

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
IFPB - CAMPUS CAMPINA GRANDE
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

LUCAS ALVES FIDELIS ARAÚJO
LUIZ EDUARDO BRONZEADO PESSOA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MODELAGEM DE PADRÕES DE MOBILIDADE URBANA:
APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE EMBARQUE E
DESEMBARQUE EM SISTEMAS DE TRANSPORTE NA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE**

Campina Grande
2025

**MODELAGEM DE PADRÕES DE MOBILIDADE URBANA:
APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE EMBARQUE E
DESEMBARQUE EM SISTEMAS DE TRANSPORTE NA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE**

**LUCAS ALVES FIDELIS ARAÚJO LUIZ
EDUARDO BRONZEADO PESSOA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso Engenharia de Computação, do Instituto Federal da Paraíba – Campus Campina Grande, em cumprimento às exigências parciais para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Computação.

ORIENTADOR: PAULO RIBEIRO LINS JUNIOR

Campina Grande
2025

Catálogo na fonte:

Ficha catalográfica elaborada por Gustavo César Nogueira da Costa - CRB 15/479

A662m Araújo, Lucas Alves Fidelis

Modelagem de padrões de mobilidade urbana: aplicação da análise de embarque e desembarque em sistemas de transporte na cidade de Campina Grande / Lucas Alves Fidelis Araújo, Luiz Eduardo Bronzeado Pessoa. - Campina Grande, 2025.

35 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Superior de Engenharia de Computação) - Instituto Federal da Paraíba, 2025.

Orientador: Prof. Paulo Ribeiro Lins Júnior.

1. Mobilidade urbana - transporte público 3. Transporte público - Planejamento de transporte 4. Modelagem de dados I. Pessoa, Luiz Eduardo Bronzeado II. Lins Júnior, Paulo Ribeiro II. Título.

CDU 621.39

Agradecimentos

Agradecimentos - Luiz Eduardo Bronzeado Pessoa

Agradeço a Deus, pela luz que foi o guia na minha caminhada, por nunca ter me desamparado, e me ajudou a perseverar na realização do meu sonho.

À “mainha”, Jucélia Taysa, por todo o carinho e apoio, que foram combustível para seguir em frente na minha jornada. Obrigado por sempre confiar em mim. Eu te amo!

A “painho”, Evaldo Pessoa, por todos os conselhos e esforços, que foram importantes para formar a pessoa que eu sou hoje. Eu te amo!

À minhas irmãs, Maria Luiza e Thayse Maria, por todas as noites alegres, por todas as risadas, por todo o companheirismo, por toda a preocupação, muito obrigado! Eu amo vocês!

Aos companheiros de curso, por todas as amizades que fiz nessa jornada, por todos os momentos de descontração, que ajudaram a tornar tudo mais leve e tranquilo.

A professora Iana Daya e para a Empresa Júnior (EJTECS), pela oportunidade de participar de um projeto, conhecer novas pessoas, conhecer mais do mercado de trabalho.

A todos, meu muito obrigado.

Agradecimentos - Lucas Alves Fidelis Araújo

Agradeço primeiramente a Deus, que me deu sabedoria, me abençoou em toda minha vida, e me deu perseverança para nunca desistir dos meus objetivos.

Agradeço aos meus maravilhosos pais, Irenaldo e Cida, que me ensinam, me amam, e que me mostram como o conhecimento é importante na vida. Agradeço por todos os momentos de apoio desde o início da minha vida. Encerro esta etapa importantíssima com a certeza que não estou realizando um sonho apenas meu, mas dessas duas pessoas que eu amo incondicionalmente.

À minha namorada, Bianca Nogueira, que no momento ainda leva o título de namorada, mas muito em breve ganhará o título de noiva, e depois esposa. Companheira da minha vida, dona do meu coração, luz dos meus olhos. Seremos muito felizes com um gatinho laranja, nossa casinha e o Palio na garagem. Eu te amo muito!

Agradeço também a todos os meus colegas e amigos. Todos vocês deixaram essa etapa mais leve, mas em especial, muito obrigado aos meus colegas de curso, que sempre me inspiraram a evoluir e aprender mais na área. Agradeço também os meus colegas de trabalho na Bus2, que sempre me ajudaram quando eu tinha alguma dúvida sobre o tema, e que sempre me ensinam com muita atenção qualquer outro assunto. Muito obrigado!

Por fim, agradeço ao IFPB e a todos os professores que fizeram parte da minha jornada, sempre oferecendo ensino público de qualidade nesses 8 anos que eu passei na instituição.

Vencer sem correr riscos é triunfar sem glórias
Ayrton Senna

Resumo

Este trabalho investiga a aplicação da análise de Embarque/Desembarque como ferramenta para aprimorar a eficiência operacional do transporte público em Campina Grande. O estudo aborda a integração de dados de bilhetagem eletrônica e monitoramento veicular, permitindo a inferência precisa dos fluxos de passageiros e a identificação de padrões de mobilidade. A metodologia empregada inclui técnicas como encadeamento de viagens, viagem espelho e modelagem de matrizes Origem-Destino (OD), possibilitando a mensuração detalhada da demanda e o mapeamento de zonas críticas de deslocamento.

Os resultados demonstram que a abordagem proposta favorece a otimização dos recursos disponíveis, permitindo ajustes operacionais estratégicos, como a redistribuição da frota e a adequação da frequência das viagens. A análise quantitativa revelou que a implementação dessas técnicas pode reduzir a ociosidade de veículos em horários de baixa demanda e minimizar a superlotação em períodos de pico, promovendo um equilíbrio mais eficiente entre oferta e demanda.

Além da eficiência operacional, este estudo reforça a importância da utilização de tecnologias integradas para melhorar a acessibilidade e a qualidade do serviço prestado aos usuários. A análise dos padrões de mobilidade urbana contribui para a formulação de políticas públicas mais assertivas, direcionadas à criação de um sistema de transporte mais sustentável e responsivo às necessidades da população. Assim, a pesquisa evidencia o papel fundamental da análise de dados na modernização do transporte coletivo e na construção de cidades mais inteligentes.

Abstract

This paper investigates the application of Boarding/Alighting analysis as a tool to improve the operational efficiency of public transportation in Campina Grande. The study addresses the integration of electronic ticketing and vehicle monitoring data, allowing for the accurate inference of passenger flows and the identification of mobility patterns. The methodology used includes techniques such as trip chaining, mirror trips, and Origin-Destination (OD) matrix modeling, enabling detailed measurement of demand and mapping of critical travel zones.

The results demonstrate that the proposed approach favors the optimization of available resources, allowing for strategic operational adjustments, such as fleet redistribution and adjustment of trip frequency. The quantitative analysis revealed that the implementation of these techniques can reduce vehicle idleness during low-demand periods and minimize overcrowding during peak periods, promoting a more efficient balance between supply and demand.

In addition to operational efficiency, this study reinforces the importance of using integrated technologies to improve accessibility and the quality of service provided to users. The analysis of urban mobility patterns contributes to the formulation of more assertive public policies, aimed at creating a more sustainable transport system that is responsive to the needs of the population. Thus, the research highlights the fundamental role of data analysis in the modernization of public transport and in the construction of smarter cities.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Fluxograma	15
Figura 2 – Variação de FR nas linhas de ônibus de Campina Grande	27
Figura 3 – Ocupação média no transporte público de Campina Grande	28
Figura 4 – Mapa de calor mostrando os principais pontos de desembarque na área central de Campina Grande	29
Figura 5 – Mapa de calor mostrando os principais pontos de desembarque nos bairros das Malvinas e Dinamérica	30

Lista de tabelas

Tabela 1 – OD (Origem/Destino)	20
Tabela 2 – Viagem Espelho	21

Sumário

1	Introdução	9
2	Importância da tecnologia no transporte público	10
2.1	Eficiência Operacional	10
2.2	Acessibilidade e conectividade	10
2.3	Experiência do usuário	10
3	Fundamentação teórica	12
3.1	Como estimar o cálculo de Embarque/Desembarque	12
3.2	Métodos de cálculo	13
4	Metodologia	15
4.1	Importação da base	16
4.2	Tratando a base	17
4.3	Criação da tabela origem-destino (OD)	18
4.3.1	Exemplo prático:	19
4.4	Criação da tabela viagem espelho	20
4.4.1	Exemplo prático:	21
4.5	Tratamento para geração de análise de Embarque/Desembarque . .	21
4.6	Métricas de validação	23
4.6.1	Fator de Renovação (FR)	23
4.6.2	Métricas complementares	24
4.7	Tecnologias Utilizadas	25
5	Resultados	26
5.1	Análise do FR	26
5.2	Evolução da ocupação média por horário	27
5.3	Taxa de consistência espacial	28
6	Conclusão	31
6.1	Alcance do objetivo final	32
6.2	Considerações finais	32
7	Referências	34

1 Introdução

A mobilidade urbana é um elemento essencial para o funcionamento das cidades, influenciando diretamente a qualidade de vida da população e a eficiência dos serviços públicos. No Brasil, estudos indicam que os cidadãos gastam, em média, 1h30 por dia em deslocamentos urbanos (IBGE, 2021), o que reforça a necessidade de um transporte público eficiente. No entanto, a gestão desses sistemas enfrenta desafios significativos, como o desalinhamento entre a oferta e a demanda, resultando em superlotação nos horários de pico e subutilização da frota em períodos de baixa demanda. (GOMIDE; GALINDO, 2013) Além disso, a alocação inadequada de veículos e a falta de dados precisos comprometem a qualidade do serviço prestado à população.

Atualmente, a tomada de decisão no transporte público frequentemente se baseia em informações limitadas, o que dificulta a implementação de melhorias efetivas. A ausência de análises detalhadas sobre o fluxo de passageiros em nível local agrava esse cenário, tornando essencial a aplicação de metodologias baseadas em dados. Nesse contexto, a análise de Embarque/Desembarque surge como uma ferramenta estratégica, permitindo mensurar os fluxos de passageiros em cada ponto de parada e identificar padrões de deslocamento, detalhando cada viagem. Técnicas como a modelagem de matrizes Origem-Destino (OD), a inferência de desembarques por viagem espelho e a integração de dados de bilhetagem eletrônica e monitoramento veicular oferecem novas possibilidades para aprimorar a gestão do transporte público, e melhorar a operação para os usuários de transporte público.

Diante desse panorama, este estudo tem como objetivo avaliar como a análise de Embarque/Desembarque pode contribuir para a otimização do transporte público em Campina Grande. Para isso, são utilizados dados reais da cidade, integrando diferentes fontes de informação para uma avaliação detalhada da mobilidade urbana. O trabalho busca responder às seguintes questões centrais: como os padrões de deslocamento podem ser inferidos de maneira mais precisa? Quais ajustes operacionais podem ser implementados com base nesses dados? E, finalmente, quais impactos essa abordagem pode gerar na eficiência e acessibilidade do sistema de transporte público?

Ao longo deste estudo, serão exploradas metodologias inovadoras para análise de fluxo de passageiros, demonstrando como a integração de tecnologias e dados pode contribuir para a melhoria contínua dos sistemas de transporte urbano. Dessa forma, espera-se que os resultados obtidos sirvam de base para futuras iniciativas na área, promovendo um transporte mais eficiente, sustentável e adequado às necessidades da população.

2 Importância da tecnologia no transporte público

A adoção de tecnologias no transporte público tem sido um fator determinante para a modernização e a otimização dos sistemas urbanos de mobilidade. Com desafios como congestionamentos, ineficiência na alocação de recursos e a necessidade de oferecer um serviço acessível e confiável, a tecnologia surge como um elemento estratégico para superar essas barreiras. Estudos apontam que sistemas de transporte inteligentes podem reduzir em até 20% os tempos de deslocamento e melhorar a eficiência operacional em grandes centros urbanos (Vuchic, 2005). Essas tecnologias possibilitam a busca por soluções que otimizam a operação desses sistemas, sendo fundamentais em três pilares principais:

2.1 Eficiência Operacional

A eficiência operacional é uma das áreas mais impactadas pela aplicação da tecnologia no transporte público. Estudos como o de Silveira e Cocco (2013), demonstram que a gestão baseada em análise de dados permite identificar gargalos operacionais e propor ajustes que otimizem o uso de recursos, como combustível e frota. Esses avanços possibilitam não apenas a redução de custos, mas também a melhoria na oferta de serviços, como tempos de espera reduzidos e maior confiabilidade nas operações.

2.2 Acessibilidade e conectividade

O avanço tecnológico também tem um impacto significativo na acessibilidade e na conectividade do transporte público. Aplicativos móveis e sistemas de informação em tempo real oferecem aos passageiros maior previsibilidade sobre horários e lotação dos veículos, facilitando o planejamento dos deslocamentos. Além disso, a integração de diferentes modais, viabilizada por bilhetagem eletrônica e plataformas digitais, permite deslocamentos mais eficientes e inclusivos, beneficiando usuários com necessidades especiais e promovendo a intermodalidade urbana (Silveira & Cocco, 2013).

2.3 Experiência do usuário

A implementação de meios de pagamento digitais, como cartões contactless e aplicativos, reduz filas e agiliza o embarque. Além disso, o acesso a informações em tempo real sobre as condições do sistema permite que os passageiros tomem decisões mais informadas, minimizando atrasos e tornando a viagem mais confortável (Rubim & Leitão, 2013). A personalização do serviço, com recomendações baseadas em padrões de deslocamento, também contribui para uma experiência mais satisfatória.

Diante desses aspectos, fica evidente que a tecnologia desempenha um papel fundamental na transformação do transporte público, tornando-o mais eficiente, acessível

e orientado às necessidades dos usuários. No entanto, para que essas melhorias sejam efetivas, é essencial que haja investimentos contínuos e uma integração adequada entre as soluções tecnológicas e a infraestrutura existente, garantindo que os benefícios se convertam em um serviço de maior qualidade para a população.

Tendo em vista os desafios apresentados, o objetivo geral deste trabalho é otimizar a operação do transporte público urbano, promovendo maior eficiência, acessibilidade e sustentabilidade, além de melhorar a experiência dos usuários., utilizando análise de dados. Neste trabalho, busca-se não apenas compreender os desafios operacionais do transporte público, mas também propor soluções práticas que otimizem sua eficiência e atendam às demandas reais dos usuários. Assim, foram definidos os seguintes objetivos, que alinham a metodologia proposta às necessidades atuais de mobilidade urbana:

- 1) Mapear padrões de embarque e desembarque: Desenvolver uma análise detalhada do comportamento dos passageiros, identificando horários de pico, zonas críticas e pontos de maior e menor demanda.
- 2) Integrar fontes de dados complementares: Realizar a fusão entre dados de bilheta-gem eletrônica e históricos de monitoramento veicular, garantindo maior precisão na inferência de trajetos e fluxos.
- 3) Aplicar metodologias avançadas: Implementar a técnica de viagem espelho e outras abordagens complementares para superar a falta de registros diretos de desembar-que e melhorar as estimativas de deslocamento.
- 4) Criar matrizes origem-destino (OD): Técnica de encadeamento de viagens que permite gerar o cálculo de origens e destinos, onde a validação subsequente é consi-derada o desembarque da validação anterior. Isso permite estruturar as informações obtidas em tabelas que representem fluxos de passageiros entre diferentes áreas da cidade, subsidiando decisões de planejamento e gestão.
- 5) Avaliar os impactos operacionais: Medir os efeitos das soluções propostas na efici-ência do sistema, na alocação de recursos e na satisfação dos usuários, buscando fornecer recomendações práticas para gestores e operadores.

Esses objetivos estão interligados, formando um caminho lógico que parte da coleta e integração de dados, passa pela aplicação de técnicas analíticas e culmina em resultados práticos que contribuem para a melhoria do transporte público. Dessa forma, o trabalho não só responde aos desafios da mobilidade urbana, mas também estabelece uma base para futuras iniciativas na área.

3 Fundamentação teórica

O transporte público desempenha um papel fundamental na mobilidade urbana, permitindo o deslocamento eficiente da população entre diferentes regiões das cidades. Para otimizar a operação desse sistema, é essencial compreender os padrões de embarque e desembarque de passageiros. A análise desses fluxos possibilita o ajuste da oferta de transporte à demanda real, melhorando a qualidade do serviço e promovendo um uso mais eficiente dos recursos (VUCHIC, 2005).

Dentre as principais ferramentas utilizadas para essa análise, destacam-se os dados de bilhetagem eletrônica e rastreamento veicular via GPS, que permitem inferir os deslocamentos dos usuários. Entretanto, a maioria dos sistemas de transporte não registra explicitamente os locais de desembarque, tornando necessária a aplicação de métodos de inferência baseados em padrões de uso do sistema (FERREZ; TORRES, 2004).

3.1 Como estimar o cálculo de Embarque/Desembarque

Compreender as dinâmicas de embarque e desembarque é fundamental para o aprimoramento dos serviços de transporte público. Esse tipo de análise permite identificar padrões de demanda, horários de pico, zonas de maior e menor fluxo, e gargalos operacionais. Além disso, fornece subsídios para a tomada de decisões estratégicas, como a redistribuição de frota, ajustes de itinerários e frequências, contribuindo para uma operação mais eficiente e alinhada às necessidades dos usuários. Neste trabalho, exploraremos em detalhe a aplicação desse cálculo, avaliando variações de demanda em linhas ou grupos de linhas por meio de análises baseadas em dados. O objetivo é demonstrar como essa metodologia pode ser empregada para melhorar a alocação de recursos e promover a eficácia dos sistemas de transporte coletivo.

A estimação desse cálculo pode ser realizada em diferentes etapas, que incluem:

- 1) Coleta de Dados: Os registros de embarque são coletados diretamente pelos validadores eletrônicos, enquanto as posições dos veículos são monitoradas por sistemas de rastreamento, como GPS. Esses dados incluem o horário de embarque, o veículo utilizado e, em alguns casos, o ponto exato de validação.
- 2) Encadeamento de Viagem: Na ausência de validações de bilhetes no momento do desembarque, o local de descida é estimado com base na sequência de viagens de cada passageiro. Assume-se que o desembarque ocorre no ponto mais próximo do início da próxima viagem registrada. Para os passageiros cuja viagem termina sem um novo embarque no mesmo dia, considera-se o ponto final da linha ou o ponto mais provável com base em padrões históricos.

- 3) Tratamento de Dados: Após a coleta, os dados são organizados e tratados para corrigir inconsistências, como registros duplicados ou informações ausentes. Nessa etapa, também é verificado se o encadeamento é válido. Exemplo: Se duas linhas não se cruzam, o destino, da primeira viagem não pode ser o embarque da segunda viagem. Essa etapa é essencial para garantir a confiabilidade das estimativas.
- 4) Análise e Consolidação: Os dados de embarques e desembarques são agregados para cada ponto de parada e viagem, resultando em uma tabela detalhada que descreve os fluxos de passageiros ao longo do trajeto.

3.2 Métodos de cálculo

Existem diversas abordagens para realizar análises de embarque e desembarque no transporte público, sendo o método de encadeamento de viagens uma das mais amplamente utilizadas. Conforme descrito por Vuchic (2005), esse método utiliza dados de cartões inteligentes e sistemas de contagem automática para inferir os destinos com base nos pontos de embarque e desembarque registrados. Ele é valorizado por sua simplicidade e aplicabilidade no planejamento de redes de transporte público eficientes, permitindo modelar os padrões de deslocamento dos passageiros. Contudo, essa abordagem apresenta limitações, especialmente em viagens não conectadas, onde não é possível relacionar o desembarque ao próximo embarque diretamente. Nesses casos, modelagens mais sofisticadas, como o método de viagem espelho, são necessárias para obter maior precisão, sendo essas técnicas detalhadas ao longo deste estudo. Além disso, análises adicionais são frequentemente realizadas para ajustar os dados provenientes da bilhetagem eletrônica com os sistemas de monitoramento veicular, assegurando maior consistência e confiabilidade das informações.

A união entre os dados de validação dos cartões de bilhetagem e os dados de posicionamento dos veículos é fundamental para examinar o embarque unitário de passageiros. Essa integração utiliza softwares especializados para cruzar informações de tempo e localização. Quando um passageiro passa o cartão no validador ao embarcar, o sistema registra a hora exata e o ponto de validação. Simultaneamente, o sistema de GPS do veículo coleta informações sobre sua posição ao longo do percurso. Em alguns casos, quando os sistemas de bilhetagem não registram o local do embarque, utiliza-se a sincronização pelo horário. Nesse processo, os sistemas de bilhetagem e GPS são ajustados temporalmente, permitindo inferir, com base no momento exato do embarque, o local em que o veículo estava naquele instante. Após essa sincronização, os dados coletados são armazenados em um banco de dados central, que combina as informações de embarques, desembarques e localizações em tempo real, criando um histórico detalhado e integrado.

A análise para criar o encadeamento de viagens no transporte público envolve o estudo detalhado das trajetórias que os passageiros realizam em sequência, considerando

as transferências entre diferentes linhas ou modos de transporte. O sistema de bilhetagem eletrônica registra os embarques e, em alguns casos, os desembarques. Essas informações incluem o horário, o ponto de embarque e a linha utilizada. Em cidades que utilizam bilhete único ou sistemas de integração tarifária, é possível identificar quando um passageiro passa o cartão novamente em outro veículo dentro de um intervalo de tempo razoável, indicando que o novo embarque faz parte de uma mesma jornada.

Por meio desses registros, o software analisa as validações para identificar transferências, utilizando critérios de proximidade espacial e temporal. Por exemplo, se um passageiro valida o cartão em um novo ponto em um curto intervalo de tempo e próximo ao local onde ele desembarcou, essa nova validação é considerada uma continuação da viagem anterior. Com base nessas informações, o sistema reconstrói a jornada completa do passageiro, conectando as etapas de suas viagens consecutivas e mapeando os trajetos mais frequentes.

A partir desse encadeamento de viagens, padrões de deslocamento são analisados, como as rotas mais utilizadas, os horários de maior movimentação e os locais onde há maior número de trocas de veículos. Essa abordagem fornece uma visão ampla das dinâmicas de mobilidade urbana, permitindo que os gestores identifiquem gargalos, otimizem as rotas e ajustem as frequências de acordo com a demanda.

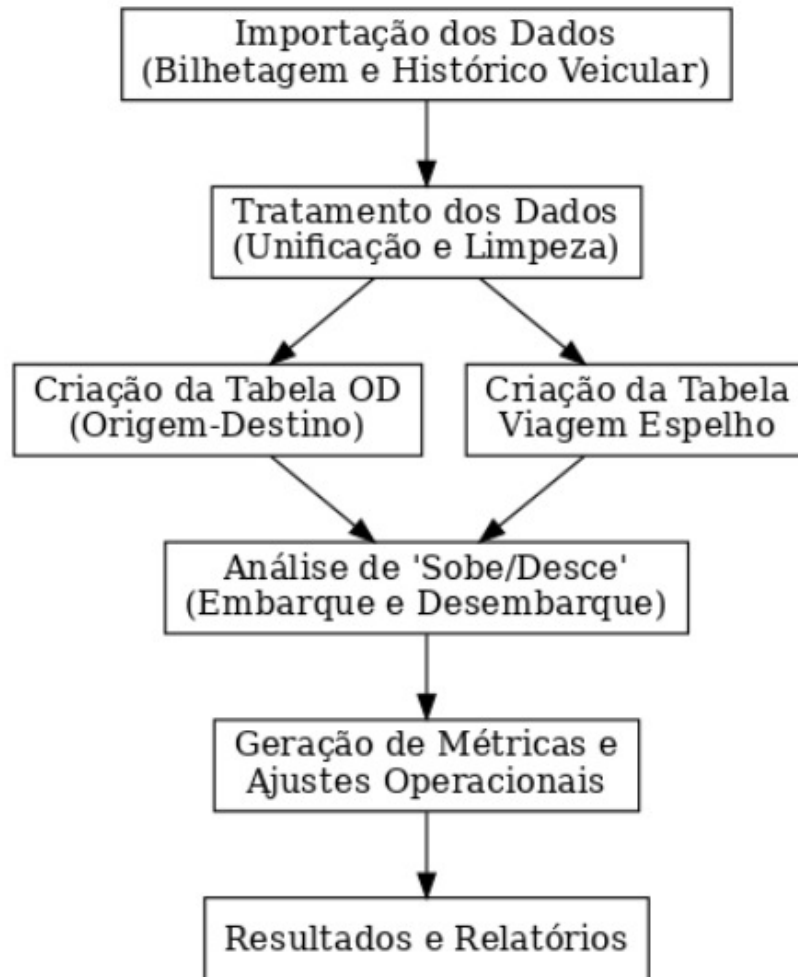
O método de viagem espelho complementa essas análises e é amplamente utilizado na construção de matrizes Origem-Destino (OD). Baseia-se no princípio de que o ponto de desembarque de um passageiro em uma viagem será, geralmente, o ponto de embarque de sua viagem de retorno. Esse método é especialmente útil em sistemas onde não há validação direta de bilhetes no momento do desembarque, como ocorre em bilhetagens não integradas. Utilizando os registros de embarques anteriores como referência, o método de viagem espelho permite inferir, com elevado grau de confiabilidade, os fluxos de passageiros entre diferentes pontos da cidade, contribuindo para um planejamento estratégico mais eficiente.

Ao longo deste trabalho, essas metodologias são exploradas em profundidade, demonstrando como elas podem ser aplicadas para melhorar a qualidade do transporte público e oferecer subsídios para uma gestão mais eficaz dos recursos.

4 Metodologia

Para a análise, foi seguido este fluxo:

Figura 1 – Fluxograma



Após a apresentação do fluxograma, que fornece uma visão geral estruturada das etapas da metodologia, passamos agora à descrição detalhada de cada uma dessas fases. Cada etapa desempenha um papel fundamental na análise e otimização do transporte público, desde a coleta e o tratamento inicial dos dados até a geração de métricas e a proposição de ajustes operacionais.

Essa abordagem sequencial garante a transformação de dados brutos em informações estratégicas, permitindo uma compreensão mais aprofundada das dinâmicas de embarque e desembarque, bem como o planejamento de ações para melhorar a eficiência do sistema. A seguir, discutiremos cada etapa apresentada no fluxograma, destacando seus objetivos, processos e contribuições para os resultados finais do estudo.

4.1 Importação da base

Para realizar a análise proposta neste estudo, foi necessário importar e integrar duas bases de dados principais: os registros de bilhetagem eletrônica dos passageiros e o histórico de posições dos veículos. Esses dados foram coletados a partir do sistema de transporte público da cidade de Campina Grande, proporcionando uma visão detalhada do fluxo de passageiros e do funcionamento operacional da frota no dia analisado.

Origem dos dados

Os dados utilizados na análise provêm de duas fontes principais: a base de bilhetagem eletrônica e o histórico de posições dos ônibus. O período analisado compreende um intervalo de 1 mês abrangendo o período entre 08 de outubro de 2024 e 06 de novembro de 2024, permitindo uma avaliação detalhada dos padrões de deslocamento ao longo do tempo.

A base de bilhetagem eletrônica contém registros das validações de cartões realizadas pelos passageiros ao embarcarem nos veículos. Esses dados são coletados pelos validadores instalados nos ônibus e incluem informações como a identificação do cartão (anonimizada para garantir a privacidade dos usuários), a linha utilizada, o horário do embarque e o tipo de usuário (como estudante, idoso ou trabalhador). Esses registros são fornecidos pelas operadoras do sistema de transporte público e permitem a inferência da demanda por linha e horário.

Já a base de histórico de posições dos ônibus é gerada pelos sistemas de rastreamento embarcados nos veículos, que utilizam tecnologia GPS para registrar a localização dos coletivos em intervalos regulares de tempo. Esse conjunto de dados inclui informações como o identificador do veículo, latitude e longitude, horário da coleta e velocidade e status operacional do ônibus. Os dados são extraídos dos servidores das operadoras e consolidam uma visão detalhada do comportamento da frota em circulação.

A integração dessas duas bases de dados permite inferir, com precisão, os padrões de embarque e desembarque dos passageiros, bem como a eficiência da operação do transporte público no período analisado.

Características dos dados

Os dados utilizados apresentam algumas particularidades importantes:

- **Granularidade Temporal:** As validações de bilhetagem ocorrem em tempo real durante os embarques, enquanto os registros de posição dos veículos são coletados em intervalos regulares, geralmente a cada poucos segundos ou minutos. Os registros são coletados em intervalos regulares para equilibrar a precisão do monitoramento,

reduzir a carga de comunicação e processamento, otimizar o armazenamento de dados e garantir um acompanhamento eficiente da movimentação dos veículos sem sobrecarregar os sistemas.

- **Distribuição Espacial:** Os registros de bilhetagem refletem a demanda dos passageiros em diferentes pontos da cidade, enquanto os dados de GPS indicam a movimentação dos veículos ao longo das rotas.
- **Associação Indireta entre Embarque e Desembarque:** Como o sistema de bilhetagem registra apenas os embarques, a inferência dos desembarques é realizada com base na análise dos padrões de viagem dos passageiros, correlacionando os embarques subsequentes e os deslocamentos dos veículos.
- **Possíveis Inconsistências:** A integração das duas bases exige tratamento prévio para corrigir problemas como diferenças de formato, registros duplicados, informações ausentes ou discrepâncias temporais.

A partir da fusão dessas bases de dados, foi possível criar um conjunto unificado que serviu de base para as análises subsequentes, permitindo identificar padrões de deslocamento, fluxos de passageiros e pontos críticos de demanda no transporte público de Campina Grande.

4.2 Tratando a base

A integração entre os dados de bilhetagem e o histórico de posições dos veículos é um processo essencial para analisar e compreender o funcionamento do sistema de transporte público. Essa união permite relacionar informações de demanda, obtidas por meio da bilhetagem, com dados operacionais extraídos do histórico de posições dos veículos, criando uma base rica para análises que podem apoiar a gestão e a otimização do transporte.

Os dados de bilhetagem, coletados por validadores eletrônicos, incluem informações como a identificação do cartão utilizado (devidamente anonimizado para garantir a proteção de dados), a data e o horário da validação, o código da linha ou do veículo associado à viagem. Esses registros refletem diretamente a demanda do sistema, indicando os momentos e locais de maior fluxo de passageiros. Por outro lado, o histórico de posições dos veículos é gerado por sistemas de rastreamento, como GPS, e fornece registros contínuos da localização dos ônibus ao longo do tempo. Esses dados incluem informações como a identificação do veículo, coordenadas de latitude e longitude, horário do registro e, em alguns casos, dados adicionais como velocidade e direção. Essa base ajuda a compreender o desempenho operacional, identificando tempos de viagem, regularidade e cumprimento de horários.

A integração entre essas duas bases é realizada utilizando como chaves de correlação os identificadores dos veículos e os intervalos de tempo. A identificação do veículo permite vincular a bilhetagem ao correspondente histórico de posições, enquanto o horário da validação do bilhete é associado à posição mais próxima registrada pelo GPS. Para garantir a precisão dessa associação, utiliza-se frequentemente a interpolação linear, que estima a localização do veículo no momento exato da validação com base nos registros de posição imediatamente anterior e posterior ao horário em questão. Dessa forma, é possível gerar uma base consolidada onde cada validação está vinculada a uma posição geográfica aproximada, facilitando a análise de padrões de uso, como os pontos de maior demanda e os horários de pico.

Esse processo, no entanto, apresenta desafios que precisam ser tratados. Muitas vezes, as bases de dados apresentam inconsistências, como diferenças nos formatos ou padrões dos registros, horários desajustados entre os sistemas, dados faltantes ou *outliers* no histórico de posições. Assim, é necessário aplicar rotinas de limpeza e validação, corrigindo problemas como registros duplicados, inconsistências temporais e disparidades nos fusos horários. Esse tratamento é essencial para garantir a qualidade e a confiabilidade da base integrada.

Com a base unificada, é possível realizar análises detalhadas do comportamento dos passageiros e do desempenho do sistema, como identificar gargalos operacionais, mapear os pontos de maior demanda e os horários de maior fluxo, além de subsidiar decisões para ajustes de linhas e horários. Essa integração, portanto, é um passo indispensável para transformar dados brutos em informações estratégicas que contribuam para a melhoria do transporte público na cidade.

4.3 Criação da tabela origem-destino (OD)

Após realizar o tratamento e a integração das bases de bilhetagem e histórico de posições, o próximo passo é criar a tabela de Origem-Destino (OD), que fornece uma visão estruturada sobre os deslocamentos dos passageiros dentro do sistema de transporte. Essa tabela é construída a partir da identificação das sequências de embarques e desembarques, inferindo os pontos de origem e destino de cada viagem com base nos dados consolidados. O processo começa pela análise cronológica dos registros de bilhetagem de cada usuário. Como os sistemas de transporte público geralmente registram apenas o local de embarque, o destino precisa ser inferido. Para isso, assume-se que o ponto de destino de uma viagem corresponde ao local do próximo embarque do mesmo cartão, considerando que, após desembarcar, o usuário realiza outra validação ao iniciar uma nova viagem. Essa abordagem permite identificar padrões individuais de deslocamento, desde que os dados sejam analisados em um período contínuo.

A construção da tabela OD exige um tratamento adicional para lidar com exceção

e inconsistências. Por exemplo, em casos onde o intervalo entre duas validações é muito grande, pode-se concluir que a segunda validação não está relacionada à primeira viagem, tratando-a como o início de um novo ciclo. Da mesma forma, registros isolados, onde não há uma validação subsequente no mesmo dia, são marcados como viagens incompletas e podem ser descartados ou analisados separadamente. Viagens incompletas são descartadas quando os dados são insuficientes para inferir um padrão confiável de deslocamento, como no caso de um único registro isolado sem possibilidade de associação a outra viagem. Já são analisadas separadamente quando há indícios de deslocamentos atípicos ou inconsistências que possam fornecer *insights* relevantes, como viagens esporádicas ou interrupções inesperadas no trajeto.

Uma vez identificados os pares de origem e destino para cada viagem, as informações são agregadas em uma tabela que descreve o fluxo entre diferentes zonas ou pontos de interesse na cidade. Cada registro da tabela OD contém, no mínimo, as seguintes informações: o ponto de origem (geralmente identificado por uma coordenada ou uma zona de transporte), o ponto de destino, o ID da viagem e o horário de validação do passageiro no ponto de origem. Além disso, é possível incluir dados adicionais, como a linha ou rota utilizada e a latitude e longitude do ponto de origem e destino, caso essas informações estejam disponíveis.

Essa tabela é essencial para análises de planejamento urbano e operacional. Ela permite identificar padrões de deslocamento, como as zonas mais conectadas ou sobrecarregadas, horários de maior demanda e principais rotas utilizadas pelos passageiros. Com isso, gestores podem tomar decisões fundamentadas para ajustar itinerários, horários e até mesmo propor mudanças na infraestrutura de transporte. Assim, a criação da tabela OD, a partir de bases tratadas e integradas, transforma dados dispersos em informações estruturadas, que servem de base para melhorias no sistema de transporte público.

4.3.1 Exemplo prático:

Suponha que um passageiro utilize o cartão de transporte e registre embarques nos seguintes horários e locais:

- 07:30 - Ponto A
- 12:15 - Ponto C
- 18:00 - Ponto A

Como os sistemas de bilhetagem geralmente registram apenas o local de embarque, o destino de cada viagem precisa ser inferido. Assim, assumimos que o destino da primeira viagem (07:30 na Ponto A) é o Ponto C, pois é o local do próximo embarque. Da mesma forma, o destino da viagem das 12:15 é o Ponto A, onde ocorre a próxima validação.

Dessa forma, a tabela OD resultante conteria os seguintes registros:

Tabela 1 – OD (Origem/Destino)

ID da Viagem	Origem	Destino	Horário
1	Ponto A	Ponto C	07:30
2	Ponto C	Ponto A	12:15
3	Ponto A	-	18:00

Neste caso, a última viagem fica incompleta, pois não há um novo embarque registrado.

4.4 Criação da tabela viagem espelho

O método de viagem espelho é uma técnica utilizada para criar matrizes Origem-Destino (OD) em sistemas de transporte público, especialmente quando os dados disponíveis não fornecem uma ligação direta entre embarques e desembarques. Diferente do método de encadeamento de viagens, que analisa a jornada individual do passageiro, a viagem espelho examina o comportamento agregado da viagem.

Essa abordagem parte da premissa de que o volume de passageiros embarcando em um sentido tende a ser refletido no volume de passageiros embarcando no sentido oposto dentro de um intervalo de tempo razoável. Por exemplo, se uma linha X transporta 50 passageiros pela manhã em direção ao centro da cidade, espera-se que um número próximo de passageiros retorne utilizando a mesma linha no sentido oposto no período da tarde. Esse padrão permite inferir prováveis pontos de desembarque mesmo sem registros diretos.

Após a identificação dos pares de viagens espelho, as informações são consolidadas em uma tabela. Cada linha da tabela representa um par de viagens, contendo os seguintes campos principais:

- Partida planejada: O horário de início planejado da viagem inicial
- ID: O marcador único da viagem inicial (Geralmente formado como sendo Número da rota + Sentido + Horário planejado de início)
- Sentido: O sentido da viagem inicial
- ID Espelho: O marcador único da viagem espelho escolhida (Geralmente formado como sendo Número da rota + Sentido + Horário planejado de início)
- Sentido Espelho: O sentido da viagem espelho

Além disso, é importante validar a consistência dos pares identificados, descartando casos em que o intervalo entre as viagens é muito curto ou excessivamente longo, o que pode indicar erros na inferência. Outros ajustes incluem tratar registros faltantes, evitar associações inválidas e considerar padrões específicos, como usuários que não retornam no mesmo dia.

A tabela de viagem espelho, construída a partir desse processo, serve como uma base para criar matrizes OD mais detalhadas e confiáveis, permitindo uma melhor compreensão dos padrões de deslocamento dos passageiros. Essa abordagem é particularmente eficaz para análises de demandas regulares, como viagens casa-trabalho ou casa-escola, e contribui para o planejamento de rotas, ajustes na frequência dos veículos e melhorias no serviço de transporte público.

4.4.1 Exemplo prático:

Se um passageiro realiza a seguinte sequência de embarques:

- 07:00 - Linha 245, Sentido Centro
- 18:00 - Linha 245, Sentido Bairro

Pode-se inferir que a primeira viagem é a “ida” e a segunda viagem é o “retorno”. Assim, a tabela de viagem espelho será:

Tabela 2 – Viagem Espelho

ID Viagem	Partida Planejada	Sentido	ID Espelho	Sentido Espelho
1	07:00	Centro	2	Bairro
2	18:00	Bairro	1	Centro

Com essa técnica, é possível aprimorar a análise de deslocamentos regulares, contribuindo para um planejamento de transporte mais eficiente.

4.5 Tratamento para geração de análise de Embarque/Desembarque

O processo começa com a organização dos dados de bilhetagem eletrônica, que registram os embarques dos passageiros por meio da validação dos cartões no momento de entrada nos veículos. Esses dados incluem informações como o identificador do cartão, o horário da validação, o veículo ou linha, e, quando disponível, o ponto exato de embarque. No entanto, em muitos sistemas de transporte, o desembarque não é registrado diretamente, o que torna necessário inferir os locais de descida a partir dos padrões de uso e das características operacionais.

A inferência dos desembarques baseia-se no princípio de que a maioria dos passageiros desembarca antes de realizar um novo embarque, e que o desembarque ocorre no ponto mais próximo de onde a viagem subsequente começa. Assim, o local de descida é estimado como o ponto imediatamente anterior ao embarque registrado na próxima viagem do mesmo usuário. Para isso, é essencial organizar os dados de bilhetagem por cartão e em ordem cronológica, identificando as sequências de viagens realizadas por cada passageiro.

O tratamento segue algumas etapas principais:

- Agrupamento por cartão: Os registros são organizados para cada cartão, permitindo rastrear o comportamento individual dos passageiros
- Sequenciamento temporal: Os embarques são ordenados por horário, identificando o momento e local de cada validação
- Inferência do desembarque: A inferência final do desembarque é obtida a partir da soma das probabilidades das duas abordagens. Para cada viagem, a distribuição de desembarques leva em conta tanto os passageiros cujo destino foi identificado pelo encadeamento de viagens quanto aqueles cujo desembarque foi inferido pela técnica de viagem espelho. Esse modelo híbrido garante maior precisão e confiabilidade na análise dos fluxos de passageiros.
- Correção de inconsistências: Registros isolados ou fora de padrão (como longos intervalos entre viagens ou trajetos impossíveis dentro da rede) são tratados ou descartados, garantindo a confiabilidade da inferência

Após a inferência dos locais de desembarque, os dados são consolidados em uma tabela de Embarque/Desembarque. Essa tabela contém informações agregadas para cada ponto de parada e viagem, incluindo:

- O número total de passageiros que embarcaram
- O número total de passageiros que desembarcaram
- A ocupação do veículo no ponto (calculada cumulativamente, somando embarques e subtraindo desembarques)
- O horário da viagem
- O ID único da viagem
- O Fator de Renovação (FR) da viagem. Este indicador será explicado em seguida.

A tabela de Embarque/Desembarque permite analisar o comportamento dos passageiros ao longo do trajeto, destacando os pontos de maior e menor demanda. Por exemplo,

em horários de pico, ou seja, em horários com alto número de passageiros nos ônibus, é comum identificar uma concentração de embarques nos bairros residenciais e desembarques nos centros comerciais ou de negócios, com o padrão inverso ocorrendo no fim do dia.

Esse tratamento é essencial para embasar decisões operacionais, como ajustes na frequência das linhas, modificação de itinerários ou implantação de infraestrutura em pontos de maior fluxo. A geração precisa da tabela, mesmo em sistemas sem registro explícito de desembarques, transforma dados brutos em informações estratégicas para o planejamento e melhoria do transporte público.

4.6 Métricas de validação

A validação do tratamento para a geração da tabela é uma etapa crucial para garantir que os resultados obtidos sejam representativos e coerentes com o comportamento real do sistema de transporte público. Para isso, utilizam-se métricas que avaliam a consistência e a confiabilidade dos dados inferidos, destacando padrões esperados e identificando possíveis inconsistências. Entre essas métricas, o Fator de Renovação (FR) desempenha um papel central.

Segundo Vuchic (2005), o FR é um indicador que mede a taxa de troca de passageiros em um veículo ao longo de uma viagem, sendo calculado pela razão entre o total de passageiros transportados e o total de passageiros no trecho crítico. Ferraz e Torres (2004) destacam que valores anômalos de FR podem indicar inconsistências nos dados, como subestimação ou superestimação do número de desembarques. Por exemplo, um FR excessivamente alto pode sugerir registros errôneos de embarque sem a correspondente inferência de desembarque, enquanto um FR próximo de 1 em linhas de alta demanda pode indicar falhas na identificação de trocas de passageiros ao longo do trajeto.

Essas análises garantem que as inferências realizadas estejam alinhadas ao comportamento real dos passageiros, evitando distorções que poderiam comprometer a precisão das estimativas.

4.6.1 Fator de Renovação (FR)

O Fator de Renovação é uma métrica que mede a taxa de troca de passageiros em um veículo ao longo de uma viagem. Segundo Vuchic (2005) esse fator é calculado como a razão entre o total de passageiros transportados e o total de passageiros no trecho crítico. O Fr pode ser expresso pela fórmula:

$$Fr = TT / TCR$$

Onde:

- TT = Total de passageiros transportados na linha (passageiros/hora);
- TCr = Total de passageiros no trecho crítico (passageiros/hora).

Esse indicador ajuda a avaliar se os padrões de embarque e desembarque inferidos são compatíveis com a operação real. Em linhas com alta rotatividade de passageiros, como aquelas que atendem áreas comerciais, é esperado um Fr elevado, indicando que os veículos estão sendo esvaziados e preenchidos repetidamente ao longo do trajeto. Se o FR for próximo de 1, isso indica baixa rotatividade de passageiros ao longo da linha. Nesses casos, as viagens têm origem ou destino predominantemente em um único polo significativo de demanda, sugerindo que a linha atende um deslocamento específico, como um trajeto residencial para um grande centro comercial ou empresarial.

Embora o FR seja uma medida importante para entender a dinâmica de ocupação dos veículos, a avaliação da qualidade do serviço de transporte coletivo envolve uma série de outros indicadores que abrangem diferentes aspectos do sistema. Estudos como o de Ferraz e Torres (2004) destacam que o desempenho operacional das empresas de transporte público por ônibus é avaliado com base em padrões de qualidade e eficiência, utilizando indicadores como tempo de viagem, número de passageiros transportados, receita e custos operacionais. Portanto, para uma análise abrangente da qualidade no transporte coletivo por ônibus, é essencial considerar uma variedade de indicadores que reflitam tanto a eficiência operacional quanto a satisfação dos usuários.

4.6.2 Métricas complementares

Além do Fator de Renovação, outras métricas são utilizadas para validar os resultados da tabela de Embarque/Desembarque:

- **Taxa de Consistência Espacial:** Compara os pontos de maior fluxo de embarque e desembarque inferidos com os dados conhecidos ou esperados (como polos geradores de tráfego, terminais e estações). Se os resultados não refletem os padrões esperados, pode haver erros na inferência (GKIOTSALITIS; CATS, 2021).
- **Taxa de Ocupação por Trecho:** Avalia a evolução da ocupação do veículo ao longo do trajeto. Uma curva de ocupação que cresce continuamente sem refletir os desembarques esperados pode indicar inconsistências no tratamento (SILVA, 2018).
- **Comparação com Dados Observacionais:** Quando possível, os resultados inferidos são comparados com levantamentos manuais ou dados coletados em campo, como contagens de passageiros nos pontos. Esse método fornece um referencial direto para validar as inferências realizadas (CATS; KRISHNAKUMARI; KOUTSOPOULOS, 2019).
- **Análise Temporal de Padrões:** Avalia a regularidade das inferências em diferentes períodos do dia ou dias da semana. Por exemplo, em horários de pico, é esperado que o volume de embarques e desembarques seja significativamente maior do

que em horários de menor demanda. Discrepâncias nesses padrões podem indicar problemas no modelo (WANG et al., 2020).

- **Percentual de Viagens Consistentes:** Mede a porcentagem de viagens cujas inferências seguem padrões lógicos, como o equilíbrio entre o total de embarques e desembarques e a ausência de lotações impossíveis (excedendo a capacidade do veículo) (CHEN et al., 2016).

A combinação dessas métricas permite uma avaliação robusta dos dados inferidos, reduzindo a margem de erro e garantindo maior confiabilidade na modelagem dos fluxos de passageiros no transporte público.

4.7 Tecnologias Utilizadas

Para processar e analisar os dados da bilhetagem eletrônica e do monitoramento veicular, foram utilizadas ferramentas especializadas que garantem a eficiência e precisão da inferência dos pontos de embarque e desembarque. A escolha dessas tecnologias foi motivada pela necessidade de lidar com grandes volumes de informação de forma ágil e confiável, além de permitir a aplicação de métodos analíticos para extrair respostas relevantes para o estudo. O Knime (KNIME, 2025), uma plataforma de análise de dados utilizada em projetos que envolvem grande volume de dados, foi empregado para modelagem e automação dos fluxos de dados, permitindo a aplicação de regras e filtros de forma visual e estruturada. Uma das principais vantagens do Knime é a flexibilidade e integração com outras tecnologias, permitindo que dados de outras fontes, como de bancos de dados, sejam tratados e analisados de forma centralizada.

O Postgres (POSTGRES, 2025) foi utilizado para armazenar e manipular grandes volumes de dados georreferenciados, viabilizando consultas complexas sobre deslocamentos. A escolha do Postgres como armazenamento dos dados se deu por sua robustez e adaptabilidade, em um projeto que as informações precisam ser armazenadas e processadas com precisão e rapidez.

Para complementar a análise, o Python (PYTHON, 2025) foi empregado na criação de mapas de calor, permitindo uma visualização intuitiva da distribuição espacial dos embarques e desembarques. Bibliotecas como Pandas (PANDAS, 2025), GeoPandas (GEOPANDAS, 2025) e Folium (FOLIUM, 2025) foram utilizadas para manipular os dados e gerar representações geográficas interativas. O Matplotlib (MATPLOTLIB, 2025) e o Seaborn (SEABORN, 2025) também foram aplicados para análises estatísticas e gráficos de densidade.

Essa abordagem combinada garantiu um alto nível de precisão na inferência dos pontos de embarque e desembarque, permitindo que os resultados fossem apresentados de forma clara e acessível para a tomada de decisão.

5 Resultados

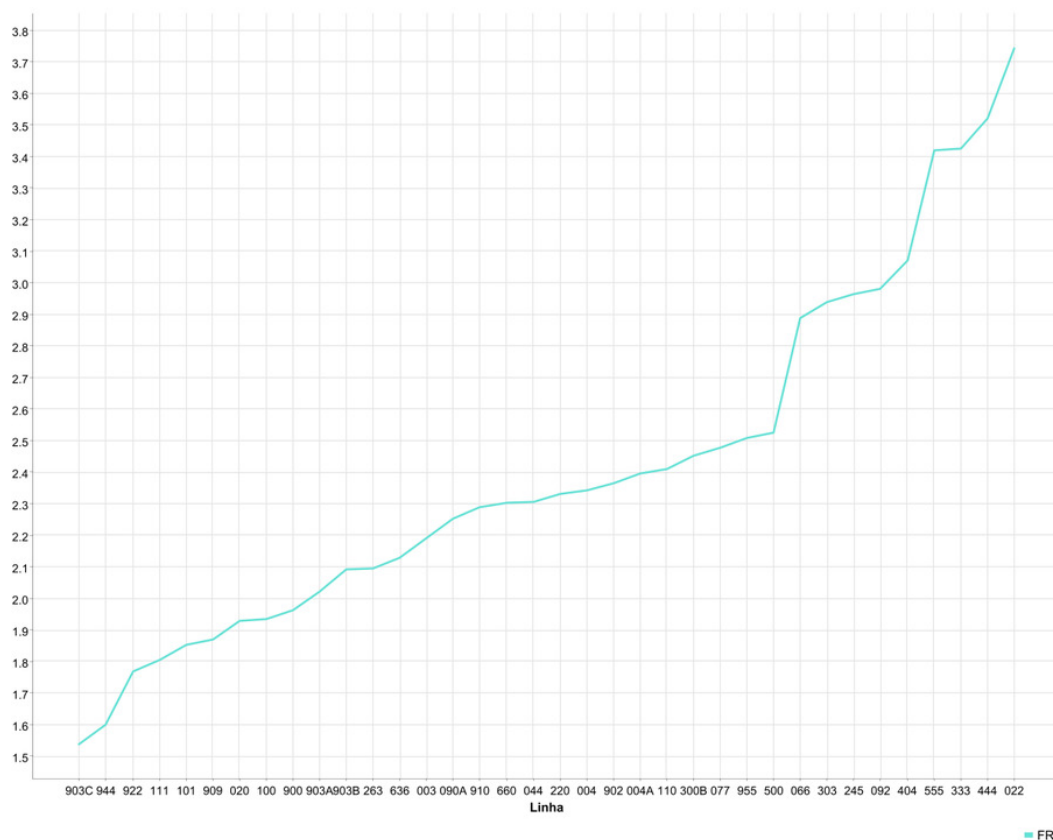
O presente estudo analisou os padrões de embarque e desembarque no transporte público de Campina Grande, estruturando um relatório detalhado que combina dados de bilhetagem eletrônica e monitoramento veicular. Essa abordagem permitiu compreender melhor as dinâmicas dos fluxos de passageiros, avaliar a eficiência operacional e propor ajustes para otimizar a gestão do sistema. A seguir, discutimos os principais resultados obtidos e suas implicações para a mobilidade urbana da cidade.

5.1 Análise do FR

A análise do Fator de Renovação (FR) permitiu avaliar a rotatividade dos passageiros ao longo das viagens das diferentes linhas de ônibus da cidade de Campina Grande. Essa métrica foi utilizada para compreender o fluxo de embarques e desembarques ao longo dos trajetos, identificando padrões distintos entre linhas de diferentes perfis.

A Figura 2 apresenta a variação do FR entre as linhas analisadas, categorizadas de acordo com o tipo de trajeto e perfil de uso. As principais observações incluem:

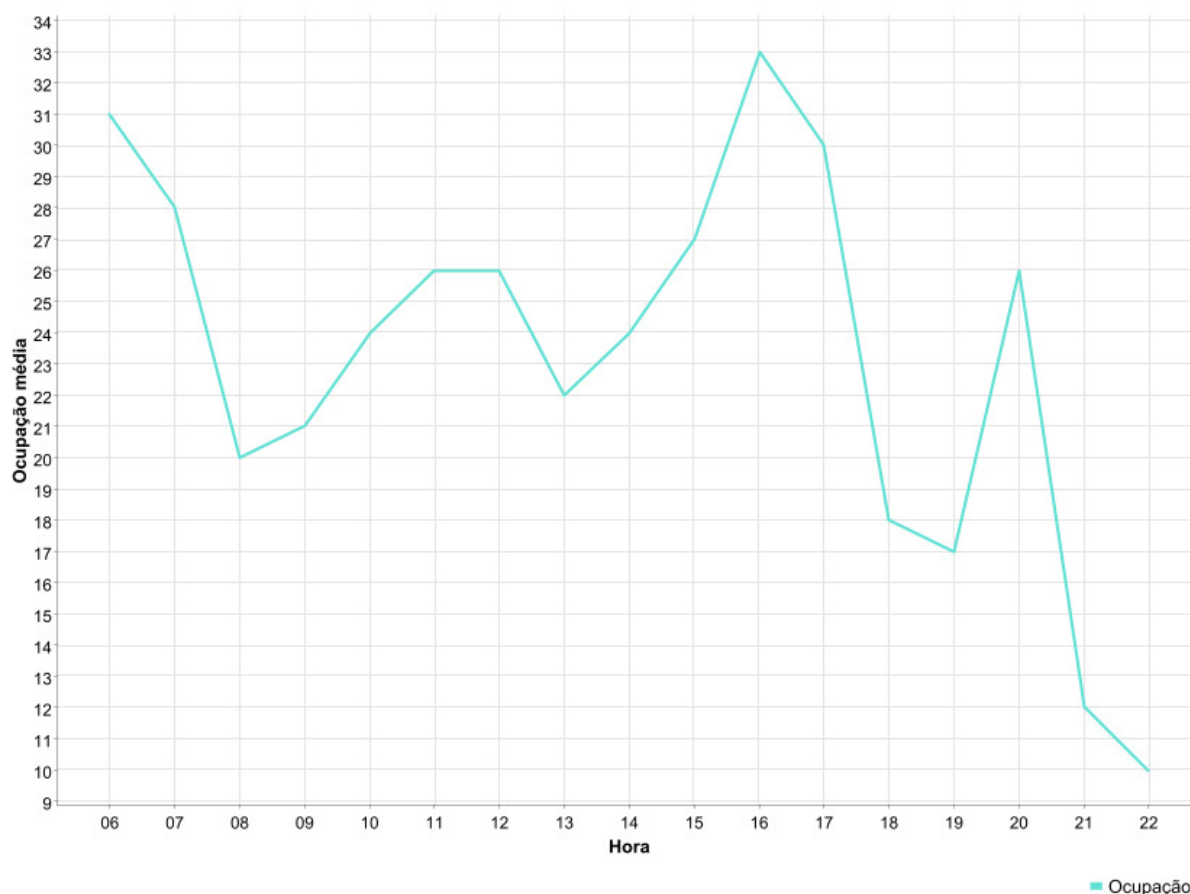
- **Linhas de alta rotatividade (zonas comerciais):** Essas linhas apresentaram um FR maior que 3, indicando que, ao longo do trajeto, a capacidade do ônibus é renovada múltiplas vezes. Esse comportamento é esperado em rotas que passam por centros comerciais, instituições de ensino e terminais de integração, onde passageiros embarcam e desembarcam frequentemente.
- **Linhas de baixa rotatividade (trajetos residenciais e industriais):** Linhas com FR menor que 2 indicam que a maioria dos passageiros permanece a bordo durante a maior parte da viagem, com poucos embarques e desembarques intermediários. Esse perfil foi identificado em rotas que conectam bairros residenciais e zonas industriais.
- **Média de FR e sua distribuição:** A cidade de Campina Grande apresentou uma distribuição heterogênea do FR, sendo que a maioria das linhas registrou valores entre 2 e 3. Isso indica que existe uma rotatividade moderada dos passageiros na maior parte das rotas, com pontos específicos de alta e baixa renovação.
- **Impacto na gestão do sistema:** O entendimento dos padrões de FR é essencial para melhorar a distribuição da frota e adequar a oferta à demanda real dos passageiros. Linhas com alto FR podem se beneficiar de ajustes na frequência dos veículos, enquanto aquelas com FR reduzido podem ser otimizadas em termos de quantidade de ônibus em operação nos diferentes horários do dia.

Figura 2 – Variação de FR nas linhas de ônibus de Campina Grande

5.2 Evolução da ocupação média por horário

A análise da ocupação média dos ônibus ao longo do dia revela padrões significativos na demanda por transporte público, fornecendo informações valiosas para a gestão e o planejamento da frota. A figura 3 ilustra a variação da taxa de ocupação ao longo das horas do dia, destacando momentos de maior e menor utilização do sistema de transporte coletivo.

Figura 3 – Ocupação média no transporte público de Campina Grande



Os períodos entre **6h da manhã**, e **15h e 17h da noite** apresentam os maiores níveis de ocupação, o que indica a forte demanda nos deslocamentos casa-trabalho/escola e trabalho/escola-casa. Esses picos sugerem a necessidade de maior disponibilidade de veículos e ajustes na programação para atender à alta demanda nesses horários críticos.

Após **20h**, a taxa de ocupação cai drasticamente, sugerindo que a demanda por transporte reduz significativamente no período noturno.

5.3 Taxa de consistência espacial

A análise da Taxa de Consistência Espacial busca comparar os padrões inferidos a partir dos dados de embarque e desembarque do transporte público com os principais polos geradores de tráfego urbano. Esses polos incluem zonas comerciais, áreas residenciais, centros universitários e pontos de integração de transporte.

A figura 4 ilustra a intensidade do fluxo de passageiros no transporte público de Campina Grande, destacando os pontos de maior embarque e desembarque. As cores representam diferentes níveis de movimentação:

- Vermelho e laranja - Áreas de alta concentração de passageiros.

- Verde e azul - Locais com menor intensidade de embarque/desembarque.

Figura 4 – Mapa de calor mostrando os principais pontos de desembarque na área central de Campina Grande

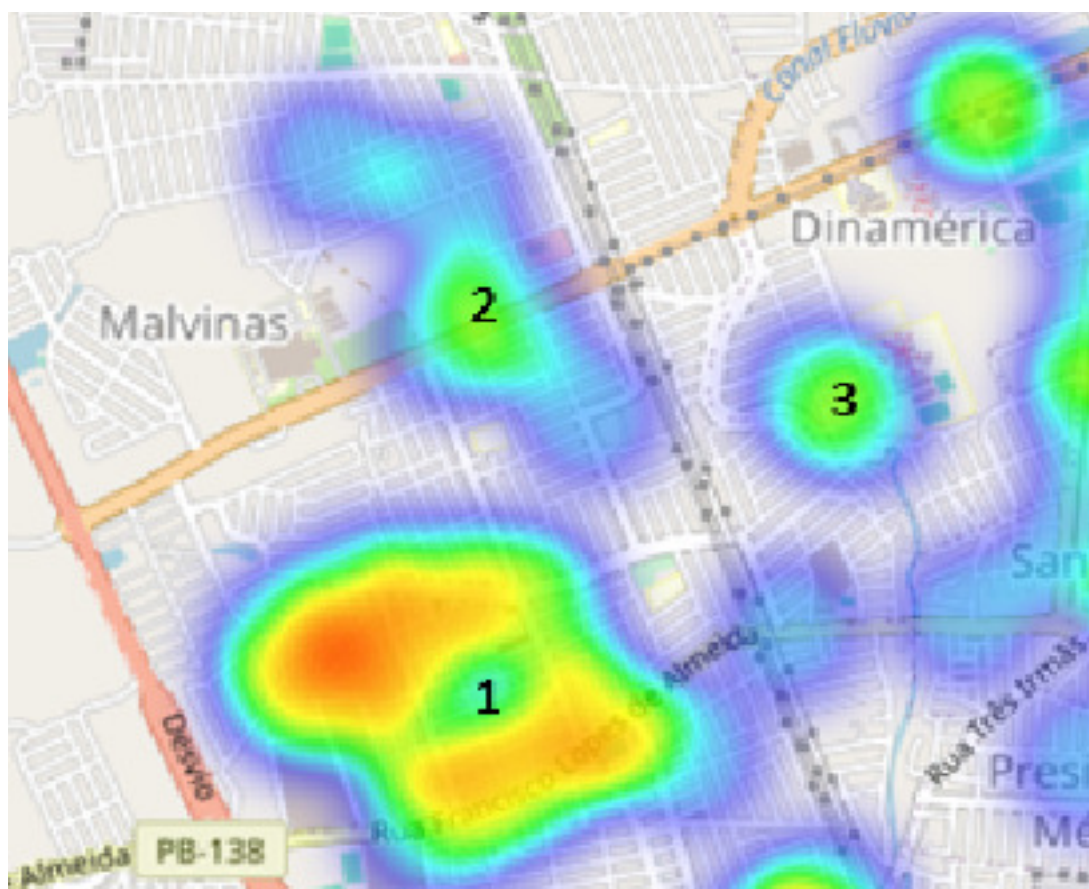


Com base na figura 4, podemos observar que:

- As áreas centrais (destacadas como 3, 4 e 5) apresentam alta densidade de desembarque, o que se alinha à presença de comércios, serviços e órgãos públicos.
- A Área 4 se destaca como o principal ponto de movimentação, pois abriga o Terminal de Integração, um dos maiores polos de embarque e desembarque da cidade.
- Regiões que concentram universidades e escolas (1, 2 e 3) também mostram um alto fluxo de passageiros, evidenciando a importância do transporte público para deslocamentos acadêmicos.

Outro aspecto importante é a movimentação em áreas residenciais:

Figura 5 – Mapa de calor mostrando os principais pontos de desembarque nos bairros das Malvinas e Dinamérica



- No bairro das Malvinas (áreas 1 e 2), há um grande número de desembarques, indicando a importância do transporte para moradores retornando para casa.
- No bairro do Dinamérica, observa-se um fluxo significativo no Instituto Federal da Paraíba (área 3), reforçando a demanda de transporte para estudantes e profissionais que se deslocam diariamente para a instituição.

Esses padrões demonstram como o transporte público é essencial tanto para a mobilidade estudantil quanto para a conexão entre áreas comerciais e residenciais da cidade.

6 Conclusão

O principal resultado deste trabalho foi a elaboração de um estudo detalhado sobre o cálculo do embarque unitário, associado a uma análise aprofundada dos fluxos de passageiros e da eficiência operacional do transporte público da cidade de Campina Grande. Esse estudo estruturou dados a partir da integração entre sistemas de bilhetagem eletrônica e monitoramento veicular, proporcionando uma visão abrangente das dinâmicas de embarque e desembarque ao longo das rotas analisadas.

As principais contribuições deste trabalho incluem:

1) Mapear padrões de embarque e desembarque:

Este objetivo foi alcançado com a criação e análise detalhada da tabela de Embarque/Desembarque. A metodologia aplicada permitiu identificar pontos críticos de demanda ao longo das rotas, destacando os horários de maior movimento e os locais de maior concentração de embarques e desembarques. Além disso, a análise revelou padrões específicos, como a predominância de embarques em áreas residenciais durante a manhã e desembarques concentrados em zonas comerciais e industriais. Esses insights são fundamentais para a identificação de gargalos e para o planejamento de ajustes operacionais que atendam melhor às necessidades da população.

2) Integrar fontes de dados complementares:

A integração entre os dados de bilhetagem eletrônica e os históricos de monitoramento veicular foi realizada com sucesso, utilizando sincronização temporal como base. Essa etapa foi crucial para associar cada evento de validação de cartão à localização exata do veículo no momento da validação, criando um panorama dinâmico e preciso do sistema. A integração também exigiu o tratamento de inconsistências nos dados, como diferenças em fusos horários, registros duplicados e lacunas temporais, garantindo a qualidade e a confiabilidade das análises realizadas. Essa abordagem inovadora demonstrou ser uma solução robusta para sistemas de transporte que enfrentam limitações tecnológicas ou operacionais na coleta de informações.

3) Aplicar metodologias avançadas:

A implementação da técnica de viagem espelho foi uma das inovações mais relevantes do trabalho. Essa abordagem permitiu inferir pontos de desembarque mesmo em sistemas que não registram explicitamente esse evento. Ao analisar os padrões de ida e volta dos passageiros, foi possível construir um modelo preditivo eficiente que conecta embarques e desembarques com alta precisão. A aplicação dessa técnica demonstrou sua eficácia em identificar trajetos completos e fluxos bidirecionais, destacando-se como uma ferramenta poderosa para aprimorar o planejamento de transporte público.

4) Criar matrizes origem-destino (OD):

As matrizes OD geradas forneceram uma visão estruturada e detalhada dos deslocamentos dos passageiros, destacando os fluxos mais significativos entre diferentes zonas da cidade. Esse nível de detalhe permite que gestores identifiquem zonas prioritárias para melhorias e ajustem a alocação de recursos operacionais, como o aumento da frequência de linhas que conectam essas áreas ou a introdução de veículos maiores nos horários de maior demanda.

5) Avaliar os impactos operacionais:

A avaliação dos resultados demonstrou que a aplicação da metodologia proposta tem um impacto direto e positivo na operação do transporte público. A análise identificou oportunidades para reduzir custos, otimizar o uso de recursos e aumentar a satisfação dos usuários. Esse objetivo também incluiu a criação de indicadores-chave, como o Fator de Renovação (Fr), que proporcionaram uma visão quantitativa sobre o desempenho das linhas e a rotatividade de passageiros, auxiliando na identificação de gargalos operacionais.

6.1 Alcance do objetivo final

Os resultados obtidos demonstraram que o objetivo geral foi plenamente alcançado. A metodologia desenvolvida não apenas forneceu uma compreensão detalhada dos padrões de mobilidade, como também apresentou soluções práticas e baseadas em dados para otimizar a operação do transporte público.

O modelo proposto permitiu identificar gargalos operacionais, mapear zonas críticas e propor ajustes que refletem melhor as demandas reais dos usuários. Além disso, a integração de dados de bilhetagem e monitoramento veicular, aliada ao uso de técnicas avançadas como a viagem espelho, destacou-se como uma abordagem eficiente e aplicável em diferentes contextos urbanos.

Os dados obtidos comprovaram a capacidade do modelo de atender às necessidades de planejamento e operação. A análise temporal dos fluxos de passageiros permitiu alinhar a oferta de serviços às demandas específicas de cada período do dia, enquanto a tabela OD ofereceu insights detalhados sobre as principais rotas utilizadas. A aplicação prática dessas informações resultará em um transporte mais eficiente, acessível e alinhado às expectativas de um sistema de mobilidade urbana moderno.

6.2 Considerações finais

Este estudo reforça a relevância da utilização de tecnologias e da análise integrada de dados no enfrentamento dos desafios da mobilidade urbana. A implementação de soluções baseadas em dados permitiu identificar padrões de demanda, ver formas para a otimização

de distribuição de frotas e obter melhorias para a eficiência operacional do transporte público. Além disso, a adoção de aplicativos e sistemas de monitoramento aprimorou a experiência do usuário, garantindo maior previsibilidade e comodidade nos deslocamentos urbanos. A metodologia apresentada constitui uma base sólida para futuras iniciativas, possibilitando que gestores e operadoras tomem decisões fundamentadas e alinhadas às demandas crescentes por serviços de transporte público eficientes e sustentáveis.

O trabalho demonstrou que, com a aplicação de técnicas avançadas e a integração de fontes de dados complementares, é possível transformar o transporte público em uma solução viável para melhorar a mobilidade e a qualidade de vida nas cidades.

7 Referências

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua - Mobilidade Urbana**. 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- GOMIDE, A. de A.; GALINDO, E. P. **A mobilidade urbana: uma agenda inconclusa ou o retorno daquilo que não foi**. Estudos Avançados, v. 27, n. 79, p. 27-39, 2013. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/68700>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES (MCTI). **Relatório sobre transformação digital no transporte público**. Brasília, 2023.
- RUBIM, B.; LEITÃO, S. **O plano de mobilidade urbana e o futuro das cidades**. Estudos Avançados, v. 27, n. 79, p. 55-66, 2013. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- SILVEIRA, M. R.; COCCO, R. G. **Transporte público, mobilidade e planejamento urbano: contradições essenciais**. Estudos Avançados, v. 27, n. 79, p. 41-53, 2013. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/eav/article/view/68701>. Acesso em: 05 fev. 2025.
- FERRAZ, Antônio Clóvis Pinto; TORRES, Isaac Guillermo Espinosa. **Transporte público urbano**. 2. ed. São Carlos: RiMa, 2004.
- VUCHIC, Vukan R. **Urban Transit: Operations, Planning, and Economics**. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2005.
- CATS, O.; KRISHNAKUMARI, P.; KOUTSOPOULOS, H. **Planning for the unexpected: Incorporating travel time reliability in public transport design**. *Transportation Research Part B: Methodological*, v. 129, p. 173-196, 2019.
- CHEN, L.; ZHANG, L.; CHEN, J. **Inferring passengers' boarding and alighting locations by fusing smart card and GPS data**. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, v. 64, p. 51-65, 2016.
- GKIOTSALITIS, K.; CATS, O. **At-stop control measures in public transport: A review and research agenda**. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, v. 149, p. 323-342, 2021.
- SILVA, A. A. **Modelagem e análise de desempenho de sistemas de transporte público urbano**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018.

- WANG, X.; MA, J.; YANG, Y.; LI, X. **Analysis of urban transit system reliability based on smart card data.** *Journal of Advanced Transportation*, v. 2020, p. 1-10, 2020.
- KNIME. Plataforma para ciência de dados. Disponível em: <https://www.knime.com/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- POSTGRES. Banco de dados relacional. Disponível em: <https://www.postgresql.org/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- PYTHON. Linguagem de programação. Disponível em: <https://www.python.org/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- PANDAS. Ferramenta de análise e manipulação de dados. Disponível em: <https://pandas.pydata.org/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- GEOPANDAS. Ferramenta para trabalhos com dados geoespaciais. Disponível em: <https://geopandas.org/en/stable/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- FOLIUM. Ferramenta de visualização de dados. Disponível em: <https://python-visualization.github.io/folium/latest/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- MATPLOTLIB. Biblioteca de geração de visualizações gráficas de dados. Disponível em: <https://matplotlib.org/>. Acesso em: 07 mar 2025.
- SEABORN. Ferramenta de visualização gráfica de dados. Disponível em: <https://seaborn.pydata.org/>. Acesso em: 07 mar 2025.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
	R. Tranquilino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Versão Final do TCC - Luiz Eduardo e Lucas Alves

Assunto:	Versão Final do TCC - Luiz Eduardo e Lucas Alves
Assinado por:	Luiz Pessoa
Tipo do Documento:	Tese
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Luiz Eduardo Bronzeado Pessoa, ALUNO (202011250021) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO - CAMPINA GRANDE, em 18/03/2025 19:22:28.

Este documento foi armazenado no SUAP em 18/03/2025. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1424562
Código de Autenticação: cfe4ada11c

