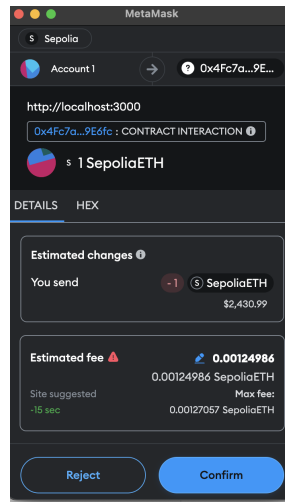


Figura 4.21: Enviando transações com a MetaMask. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A aplicação móvel desenvolvida para coletar dados é distribuída por meio do *Firebase* Google (2024b), onde a autenticação, realizada via e-mail do *Google*, garante segurança e simplicidade no acesso pelos usuários. O ponto **A**, destacado na Figura 4.22, exibe as informações cadastrais fornecidas pela plataforma do *Google*, enquanto o ponto **B** indica o saldo em *Ethereum*, atualizado conforme as contribuições dos usuários na plataforma.

O *Firebase* permite o cadastro de até 500 testadores simultâneos, o que facilitou o processo de testes e contribuiu para o desenvolvimento do trabalho. Embora algumas automações, como a detecção da aceleração do dispositivo e a integração de sensores para obter dados mais precisos de geolocalização e deslocamento, pudessem aprimorar a experiência do usuário, essas funcionalidades não foram implementadas por não fazerem parte do escopo principal do projeto. Optou-se por uma abordagem mais simples e objetiva, com foco na demonstração do estado da arte.

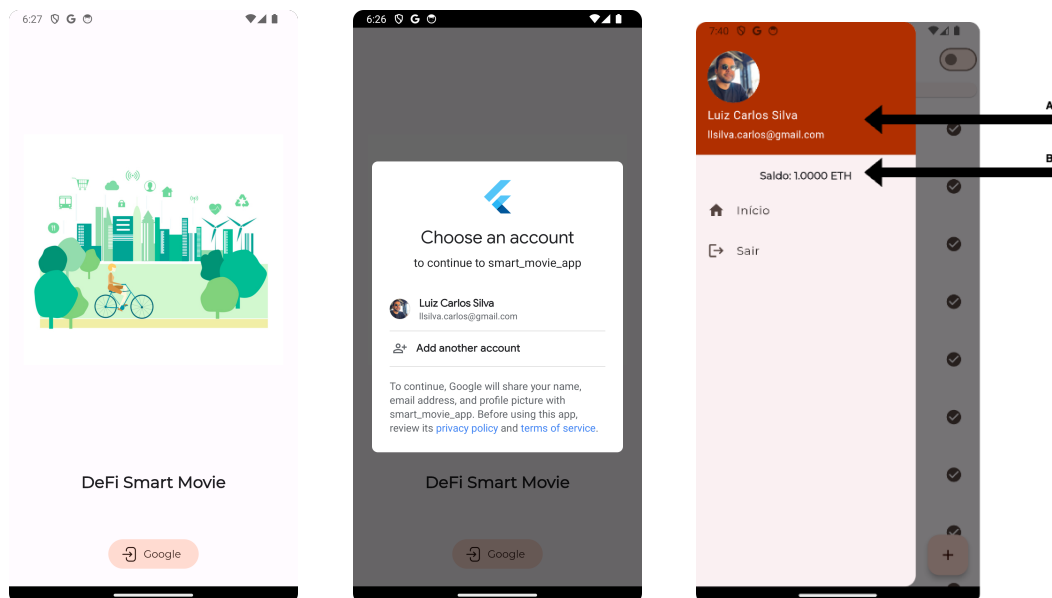


Figura 4.22: Processo de autenticação utilizando o e-mail do Google. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Foi desenvolvido um histórico detalhado dos deslocamentos realizados pelos usuários de teste por meio da plataforma. Esse histórico, ilustrado na Figura 4.23, encontra-se disponível na aplicação. Ele inclui informações sobre os principais meios de transporte utilizados em Belo Horizonte, conforme os dados coletados em (Superintendência de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte, 2024). A segmentação detalhada oferece uma visão mais clara das opções de transporte disponíveis e permite uma análise mais precisa dos padrões de mobilidade dos usuários.

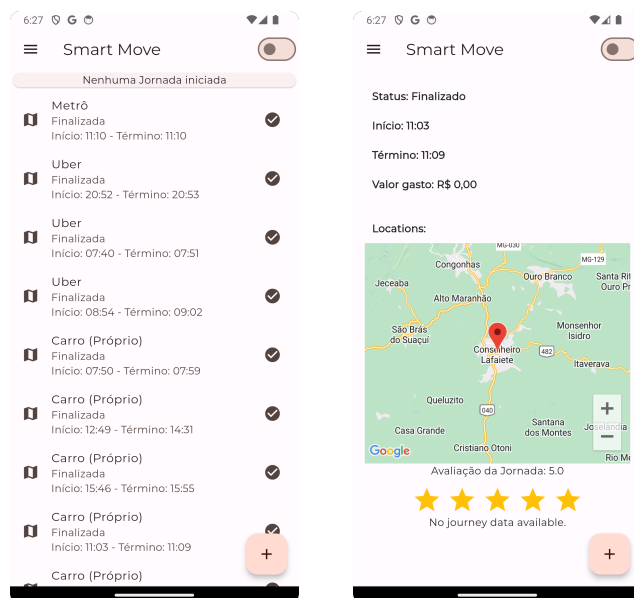


Figura 4.23: Detalhamento das Jornadas e Deslocamentos dos Usuários. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

Foram registrados dados de localização por meio da API de Geolocalização do *Google Maps* Google (2024a), que fornece informações atualizadas e precisas. A coleta inclui, além da velocidade do deslocamento, a identificação de pontos de interesse, como paradas de transporte público e locais frequentemente visitados pelo usuário.

Para cada deslocamento, o sistema registra dados de latitude e longitude, o que permite um mapeamento detalhado do trajeto autorizado pelo usuário. Esses dados são armazenados inicialmente em um banco de dados no *Firebase* e, em seguida, transmitidos por meio de uma API REST para uma função *AWS Lambda*.

A função Lambda atua como intermediária, que processa e enacaminha os dados para um banco de dados *DynamoDB* na nuvem da AWS. O processo técnico para o registro via API REST em *AWS Lambda* é descrito a seguir:

É importante destacar que a coleta desses dados ocorre com o consentimento explícito do usuário, solicitado por meio da aceitação da permissão de compartilhamento de localização no próprio dispositivo, conforme descrito na documentação do [Google \(2024d\)](#). O usuário deve autorizar o aplicativo a acessar e registrar suas informações de localização, de modo a assegurar o respeito à privacidade e às preferências durante o processo de coleta e armazenamento dos dados.

Para o cadastramento e criação de uma nova jornada, foram desenvolvidas jornadas simples, conforme mostrado na Figura 4.24. Naturalmente, uma automação mais avançada, com menos interações entre o usuário e o dispositivo, seria ideal para a coleta desses dados. Por exemplo, integrações com dispositivos já disponíveis em veículos, como catracas eletrônicas de transportes públicos, ou com dispositivos como *smartwatches* (dispositivos eletrônicos que integram funcionalidades tradicionais de medição de tempo com capacidades inteligentes), poderiam melhorar significativamente a eficiência do processo de coleta de dados.

4.2.7 Modelo e Verificação

Os resultados obtidos referem-se à implementação e avaliação do modelo descentralizado proposto, cujo objetivo consistiu em verificar sua eficiência, escalabilidade e robustez em comparação com abordagens centralizadas. Essa verificação foi conduzida por meio de experimentos controlados e métricas padronizadas de desempenho, incluindo latência média das transações (*confirmation_time*), *throughput*, taxa de falhas, tempo de *consensus*, coeficiente de determinação (R^2), raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro absoluto médio, análise de importância das variáveis (*feature importance*) e avaliação dos resíduos das previsões. Essas métricas permitiram analisar de forma detalhada a eficiência, robustez e capacidade preditiva do modelo descentralizado, comparando-o com abordagens centralizadas e garantindo a consistência dos resultados obtidos.

Foram conduzidas simulações e testes práticos em diferentes cenários, com variações no volume de transações, no número de nós participantes e nas condições da rede. A performance do modelo foi avaliada com base em indicadores como latência média, *throughput*, taxa de falhas e tempo de *consensus*. A análise desses parâmetros permitiu a identificação dos limites operacionais da solução proposta.

A confiabilidade do sistema foi examinada sob a perspectiva da tecnologia *blockchain*, utilizada como base para a comunicação e a validação entre os agentes. As propriedades de *immutability* e *auditability* foram avaliadas, garantindo que os dados armazenados não possam ser alterados e que todas as transações sejam rastreáveis.

Os dados brutos foram processados a partir de colunas com estruturas aninhadas no formato *JavaScript Object Notation (JSON)*, um padrão leve de intercâmbio de dados estruturados, amplamente utilizado por sua simplicidade e compatibilidade com diversas linguagens de programação ([Bray, 2017](#)). As informações relevantes foram extraídas dos campos *blockInfo* e *locations*, e o tempo de confirmação

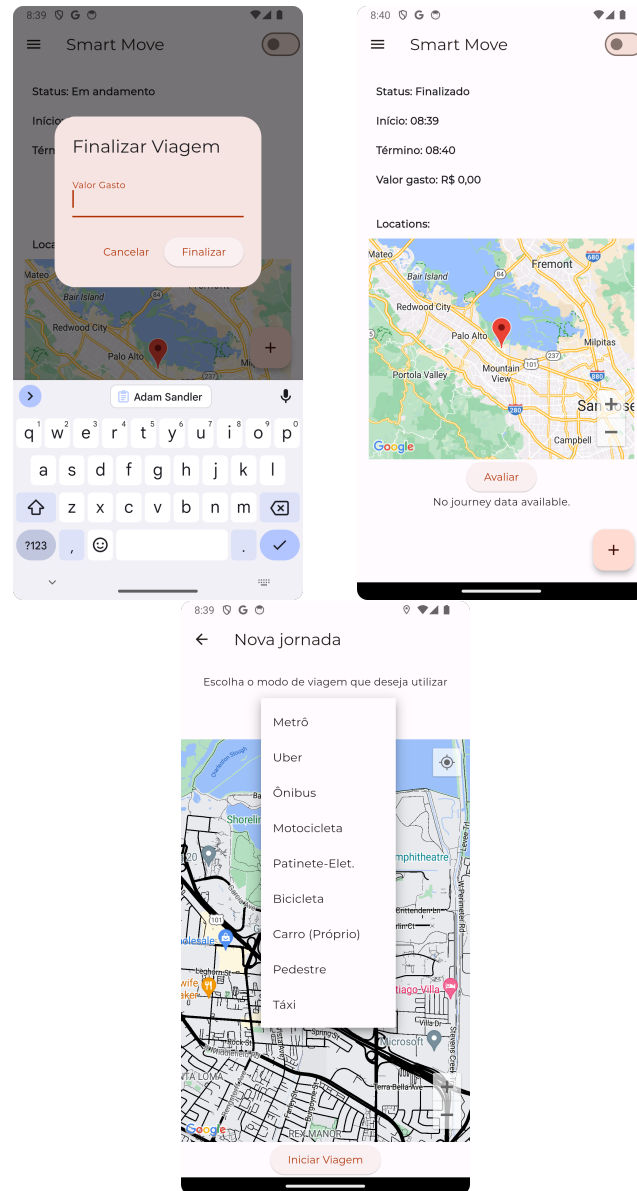


Figura 4.24: Cadastramento de novas Jornadas. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

foi calculado com base nessas informações.

$$confirmation_time = confirmedAt - sentAt$$

Após a limpeza dos dados, foram criadas variáveis derivadas tanto do conteúdo dos blocos quanto de informações temporais, conforme descrito a seguir:

- **blockNumber**, **gasUsed**: atributos estruturais do bloco.
- **sent_hour**, **weekday**, **is_weekend**, **is_night**: características temporais.
- **delta_block_time**: tempo entre transações consecutivas.
- **rolling_avg_confirm**: média móvel do tempo de confirmação (janela de 5 transações).
- **blockHash_int**: representação numérica do hash do bloco.

Diversos modelos supervisionados foram testados utilizando validação *holdout*(70/30), uma técnica comum na qual o conjunto de dados é dividido em duas partes:

- **70%** dos dados: utilizados para o treinamento dos modelos.
- **30%** dos dados: utilizados para teste e avaliação do desempenho em dados não vistos anteriormente.

Os principais resultados estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Comparação entre modelos aplicados

Modelo	R ²	RMSE (segundos)
Regressor Linear Simples	≈ 0.00	2,57
Árvore de Decisão (max_depth = 4)	-0.08	2,64
Random Forest Regressor	-0.06	2,62
Gradient Boosting Regressor	0,1578	2,40

A análise de importância das variáveis revelou que as *features* derivadas do histórico temporal — `rolling_avg_confirm` e `delta_block_time` — tiveram maior impacto na performance do modelo, conforme ilustrado na Figura 4.25.

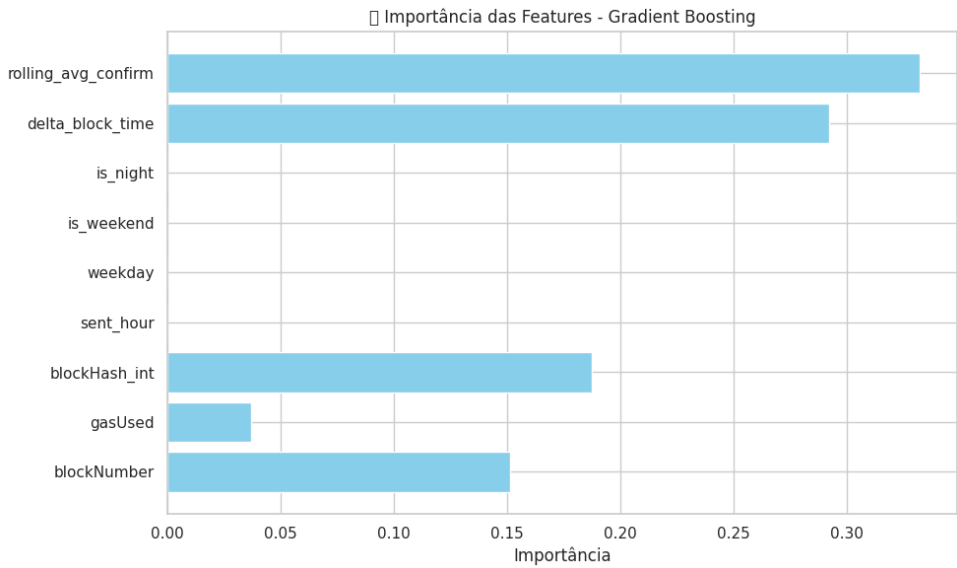


Figura 4.25: Importância das variáveis no modelo Gradient Boosting. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

A introdução de variáveis baseadas no contexto temporal permitiu capturar padrões históricos da rede *blockchain*, resultando em uma melhora significativa da capacidade preditiva. A inclusão de `rolling_avg_confirm` e `delta_block_time` contribuiu diretamente para o aumento do coeficiente de determinação para $R^2 = 0,1578$.

Entre os modelos avaliados, o *Gradient Boosting Regressor* apresentou o melhor desempenho e o menor **RMSE** (Raiz Do Erro Quadrático Médio) entre as abordagens testadas. Esse modelo baseia-se em uma técnica de aprendizado conjunto (*ensemble*) que combina, de forma iterativa, diversos modelos fracos (como pequenas árvores de decisão) para formar um modelo forte. A cada iteração, os erros cometidos pelos modelos anteriores são utilizados no treinamento de um novo modelo corretivo, guiado pelo gradiente da função de perda. Essa abordagem é eficaz na captura de padrões não lineares e interações complexas entre variáveis, especialmente em problemas com múltiplas características derivadas (Friedman, 2001). O bom desempenho observado indica que o modelo foi capaz de identificar, mesmo que parcialmente, os fatores que influenciam o tempo de confirmação das transações na rede *blockchain* analisada.

Além da análise do tempo de confirmação, foi desenvolvido um modelo específico para estimar o custo das transações em BNB, com base em atributos estruturais e temporais extraídos dos blocos. Para isso, utilizou-se uma regressão linear simples, que demonstrou excelente desempenho preditivo, com erro absoluto médio inferior a $1,3 \times 10^{-9}$ BNB e coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,9999999.

O modelo estima o valor da *gas fee* a partir de uma combinação linear entre o volume de *gas* utilizado e o tempo de confirmação da transação, conforme descrito na Equação 4.2:

$$\text{gasFeeBNB} = f(G, \Delta t) \quad (4.1)$$

Onde G representa a quantidade de *gas* utilizada e Δt o tempo de confirmação da transação. A função f , aprendida via regressão linear, assume a seguinte forma explícita:

$$f(G, \Delta t) = (5,04 \times 10^{-9}) \cdot G + (4,28 \times 10^{-12}) \cdot \Delta t + 5,84 \times 10^{-6} \quad (4.2)$$

Esse resultado reforça a forte dependência entre o custo da transação e a quantidade de *gas* consumido, indicando que a variável *gasUsed* é o principal fator explicativo do custo, enquanto o tempo de confirmação exerce influência marginal. A simplicidade do modelo e sua alta acurácia o tornam uma ferramenta eficaz para a estimativa de custos operacionais em redes *blockchain* do tipo EVM, como a BNB *Smart Chain*.

A Figura 4.26 apresenta o comparativo entre os valores reais e os previstos pelo modelo e revela um ajuste preciso entre as curvas. A Figura 4.27, por sua vez, mostra os resíduos (diferença entre valor real e previsto), os quais permanecem próximos de zero, o que confirma a robustez do modelo.

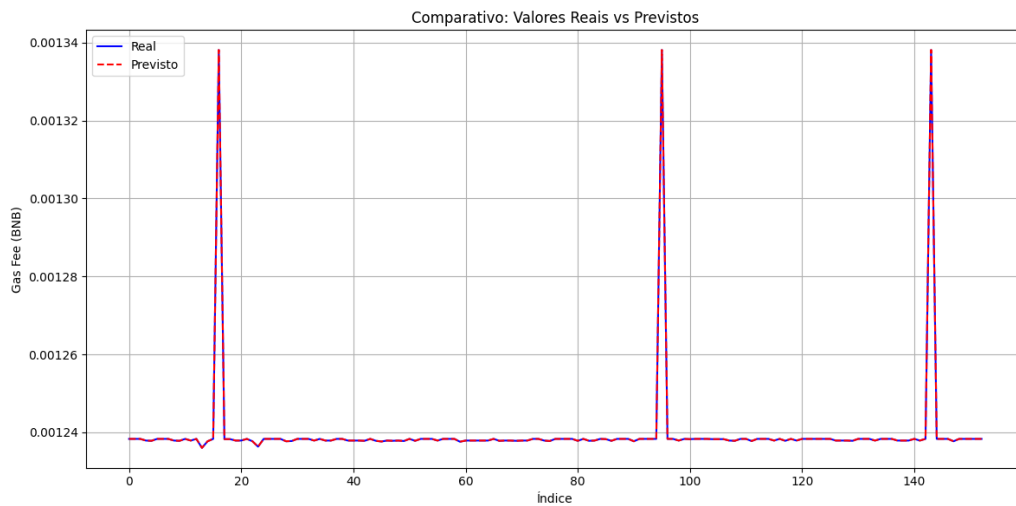


Figura 4.26: Comparativo entre valores reais e previstos de *gasFeeBNB*. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

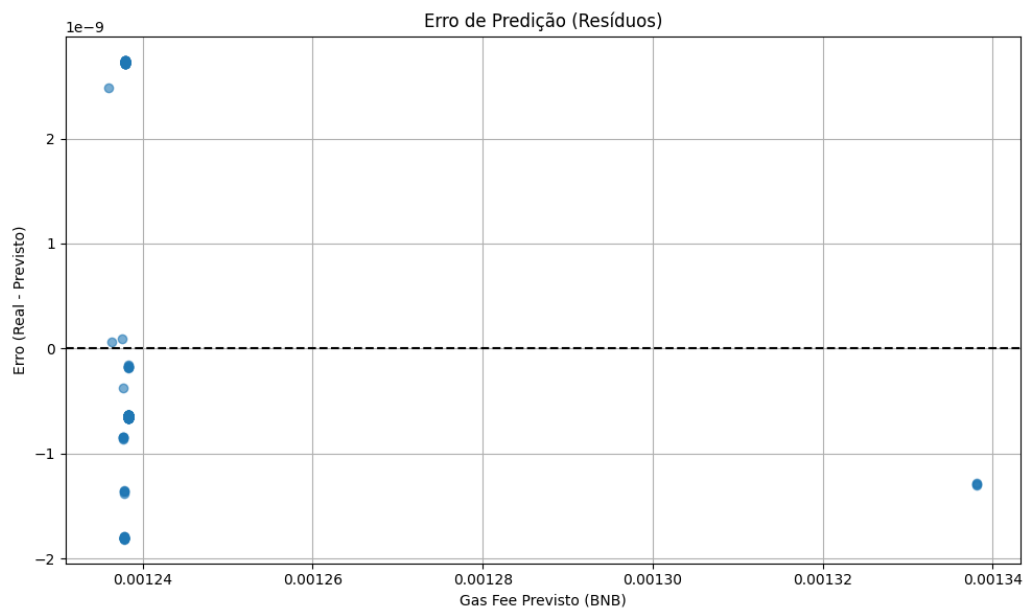


Figura 4.27: Resíduos do modelo de regressão linear na previsão da *gasFee*. Fonte: Elaborado pelo autor, 2025.

O modelo foi comparado com outras abordagens de regressão, entre elas o *Gradient Boosting Regressor*, conhecido por sua capacidade de capturar interações não lineares entre variáveis. Essa técnica combina iterativamente diversos modelos fracos (como pequenas árvores de decisão) para formar um modelo mais robusto, com base no gradiente da função de perda (Friedman, 2001). Apesar do desempenho satisfatório do *Gradient Boosting*, a regressão linear apresentou resultados igualmente precisos, com menor complexidade computacional, o que a torna mais adequada em cenários que exigem interpretabilidade e leveza de execução.

A abordagem adotada mostrou-se funcional tanto do ponto de vista técnico — com taxas de sucesso elevadas no envio e confirmação de transações — quanto analítico, com modelos preditivos capazes de estimar com alta acurácia variáveis críticas como tempo de confirmação e custo de *gas*.

A regressão linear, apesar de sua simplicidade, demonstrou excelente desempenho na modelagem

do custo da *gas fee*, indicando forte correlação entre variáveis estruturais do bloco (como *gasUsed*) e fatores temporais (Δt). Ao mesmo tempo, o uso de algoritmos mais sofisticados como o *Gradient Boosting Regressor* revelou que características temporais derivadas, como médias móveis e intervalos entre blocos, possuem papel relevante na predição do tempo de confirmação das transações.

Esses resultados sustentam a viabilidade da utilização de modelos preditivos no contexto de sistemas descentralizados, contribuindo para a construção de mecanismos de otimização e antecipação de custos em redes públicas baseadas em *blockchain*. Além disso, a metodologia adotada oferece um caminho replicável para futuras investigações em redes similares, combinando engenharia de dados, aprendizado de máquina e arquitetura distribuída como pilares da análise.

4.3 Considerações Finais sobre o Método de Bruno Munari

Ao longo do trabalho, o método de projeto proposto por Munari (1981) serviu como orientação não apenas para o desenvolvimento técnico da solução, mas também para a estruturação crítica do problema e a construção de alternativas viáveis. A metodologia de Munari, caracterizada por um processo iterativo, investigativo e centrado na clareza do problema, possibilitou uma condução integrada entre pesquisa teórica, observação empírica e experimentação prática.

O processo de design deve iniciar com uma compreensão aprofundada do problema, seguido por etapas de coleta de dados, formulação de hipóteses, prototipação e validação (Munari, 1981). Essa abordagem se mostrou particularmente adequada à proposta do trabalho, que exigiu a identificação de lacunas na mobilidade urbana contemporânea, a análise de dados reais da cidade de Belo Horizonte e o desenvolvimento de um MVP funcional.

O caráter exploratório e crítico do método permitiu uma reflexão fundamentada sobre alternativas ao modelo centralizado de gestão da mobilidade, o que favoreceu uma solução orientada à descentralização, à auditabilidade e à participação dos usuários. Além disso, o enfoque de Munari incentivou a busca por soluções simples, funcionais e adaptáveis — aspectos fundamentais em contextos urbanos complexos.

Conclui-se, portanto, que o método de Munari (1981) contribuiu de forma significativa para a condução do trabalho com clareza, consistência e coerência entre problema, solução e validação.

Capítulo 5

Conclusão e Trabalhos Futuros

O presente estudo buscou explorar soluções inovadoras para melhorar a mobilidade urbana por meio da implementação de um modelo descentralizado baseado na tecnologia *blockchain*. Com base nos fundamentos conceituais abordados, observou-se que a integração entre diferentes modais, a segurança de dados e a eficiência operacional são beneficiadas significativamente pela descentralização.

Ao longo da pesquisa, constatou-se que os desafios enfrentados pela mobilidade urbana contemporânea — como a fragmentação dos serviços, a ausência de integração modal e a dificuldade de acesso à informação confiável e atualizada — podem ser significativamente mitigados por meio da adoção de soluções tecnológicas inovadoras e integradas.

Os dados obtidos na pesquisa de campo revelaram uma dependência preocupante do transporte individual, o que evidencia a necessidade urgente de soluções voltadas para uma mobilidade mais sustentável, integrada e eficiente. Além disso, foi identificado um conhecimento limitado por parte dos cidadãos sobre conceitos-chave como *Smart Cities* e MaaS, o que reforça a importância de campanhas educativas e de iniciativas públicas voltadas à conscientização e ao engajamento ativo da população.

A avaliação empírica, realizada por meio da aplicação desenvolvida, demonstrou que a tecnologia *blockchain* oferece vantagens claras, como imutabilidade, segurança e transparência, especialmente no contexto da mobilidade urbana. O modelo testado validou transações com segurança, preservando a integridade dos dados e fornecendo uma plataforma robusta para a interação entre usuários e provedores de serviços.

Destaca-se ainda a importância de serviços integrados e do compartilhamento de dados reais ou aproximados, cuja consistência e confiabilidade devem ser asseguradas, ao mesmo tempo em que se mantém o anonimato dos usuários. Essa abordagem viabiliza novas oportunidades para os transportes coletivos, que passam a se tornar mais atrativos e acessíveis à população, além de favorecer uma gestão mais eficiente e assertiva dos recursos urbanos.

Por fim, o modelo proposto demonstrou potencial significativo para contribuir na gestão da mobilidade urbana, ao apresentar uma solução robusta, eficiente e sustentável para os desafios contemporâneos. Os testes realizados indicaram que a leitura e escrita dos dados se aproximam dos valores reais, mesmo utilizando uma rede *Ethereum L1* como base, o uso da tecnologia *blockchain* assegura a imutabilidade das informações, uma característica intrínseca a essa tecnologia, e possibilita a integração de futuras evoluções, como o uso de Tokens ERC-20 e mecanismos avançados de privacidade baseados em Zero-Knowledge Proofs, conforme discutido na [5.3](#).

Por fim, o modelo proposto demonstrou potencial significativo para contribuir na gestão da mobilidade urbana, ao propor uma abordagem que se mostra robusta, eficiente e potencialmente sustentável frente aos desafios contemporâneos. Os testes realizados indicaram que a leitura e escrita dos dados se aproximam dos valores reais, mesmo utilizando uma rede *Ethereum L1* como base. O uso da tecnologia *blockchain* garante a imutabilidade das informações, uma característica intrínseca dessa tecnologia, e permite a incorporação de futuras evoluções, como a utilização de *Tokens ERC-20* e a implementação de mecanismos avançados de privacidade baseados em *Zero-Knowledge Proofs*, ampliando a flexibilidade e a escalabilidade do sistema, conforme discutido na Seção [5.3](#).

5.1 Avaliação TRL

A avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica **TRL** realizada conforme o apêndice A situou a tecnologia em um estágio intermediário, correspondente ao TRL 6. Esse resultado indica que o protótipo foi testado e validado em ambiente relevante, com a participação de usuários reais em redes de teste, o que confirma sua viabilidade técnica e operacional.

Para avançar rumo à implementação plena e comercialização, torna-se necessário realizar testes mais extensos e rigorosos em condições reais de operação, correspondentes aos níveis TRL 7 a 9. Essas etapas são essenciais para garantir a robustez, escalabilidade e aceitação do modelo descentralizado no contexto da mobilidade urbana.

5.2 Limitações

Apesar dos resultados positivos, o estudo apresentou algumas limitações importantes que precisam ser consideradas:

- **Escalabilidade:** A solução desenvolvida foi testada em ambiente controlado e ainda não enfrentou desafios significativos de escalabilidade, que podem ocorrer com grandes volumes de dados e transações em contextos reais. Essa limitação de escopo experimental é comum em projetos de base tecnológica em estágios intermediários de desenvolvimento. Estudos anteriores que abordaram tecnologias semelhantes já identificaram esse ponto crítico. Por exemplo, gargalos relacionados ao processamento e à análise de grandes volumes de dados em tempo real durante a implementação de uma solução AIoT integrada à *blockchain* para otimização do tráfego urbano (Jaramillo-Alcazar et al., 2023). Da mesma forma destacaram que, embora a *blockchain* ofereça transparência e segurança, sua adoção em sistemas *MaaS* enfrenta limitações de desempenho e latência, especialmente sob alta demanda transacional (Nguyen et al., 2023). Esses trabalhos indicam que, à medida que tais soluções são levadas a ambientes reais e dinâmicos, surgem novos problemas — como a interoperabilidade entre diferentes serviços, a latência na propagação de dados e a limitação de recursos computacionais em dispositivos de borda. A solução aqui proposta, embora promissora em ambiente simulado, ainda precisa ser validada em cenários mais complexos e com maior volume de interações, a fim de comprovar sua robustez e resiliência em larga escala.
- **Automação limitada:** O modelo implementado ainda depende de interações manuais frequentes por parte do usuário, o que compromete sua escalabilidade e eficiência operacional em contextos reais. Para alcançar uma aplicação prática mais robusta, seria necessário avançar na automação por meio da integração com sensores, dispositivos IoT e sistemas inteligentes. Essa integração permitiria a coleta e o processamento de dados de forma autônoma e em tempo real.
- **Aceitação tecnológica:** Desenvolver uma plataforma que abstraia progressivamente os conceitos técnicos da tecnologia *blockchain*, como a criação e o gerenciamento de carteiras digitais (*wallets*), é essencial para ampliar sua adoção. Durante o estudo, foi observado que usuários leigos enfrentam diversas dificuldades ao utilizar uma carteira *blockchain*, desde a geração de chaves até o entendimento dos processos de assinatura e custódia de ativos. Essas barreiras evidenciam a necessidade

de interfaces mais intuitivas, com fluxos simplificados e suporte contextual, capazes de permitir a interação com a tecnologia sem exigir conhecimento técnico prévio. Com a redução dessa complexidade, a plataforma torna-se mais acessível e inclusiva, o que favorece maior adesão ao uso da *blockchain* em soluções voltadas à mobilidade urbana e aos serviços inteligentes.

- **Custos de implementação:** O uso da tecnologia *blockchain* envolve custos operacionais relevantes, como as taxas de transação (*gas fees*), que podem se tornar significativamente elevadas em períodos de alta demanda, impactando diretamente a viabilidade econômica da solução. Apesar dos benefícios em segurança e transparência, os custos associados à manutenção da infraestrutura *blockchain* ainda representam uma barreira para sua adoção em larga escala. Além disso, a escolha da rede *blockchain* impacta diretamente esses custos, o que torna necessário buscar um equilíbrio entre descentralização, desempenho e sustentabilidade financeira. O desenvolvimento de soluções híbridas ou o uso de tecnologias como *layer 2* e contratos inteligentes otimizados configura-se como uma alternativa viável para mitigar esses impactos.

Essas limitações indicam áreas importantes para trabalhos futuros, especialmente no que diz respeito à expansão e validação operacional em contextos reais, automação aprimorada, e análise econômica mais detalhada para garantir a viabilidade e sustentabilidade do modelo proposto.

5.3 Trabalhos Futuros

A proposta apresentada no trabalho demonstrou a viabilidade técnica de um modelo descentralizado de mobilidade urbana, baseado em um aplicativo descentralizado (*dApp*) e um contrato inteligente (*smart contract*) implementado na rede de testes da *Ethereum*. Contudo, como toda solução experimental desenvolvida em ambiente controlado, o trabalho apresenta limitações que delimitam seu escopo e indicam possibilidades de aprofundamento.

Entre essas limitações, destacam-se a ausência de integração com dados em tempo real, a simulação restrita de modais de transporte e a não inclusão de mecanismos de pagamento, identidade digital ou governança participativa. Além disso, a complexidade inerente ao ecossistema urbano descentralizado levanta questões relevantes de ordem tecnológica, social, regulatória e operacional.

Nesse sentido, apresentam-se a seguir algumas direções possíveis para investigações futuras, com o objetivo de ampliar a abrangência da proposta e avaliar sua aplicabilidade em contextos reais e complexos:

- **Validação em Ambiente Real:** Aplicar o modelo descentralizado em cenários reais com dados em tempo real, utilizando fontes como APIs públicas de transporte ou sensores urbanos, a fim de testar sua escalabilidade, desempenho e interoperabilidade em ambientes dinâmicos.
- **Integração com Sistemas de Pagamento e Identidade Digital:** Incorporar mecanismos de pagamento com *cryptocurrencies* ou *stablecoins*, bem como soluções de identidade digital descentralizada, para ampliar a funcionalidade do modelo e garantir autenticação segura e preservação da privacidade do usuário.
- **Governança Descentralizada com DAOs:** Investigar o uso de *Decentralized Autonomous Organizations* (DAOs) para permitir que usuários e comunidades participem ativamente das decisões sobre o sistema de mobilidade, como priorização de investimentos ou definição de rotas alternativas.

- **Migração para *Blockchains* Sustentáveis:** Avaliar alternativas ao *Ethereum*, como *Polygon*, *Solana* ou *Celo*, que oferecem menor custo por transação e consumo energético reduzido, favorecendo a adoção da solução em contextos urbanos amplos.
- **Expansão para Escalas Regionais:** Adaptar o modelo a contextos metropolitanos ou intermunicipais, onde diferentes jurisdições operam sistemas de transporte não integrados, exigindo maior grau de descentralização para interoperabilidade eficiente.
- **Avaliação com Usuários Finais:** Realizar estudos de aceitação com usuários reais, por meio de testes de usabilidade e entrevistas estruturadas, a fim de validar a proposta sob a ótica da experiência do usuário, confiança e controle de dados.
- **Análise de Impacto Ambiental e Econômico:** Explorar como a descentralização da mobilidade urbana pode reduzir custos operacionais e emissões de carbono, utilizando simulações ou estudos de caso com trajetos reais.
- **Implementação de um Token *ERC-20*:** Desenvolver e integrar um token compatível com o padrão *ERC-20*, voltado à remuneração por boas práticas de mobilidade, pagamento por serviços ou mesmo à participação em mecanismos de governança descentralizada.
- **Integração com Planejadores de Viagem como o OTP:** Explorar a integração do modelo proposto com planejadores de viagem baseados em código aberto, como o OTP, conforme abordado por [Nguyen et al. \(2023\)](#). Essa integração pode ser aplicada em contextos urbanos e regionais brasileiros, sobretudo em cidades de médio porte ou regiões metropolitanas com infraestrutura de transporte fragmentada, a fim de avaliar a eficiência da descentralização na geração de rotas, no acesso a múltiplos modais e na interoperabilidade entre sistemas.

REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) . Plano Nacional de Banda Larga. Brasília: Portal Gov.br, Ministério das Comunicações, 2020.

Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/universalizacao/\protect\@normalcr\relaxplano-nacional-de-banda-larga>. Acesso em: 9 jun. 2025.

Alyavina Elena, Nikitas Alexandros, Tchouamou Njoya Eric. Mobility as a service and sustainable travel behaviour: A thematic analysis study // Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour. 2020. 73. 362–381.

Amazon Web Services . AWS Lambda. 2024a.

Disponível em: <https://aws.amazon.com/lambda/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Amazon Web Services . Amazon API Gateway. 2024b.

Disponível em: <https://aws.amazon.com/api-gateway/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Amazon Web Services . Amazon DynamoDB. 2024c. Disponível em:

<https://aws.amazon.com/dynamodb/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Antunes Eloisa Maieski, Simões Fernanda Antonio. Engenharia urbana aplicada: um estudo sobre a qualidade do transporte público em cidades médias // Urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana. 2013. 5. 51–62.

BHTRANS , ObsMob-BH . Balanço Anual da Mobilidade Urbana de Belo Horizonte 2022 (ano-base 2021). 2025. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/planmob-bh/\protect\@normalcr\relaxbalanco-da-mobilidade>.

Acesso em: 22 ago. 2024.

Benet Juan. IPFS - Content Addressed, Versioned, P2P File System. 2014.

Bergamini Ricardo Luiz. Avaliação do Nível de Maturidade de Tecnologia (TRL) nas Instituições de Ciência e Tecnologia (ICTs) com o modelo adaptado da AFRL–Air Force Research Laboratory // Revista de Administração de Roraima-RARR. 2020. 10.

Bray Tim. The JavaScript Object Notation (JSON) Data Interchange Format. Fremont: RFC 8259, Internet Engineering Task Force (IETF), 2017.

Disponível em: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc8259.html>. Acesso em: 22 ago. 2024.

BscScan . BscScan Testnet Explorer. 2024.

Disponível em: <https://testnet.bscscan.com/>. Acesso em: 7 maio 2025.

CEN/TC 278 . CEN/TS 16614-1:2014 Public transport – Network and Timetable Exchange (NeTEx) – Part 1: Network Topology. 2014. Este é um exemplo da Parte 1. O padrão NeTEx é composto por várias partes (e.g., Parte 2 para horários, Parte 3 para tarifas). Dependendo do seu foco, você pode precisar citar as partes específicas ou o padrão geral.

Cao Longbing. Decentralized AI: Edge Intelligence and Smart Blockchain, Metaverse, Web3, and DeSci // IEEE Intelligent Systems. 2022. 37, 3. 6–19.

Carvalho Carlos Henrique Ribeiro. Desafios da mobilidade urbana no Brasil. Brasília: Texto para Discussão No. 2198, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2016. Disponível em: <https://hdl.handle.net/10419/144634>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Chen Lin, Xu Lei, Shah Nolan, Gao Zhimin, Lu Yang, Shi Weidong. On security analysis of proof-of-elapsed-time (poet) // Stabilization, Safety, and Security of Distributed Systems: 19th International Symposium, SSS 2017, Boston, MA, USA, November 5–8, 2017, Proceedings 19. 2017. 282–297.

CoinSpectator . CoinSpectator - Real-time Cryptocurrency News Aggregator. 2025. Disponível em: 28 maio 2025.

Confederação Nacional do Transporte . Mobility as a Service (MaaS). 2022. Série Transporte em Foco. Brasília: CNT, dezembro de 2022. Disponível em: <https://cnt.org.br/documento/79fc286c-f2e3-4896-8afb-8a1b530ba791>. Acesso em: 28 out. 2024.

Costa Thiago Esteves Gonçalves da. Comparação dos resultados das pesquisas Origem-Destino de 2002 e 2012 // Anais do I Seminário Nacional de Política Urbana e Ambiental. Brasília, IV 2016. Trabalho originalmente publicado em 2013.

Cunha Maria Alexandra, Przybilovicz Erico, Macaya Javiera Fernanda Medina, Santos Fernando Burgos Pimentel dos. Smart Cities: Transformação Digital de Cidades. São Paulo, 2016.

Dannen Chris. Introducing Ethereum and Solidity: Foundations of Cryptocurrency and Blockchain Programming for Beginners. New York: Apress, 2017. 1st. (Technology in Action).

Eckhardt Jenni, Aapaoja Aki, Nykänen Lasse, Sochor Jana, Karlsson Marianne, König David. Deliverable 2: European MaaS Roadmap 2025. May 2017. Retrieved from <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2017/T313.pdf>.

Ethereum Foundation . The Merge. 2022. Disponível em: <https://ethereum.org/en/developers/docs/consensus-mechanisms/pos/>. Disponível em: 10 set. 2024.

Friedman Jerome H. Greedy Function Approximation: A Gradient Boosting Machine // The Annals of Statistics. 2001. 29, 5.

Gangwal Ankit, Gangavalli Haripriya Ravali, Thirupathi Apoorva. A survey of Layer-two blockchain protocols // Journal of Network and Computer Applications. 2023. 209. 103539.

Google . APIs by Platform — Google Maps. 2024a. Disponível em: <https://developers.google.com/maps/apis-by-platform>. Acesso em: 19 maio 2025.

Google . Firebase Documentation. 2024b. Disponível em: <https://firebase.google.com/docs>. Acesso em: 24 ago. 2024.

Google . Flutter - Beautiful native apps in record time. 2024c. Disponível em: <https://flutter.dev/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Google . Obtaining User Consent for Accessing Location Data. 2024d. Disponível em: <https://developer.android.com/training/location/permissions/>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Greenwood Jeremy. The Third Industrial Revolution: Technology, Productivity, and Income Inequality. Washington, D.C.: American Enterprise Institute, 1997. (AEI Studies on Understanding Economic Inequality).

Hobsbawm Eric. A era das revoluções: 1789–1848. São Paulo: Editora Paz e Terra, 2015. 2. Tradução de Maria Tereza Lopes Teixeira e Marcos Penchel.

Jaramillo-Alcazar Angel, Govea Jaime, Villegas-Ch William. Advances in the Optimization of Vehicular Traffic in Smart Cities: Integration of Blockchain and Computer Vision for Sustainable Mobility // Sustainability (Switzerland). 2023. 15, 22.

Karantias Kostis, Kiayias Aggelos, Zindros Dionysis. Proof-of-burn // Financial Cryptography and Data Security: 24th International Conference, FC 2020, Kota Kinabalu, Malaysia, February 10–14, 2020 Revised Selected Papers 24. 2020. 523–540.

Koo Lawrence Chung. Web 3.0: impacto na sociedade de serviços - uma análise da comunicação contemporânea. São Paulo, Brasil, 2011. Programa de Estudos Pós-Graduados em Comunicação e Semiótica.

Leach P., Mealling M., Salz R. A Universally Unique IDentifier (UUID) URN Namespace. 2005. RFC 4122, IETF, July 2005. Disponível em: <https://www.ietf.org/rfc/rfc4122.txt>. Acesso em: 20 ago. 2024.

MetaMask. About MetaMask. 2023. Disponível em: <https://metamask.io/about/>. Acesso em: 6 jan. 2025.

Metcalf William, others. Ethereum, smart contracts, DApps // Blockchain and Crypt Currency. 2020. 77. 77–93.

Ministério das Comunicações (Brasil). Programa Cidades Digitais. Brasília: Portal Gov.br, Ministério das Comunicações, 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/cidades-digitais>. Acesso em: 9 jun. 2025.

Mokyr Joel, Strotz Robert H. The second industrial revolution, 1870-1914 // Storia dell'economia Mondiale. 1998. 21945, 1. 219–245.

Munari Bruno. Das coisas nascem coisas: introdução ao método de projeto. São Paulo, Brasil: Martins Fontes, 1981. 1. Tradução da obra original italiana *Da cosa nasce cosa*, com enfoque no processo criativo e metodologias de projeto.

Nair P. Rajitha, Dorai D. Ramya. Evaluation of Performance and Security of Proof of Work and Proof of Stake using Blockchain // 2021 Third International Conference on Intelligent Communication Technologies and Virtual Mobile Networks (ICICV). 2021. 279–283.

Nakamoto Satoshi. Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. 2008. Disponível em: <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>. Acesso em: 22 ago. 2024.

Nguyen Tri, Nguyen Huong, Partala Juha, Pirttikangas Susanna. TrustedMaaS: Transforming trust and transparency Mobility-as-a-Service with blockchain // Future Generation Computer Systems. 2023. 149. 606–621.

O'Connor Russell. Simplicity: A new language for blockchains // Proceedings of the 2017 Workshop on Programming Languages and Analysis for Security. 2017. 107–120.

OpenStreetMap contributors . OpenStreetMap. 2004.

Disponível em: <https://www.openstreetmap.org>. Acesso em 10 jun. 2025.

OpenTripPlanner . OpenTripPlanner. 2025. Disponível em : <https://www.opentripplanner.org/>. Acesso em 10 jun. 2024.

Ozpinar Alper. A Hyper-Integrated Mobility as a Service (MaaS) to Gamification and Carbon Market Enterprise Architecture Framework for Sustainable Environment // Energies. 2023. 16, 5.

Presidência da República . Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), Lei No 13.709, de 14 de agosto de 2018. 2018.

Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2018/lei/l13709.htm. Acesso em: 20 ago. 2024.

Remix Project . Remix - Ethereum IDE. 2024. Disponível em: <https://remix.ethereum.org/>. Acesso em: 27 ago. 2024.

Schwab Klaus. A Quarta Revolução Industrial. São Paulo: Edipro, 2019. Tradução de George Schlesinger.

Superintendência de Mobilidade Urbana de Belo Horizonte . Dados sobre Mobilidade Urbana de Belo Horizonte. 2024.

Disponível em: <https://dados.pbh.gov.br/organization/superintendencia-de-mobilidade>. Acesso em: 20 ago. 2024.

Tilkov S., Vinoski S. Node.js: Using JavaScript to Build High-Performance Network Programs // IEEE Internet Computing. Nov 2010. 14, 6. 80–83.

Tomasiello Diego Bogado, Pereira Rafael Henrique Moraes, Nadalin Vanessa Gapriotti. Os impactos desiguais do congestionamento urbano no acesso a empregos. 2023.

Transmodel-CEN . Service Interface for Realtime Information (SIRI). 2024.

Disponível em: <https://transmodel-cen.eu/index.php/siri/>. Acesso em 27 ago. 2024.

Yin ChuanTao, Xiong Zhang, Chen Hui, Wang JingYuan, Cooper Daven, David Bertrand. A literature survey on smart cities // Science China. Information Sciences. 2015. 58.

Zhang Peng, Dubey Abhishek. Proof of Authority (PoA) // Advances in Computers. 2019.

Zheng Zibin, Xie Shaoan, Dai Hongning, Chen Xiangping, Wang Huaimin. An Overview of Blockchain Technology: Architecture, Consensus, and Future Trends // 2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress). 2017. 557–564.

APÊNDICE A

AVALIAÇÃO DO NÍVEL DE MATURIDADE TECNOLÓGICA (TRL) DO MODELO DESCENTRALIZADO

A avaliação do Nível de Maturidade Tecnológica **TRL** é uma metodologia utilizada para medir o grau de desenvolvimento e maturidade de uma tecnologia, desde sua concepção até sua implementação no mercado. O TRL é composto por nove níveis distintos, que vão desde a pesquisa básica até a aplicação operacional plena. Essa estrutura permite a identificação do estágio em que a tecnologia se encontra, bem como dos próximos passos necessários para sua evolução e aplicação prática [Bergamini \(2020\)](#).

Neste contexto, a avaliação realizada indicou que o modelo descentralizado desenvolvido atingiu o nível TRL 6, o que significa que a tecnologia já foi demonstrada com sucesso em um ambiente relevante, embora ainda não tenha sido amplamente validada em condições reais de operação. Isso evidencia um estágio intermediário de maturidade tecnológica, conforme detalhado a seguir:

- **TRL 1-3 (Pesquisa básica e conceitual):** Foram cumpridos na etapa inicial com a identificação e caracterização do problema de mobilidade urbana e a definição dos conceitos fundamentais da tecnologia *blockchain* e *MaaS*.
- **TRL 4-5 (Prova de conceito e validação em ambiente laboratorial):** Alcançados com a criação e testes preliminares que utilizaram *Smart Contracts*, do aplicativo móvel e da integração com ferramentas como *MetaMask*, *Ethereum* e *AWS*. Esses resultados confirmam a viabilidade técnica e operacional da proposta.
- **TRL 6 (Demonstração em ambiente relevante):** Representa o nível atual do estudo, no qual o protótipo do modelo descentralizado foi testado com usuários reais em ambiente controlado (*testnet da Binance Smart Chain*), com resultados satisfatórios em termos de desempenho e segurança.
- **TRL 7-9 (Validação operacional e comercialização):** Ainda não atingidos, pois requerem testes mais extensivos em ambientes reais e ajustes adicionais para viabilização comercial.