

# **ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - POLI USP**

**LUAN ROCHA MORAES**

## **OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DOS ÔNIBUS CIRCULARES NO CAMPUS DA USP UTILIZANDO A HEURÍSTICA DE CLARKE AND WRIGHT**

São Paulo

2025



# **ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**

**DEPARTAMENTO DA ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - POLI USP**

**LUAN ROCHA MORAES**

## **OTIMIZAÇÃO DAS ROTAS DOS ÔNIBUS CIRCULARES NO CAMPUS DA USP UTILIZANDO A HEURÍSTICA DE CLARKE AND WRIGHT**

Trabalho de formatura apresentado à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do Diploma de Engenheiro de Produção.

**Orientadora:** Professora Dra. Thayla Tavares de Sousa Zomer.

São Paulo  
2025

Dedico este trabalho de formatura à minha família, que esteve ao meu lado em todos os momentos e me ofereceu amor, apoio e a base necessária para que eu pudesse transformar meus sonhos em realidade. Estendo também esta dedicatória à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, instituição que representou um sonho e que hoje simboliza uma conquista que levarei para toda a vida. A POLI transformou a minha trajetória e ampliou todas as possibilidades do meu futuro.

## **FICHA CATALOGRAFICA**

MORAES, Luan Rocha

Otimização das rotas dos ônibus circulares no campus da USP utilizando a heurística de Clarke & Wright – São Paulo, 2025. 160 p.

Trabalho de Formatura – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Departamento de Engenharia de Produção.

1. Transporte público 2.Roteirização de veículos 3.Clarke & Wright 4.Otimização 5.Mobilidade urbana. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

# AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, á minha família, pelo amor e apoio incondicional, paciência nos momentos de ausência e pelo apoio constante, mesmo diante das dificuldades. Nada disso seria possível sem o suporte e a confiança de vocês.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a todos os professores que fizeram parte da minha formação, agradeço pela sólida base de conhecimento e pelas experiências que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional. Agradeço, também, pela excelente estrutura acadêmica, pelo ambiente estimulante de aprendizado e pelo incentivo contínuo à pesquisa e à busca pelo conhecimento e principalmente, pela excelência.

Á Prof. Dra. Thayla Tavares de Sousa Zomer, orientadora deste trabalho de formatura, por seus valiosos conselhos, constante apoio e pela inspiração transmitida por meio de sua paixão, dedicação e profissionalismo com a Escola Politécnica. Sou profundamente grato pela honrosa oportunidade de ter sido seu orientado, pela orientação atenciosa, pelas contribuições fundamentais ao longo do desenvolvimento deste trabalho e, sobretudo, pela confiança depositada em minha capacidade.

Por fim, agradeço aos colegas e amigos que caminharam comigo ao longo da graduação, pela parceria, troca de experiências e companheirismo, que tornaram essa jornada mais leve, rica e significativa.

# Resumo

Os ônibus circulares que atendem o Campus Butantã da Universidade de São Paulo desempenham um papel essencial na mobilidade diária de estudantes, docentes e funcionários. Em 2024, o sistema passou por uma reestruturação significativa, resultando na criação das novas linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10, redesenhadas para melhorar a cobertura e a eficiência do transporte interno. Entretanto, mesmo com a atualização do serviço, persistem desafios relevantes, como longos tempos de espera, itinerários extensos, superlotação e consequente estresse por parte dos usuários, indicando que o redesenho das linhas não foi suficiente para solucionar integralmente as principais fragilidades do sistema. Este trabalho tem como objetivo otimizar as rotas dos ônibus circulares da USP utilizando a heurística de Clarke & Wright, modelando o problema como um Problema de Roteamento de Veículos com Capacidade (CVRP). A partir dos pontos de parada das novas linhas, das demandas previstas e das distâncias entre nós, formula-se um modelo que busca minimizar a distância total percorrida, respeitando as restrições operacionais dos veículos e assegurando o atendimento adequado aos principais fluxos do campus. Inspirado em estudos prévios sobre roteirização no contexto da USP, bem como em análises detalhadas da operação dos circulares, o trabalho adapta a heurística clássica de Clarke & Wright às novas diretrizes das linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10, buscando propor configurações de rota mais curtas, equilibradas e alinhadas à distribuição real da demanda. Os resultados obtidos apontam para a possibilidade de redução da distância percorrida e de simplificação de trajetos, com potencial impacto positivo na redução do tempo médio de viagem, na diminuição da superlotação e no aumento da eficiência geral do sistema. Assim, o estudo contribui com uma abordagem quantitativa para apoiar decisões de planejamento de transporte dentro do campus, oferecendo alternativas viáveis para melhorar a experiência dos usuários.

**Palavras-chaves:** Transporte público; Roteamento de veículos; Ônibus circulares; Clarke & Wright; Otimização de rotas.

# Abstract

The shuttle buses serving the Butantã Campus of the University of São Paulo play an essential role in the daily mobility of students, faculty, and staff. In 2024, the system underwent a significant restructuring, resulting in the creation of new lines 8082-10, 8083-10, 8084-10, and 8085-10, redesigned to improve coverage and efficiency of internal transportation. However, even with the service upgrade, significant challenges persist, such as long waiting times, extensive routes, overcrowding, and consequent stress for users, indicating that the redesign of the lines was not sufficient to fully address the system's main weaknesses. This work aims to optimize the routes of the USP shuttle buses using the Clarke & Wright heuristic, modeling the problem as a Capacity Vehicle Routing Problem (CVRP). Based on the stopping points of the new lines, the projected demand, and the distances between nodes, a model is formulated that seeks to minimize the total distance traveled, respecting the operational constraints of the vehicles and ensuring adequate service to the main flows on campus. Inspired by previous studies on route planning in the context of USP (University of São Paulo), as well as detailed analyses of the operation of the circular bus lines, the work adapts the classic Clarke & Wright heuristic to the new guidelines of lines 8082-10, 8083-10, 8084-10, and 8085-10, seeking to propose shorter, more balanced route configurations aligned with the real distribution of demand. The results obtained point to the possibility of reducing the distance traveled and simplifying routes, with a potential positive impact on reducing the average travel time, decreasing overcrowding, and increasing the overall efficiency of the system. Thus, the study contributes with a quantitative approach to support transportation planning decisions within the campus, offering viable alternatives to improve the user experience.

**Keywords:** Public transport; Vehicle routing; Circular buses; Clarke & Wright; Route optimization.

# Lista de Tabelas

Tabela 1 – Evolução da frota das linhas 8012/10, 8022/10 e 8032/10. . . . .	37
Tabela 2 – Demanda média diária de passageiros por linha antes e após a criação da 8032/10. . . . .	38
Tabela 3 – Comparação global de frota e produtividade antes e depois da criação da 8032/10. . . . .	39
Tabela 4 – Comparativo entre indicadores antes e depois da criação da linha 8032/10. .	40
Tabela 5 – Distância do ciclo (ida + volta) por linha (situação atual). . . . .	50
Tabela 6 – Quilometragem por ciclo agregado: cenário atual e cenário proposto. . . . .	51
Tabela 7 – Pontos críticos por demanda e exigência mínima de cobertura. . . . .	58
Tabela 8 – Distâncias dos circulares atuais (ida, volta e rotas em laço). . . . .	61
Tabela 9 – Distância do ciclo completo (ida + volta) por linha. . . . .	69
Tabela 10 – Indicadores operacionais das linhas circulares atuais da USP (dados SPTrans). .	70
Tabela 11 – Tempo de ciclo estimado por período (dados SPTrans). . . . .	71
Tabela 12 – Tempo de ciclo . . . . .	71
Tabela 13 – Headway médio aproximado por linha. . . . .	72
Tabela 14 – Número máximo aproximado de ciclos por veículo ao longo do dia. . . . .	73
Tabela 15 – Velocidade média por ciclo completo em cada linha e período. . . . .	73
Tabela 16 – Estimativa de frota necessária por linha. . . . .	74
Tabela 17 – Velocidade média por ciclo completo (média dos períodos). . . . .	75
Tabela 18 – Resumo operacional das linhas. . . . .	76
Tabela 19 – Distâncias das rotas propostas pelo modelo de roteirização. . . . .	78
Tabela 20 – Distâncias dos segmentos Ida e Volta da Rota 1. . . . .	79
Tabela 21 – Comparação das distâncias do ciclo da Rota 1 com linhas atuais. . . . .	82
Tabela 22 – Cobertura territorial da Rota 2 em comparação ao atendimento atual. . . . .	85
Tabela 23 – Comparação da Rota 2 com as rotas atuais do sistema BUSP. . . . .	86
Tabela 24 – Pontos críticos atendidos pela Rota 3 e sua relevância operacional. . . . .	89
Tabela 25 – Comparação da Rota 3 com as rotas atuais do sistema BUSP. . . . .	91
Tabela 26 – Nós periféricos e justificativa de atendimento dedicado. . . . .	93
Tabela 27 – Pontos críticos e justificativa para presença obrigatória de pelo menos uma rota periférica. . . . .	94
Tabela 28 – Benefícios operacionais da manutenção da Rota 4 no sistema otimizado. . .	95
Tabela 29 – Restrições que impossibilitam a absorção dos nós periféricos pelas Rotas 1, 2 e 3. . . . .	96
Tabela 30 – Cobertura dos pontos pelas rotas propostas. . . . .	98
Tabela 31 – Quantidade de rotas que atendem cada ponto. . . . .	100
Tabela 32 – atendimentos dos nós no sistema atual e no roteiro proposto. . . . .	102

Tabela 33 – Variação absoluta de atendimentos por nó (Proposto – Atual). . . . .	103
Tabela 34 – Classificação dos nós por criticidade e número de atendimentos no modelo proposto. . . . .	105
Tabela 35 – Síntese agregada do atendimento dos nós (antes × depois). . . . .	106
Tabela 36 – Comparação global entre a configuração atual e a proposta. . . . .	108
Tabela 37 – Economia de quilometragem no cenário otimizado. . . . .	112
Tabela 38 – Média de distância por itinerário no cenário atual e proposto. . . . .	113
Tabela 39 – Síntese entre economia de distância e manutenção da cobertura. . . . .	116
Tabela 40 – Estimativa do número de ciclos diários no cenário atual (entrepico). . . . .	117
Tabela 41 – Estimativa do número de ciclos diários no cenário proposto (entrepico). . .	118
Tabela 42 – Síntese comparativa de ciclos diários: cenário atual vs. cenário proposto. . .	118

# Lista de Figuras

Figura 1 – Exemplo de VRP . . . . .	18
Figura 2 – Exemplo típico do PRV com um depósito central e quinze pontos de entrega. . . . .	20
Figura 3 – Exemplo de junção de rotas do Clarke-Wright . . . . .	31
Figura 4 – Mapa de pontos dos circulares. . . . .	37
Figura 5 – Sazonalidade mensal de viagens nas linhas 8012/10 e 8022/10 em 2016. . . . .	43
Figura 6 – Proporção de usuários BUSP nas linhas 8012/10 e 8022/10 em 2016. . . . .	44
Figura 7 – Viagens por semestre nas linhas 8012/10 e 8022/10 em 2016. . . . .	45
Figura 8 – Mapa de pontos dos circulares. . . . .	48
Figura 9 – Matriz de distâncias entre os pontos do campus. . . . .	49
Figura 10 – Mapa da linha 8082-10 . . . . .	63
Figura 11 – Mapa da linha 8083-10 . . . . .	64
Figura 12 – Mapa da linha 8084-10 . . . . .	66
Figura 13 – Mapa da linha 8085-10 . . . . .	68
Figura 14 – Rota 1 – Ida . . . . .	80
Figura 15 – Rota 1 – Volta . . . . .	81
Figura 16 – Rota 2 . . . . .	83
Figura 17 – Rota 3 do modelo de roteirização. . . . .	88
Figura 18 – Rota 4 do modelo de roteirização. . . . .	92

# 1 INTRODUÇÃO

Em 27 de agosto de 2024, o Jornal da USP anunciou que o Campus da USP na capital receberia mais ônibus circulares e novos trajetos como parte de uma reestruturação operacional destinada a agilizar os percursos internos e reduzir o tempo de espera nos terminais e pontos de parada. Segundo a publicação oficial, as mudanças implementadas a partir de 2 de setembro, incluíram a criação de quatro linhas internas, trajetos mais curtos e maior frequência, compondo um esforço institucional para melhorar a mobilidade cotidiana da comunidade acadêmica e mitigar problemas recorrentes de superlotação e atrasos (PAULO, 2024).

Essa reformulação representou um marco na gestão do transporte interno, inserindo-se em um movimento mais amplo de revisão da infraestrutura de mobilidade conduzido pelo Plano Diretor do campus. Desde a inauguração da Estação Butantã da Linha 4–Amarela, em 2011, a demanda pelos circulares cresceu de forma contínua, tornando imprescindível a adoção de soluções mais eficientes e compatíveis com a intensificação dos fluxos diários de deslocamento na Cidade Universitária.

A iniciativa não surgiu de forma isolada. Ela se insere em um processo mais amplo de reformulação urbana conduzido pelo Plano Diretor da USP, iniciado em 2023, que identificou mudanças estruturais nos padrões de deslocamento interno após a inauguração da Estação Butantã da Linha 4–Amarela, em 2011. Desde então, o metrô consolidou-se como a principal porta de entrada do campus, reorganizando espontaneamente os fluxos de chegada e saída e ampliando significativamente a demanda pelo sistema de transporte interno. Esse aumento de pressão sobre a rede existente tornou evidente a necessidade de reavaliar as rotas, redistribuir a frota e modernizar a lógica operacional dos circulares.

Mais de uma década após a inauguração da Linha Amarela, porém, muitos dos desafios persistem: ciclos extensos, rotas sobrepostas, baixa eficiência espacial e assimetria entre oferta e demanda, especialmente nos eixos de maior circulação, como FFLCH, POLI, FEA, IQ e a região do Bandeirão/Central. A reestruturação emergencial anunciada pela PUSP-CB tornou-se, assim, o catalisador para um debate mais profundo sobre a necessidade de soluções técnicas e quantitativas que permitam ir além de ajustes superficiais no sistema.

Nesse contexto, este TCC se propõe a analisar e otimizar as rotas dos ônibus circulares da USP utilizando ferramentas de Pesquisa Operacional em particular, o Problema de Roteamento de Veículos com Capacidade (CVRP) e a heurística paralela de Clarke & Wright, complementada

por caminhos mínimos obtidos via algoritmo de Dijkstra. O objetivo é avaliar se um redesenho sistemático, baseado em modelagem matemática e dados reais de mobilidade, pode produzir rotas mais curtas, equilibradas e aderentes às demandas do campus, contribuindo para a eficiência do sistema sem aumentar a frota existente.

## 1.1 Contextualização e Problema

A Cidade Universitária, localizada no bairro do Butantã, é o principal campus da Universidade de São Paulo. Estudos recentes descrevem a USP como uma área com aproximadamente 3.648.944 m<sup>2</sup> (cerca de 365 hectares), dos quais 800.000 m<sup>2</sup> correspondem a áreas construídas. O campus conta ainda com cerca de 60 km de ruas e avenidas, extensa cobertura vegetal, estimada em 80% (SILVA et al., 2018), e áreas ambientais protegidas, como a Reserva Florestal Armando de Salles Oliveira. A circulação diária estimada ultrapassa 100 mil pessoas, número que inclui estudantes, trabalhadores, visitantes e usuários dos serviços de saúde e pesquisa. Esse volume expressivo de deslocamentos reforça o papel estratégico das linhas de ônibus internas para a conectividade entre as unidades acadêmicas, laboratórios, centros administrativos e portões de acesso (BUTANTã, 2024).

Até o início de 2024, o sistema de transporte interno era composto por três linhas de ônibus circulares 8012, 8022 e 8032, operadas pela SPTrans. A frota dedicada incluí 18 veículos, entre ônibus básicos e articulados, com partidas padronizadas a cada 15 minutos e aproximadamente 300 viagens diárias (NARVÁEZ-ROMO et al., 2024). Entretanto, problemas como superlotação, longos tempos de espera, trajetos extensos, pontos mal atendidos e comunicação deficitária permaneceram como queixas recorrentes da comunidade acadêmica. Em fevereiro de 2024, a PUSP-CB anunciou a implementação de novas rotas, incluindo inicialmente a linha 8042-10, mas a repercussão altamente negativa levou à suspensão temporária da medida e à abertura de uma consulta pública. A reformulação definitiva, implementada posteriormente, consolidou quatro linhas circulares atualizadas: 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10, elas foram divulgadas oficialmente em agosto de 2024, como parte de uma estratégia que priorizou comunicação mais antecipada, ajustes operacionais e presença de fiscais da SPTrans ao longo do campus durante o período de implantação. Apesar das alterações, grande parte dos problemas relatados pelos usuários manteve-se presente nas primeiras semanas: passageiros confusos com trajetos, falta de atualização de placas nos pontos, demora superior à prevista entre viagens, continuidade de altas taxas de ocupação e uma percepção geral de mudança brusca. Depoimentos de estudantes revelam essa heterogeneidade na experiência: enquanto alguns relataram melhoras pontuais nos deslocamentos, outros a permanência da superlotação e os atrasos.

A então prefeita do campus, Raquel Rolnik, explicou que o redesenho dos circulares constituiu uma medida emergencial, limitada pelas restrições contratuais com a SPTrans e pela quantidade fixa de ônibus. As mudanças, portanto, focaram na redistribuição dos veículos e no encurtamento de trajetos para reduzir os ciclos de operação. Rolnik também ressaltou que

o principal gargalo permanece relacionado à pontualidade, resultante do descumprimento de horários por parte da empresa operadora. Assim, a mobilidade interna continua dependendo de ações de curto prazo enquanto se aguardam soluções definitivas, como a futura Linha 22–Marrom do Metrô, que prevê a construção da estação “Universidade de São Paulo”. Nesse cenário, o debate sobre alternativas modais com sistemas circulares mais ágeis vem ganhando espaço.

## 1.2 Problema

Mesmo após a reestruturação das linhas de ônibus circulares em 2024, que reorganizou os itinerários em quatro linhas principais, persistem desafios significativos que comprometem o desempenho do sistema de transporte interno da USP. Entre os problemas identificados estão o tempo de espera excessivo, frequentemente superior ao previsto; roteiros longos e pouco equilibrados, que elevam o tempo total de viagem; superlotação, sobretudo nos horários de pico; e o consequente estresse e insatisfação dos usuários, que dependem do transporte para acessar suas atividades no campus. Diante desse cenário, o problema de pesquisa que orienta este trabalho consiste em investigar de que forma a otimização dos roteiros pode melhorar a operação atual e mitigar os impactos negativos percebidos pelos usuários.

## 1.3 Objetivos e Justificativas

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é propor um modelo de otimização das rotas dos ônibus circulares do Campus Butantã da Universidade de São Paulo, considerando a reestruturação das linhas implementada em 2024 e os desafios operacionais que persistem mesmo após as alterações. O estudo busca elevar a eficiência do sistema de transporte interno por meio da aplicação de técnicas consagradas na literatura de pesquisa operacional, especialmente o Problema de Roteamento de Veículos (VRP/CVRP), a fim de gerar rotas mais curtas, equilibradas e aderentes às demandas reais dos usuários.

A abordagem empregada fundamenta-se na heurística de Clarke & Wright, escolhida por sua capacidade de construir rotas eficientes a partir da combinação progressiva de pontos, tendo como critério a redução dos custos totais de deslocamento. Devido à complexa malha viária da Cidade Universitária e à necessidade de garantir que as rotas propostas sejam operacionalmente viáveis, o modelo é complementado pelo algoritmo de Dijkstra, responsável por identificar os caminhos mínimos entre pares de nós e ajustar trajetos em situações em que a heurística inicial não produz conexões coerentes com a infraestrutura viária. A integração dos dois métodos é implementada por meio de um código em Python desenvolvido especificamente para este estudo, permitindo simular cenários, incorporar restrições e comparar a configuração atual das linhas com as soluções otimizadas.

Desse modo, o objetivo central consiste em reduzir a distância total percorrida pelos ônibus, minimizar o tempo estimado de viagem, e contribuir para a diminuição da superlotação

observada principalmente em horários de pico. Espera-se ainda melhorar a regularidade do serviço, promover maior equilíbrio na distribuição da demanda entre os itinerários e oferecer subsídios analíticos para apoiar decisões da Prefeitura do Campus e da SPTrans, sem a necessidade de ampliar a frota atual ou alterar contratos vigentes. Assim, o trabalho visa apresentar uma solução prática, eficiente e fundamentada que qualifique o planejamento das rotas dos circulares e melhore a experiência diária de deslocamento da comunidade USP.

## 1.4 Motivação

A motivação deste trabalho está ligada à necessidade de aprimorar o sistema de transporte interno da USP por meio de ferramentas analíticas robustas e amplamente utilizadas na literatura de otimização. O planejamento das rotas dos ônibus circulares apresenta desafios inerentes às características do Campus Butantã: uma área territorial extensa, circulação diária superior a cem mil pessoas e múltiplos pontos de parada com demandas heterogêneas ao longo do dia. Diante dessas particularidades, torna-se fundamental adotar uma abordagem quantitativa capaz de redesenhar as rotas de maneira racional, eficiente e alinhada às restrições operacionais vigentes, como a restrição de tempo, demanda e limitações de frota.

Nesse contexto, o problema é modelado como um Problema de Roteamento de Veículos (VRP/CVRP), permitindo o uso de métodos consolidados para a construção de soluções otimizadas. Entre esses métodos, destaca-se a heurística de Clarke & Wright, que possibilita a combinação eficiente de rotas a partir do cálculo de savings; o algoritmo de Dijkstra, empregado para identificar os caminhos mínimos na malha viária complexa da CUASO; e a implementação computacional em Python, que viabiliza a simulação de cenários, a comparação de alternativas e a proposição de rotas aplicáveis ao contexto real.

A motivação central deste estudo, portanto, consiste em contribuir para um sistema de transporte interno mais eficiente, com melhores tempos de viagem, redução da superlotação, aumento da satisfação dos usuários e otimização das operações sem necessidade de ampliar a frota existente. Trata-se de buscar soluções práticas e embasadas que fortaleçam a mobilidade dentro do campus e aprimorem a experiência diária de toda a comunidade universitária.

## 2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho foi estruturado de forma sistemática para abordar a otimização das rotas dos ônibus circulares da USP por meio de técnicas de Pesquisa Operacional, com ênfase no Problema de Roteamento de Veículos (VRP/CVRP) e na heurística de Clarke & Wright. A seguir apresenta-se a organização geral das seções que compõem este estudo:

### 1. Seção 2 – Fundamentação Teórica:

Apresenta a base conceitual e teórica necessária para o desenvolvimento do estudo, incluindo:

- definição formal do Problema de Roteamento de Veículos (VRP) e suas principais variantes;
- aprofundamento no Problema de Roteamento de Veículos com Capacidade (CVRP);
- revisão de heurísticas e metaheurísticas clássicas de roteamento;
- descrição detalhada da heurística de Clarke–Wright e sua formulação matemática;
- contextualização histórica e técnica do transporte coletivo na USP.

Essa seção estabelece o arcabouço teórico utilizado na modelagem proposta.

### 2. Seção 3 – Materiais, Dados e Premissas:

Desenvolve a caracterização completa do sistema de transporte interno do campus, incluindo:

- definição dos 26 pontos da rede de circulares;
- construção da matriz de distâncias por meio de rotas reais da malha viária;
- levantamento dos tempos de ciclo, velocidades e headways das linhas 8082–10 a 8085–10;
- identificação dos pontos críticos de maior demanda e definição de requisitos mínimos de cobertura;
- apresentação das principais restrições operacionais do modelo (como o limite máximo de 8 pontos por rota).

Essa seção consolida todos os insumos utilizados como entrada para o modelo de otimização.

### 3. Seção 4 – Métodos e Modelagem:

Descreve os procedimentos matemáticos e computacionais utilizados na construção das rotas, com foco em:

- formulação do problema como um CVRP, incluindo variáveis, função objetivo e restrições;
- aplicação da heurística paralela de Clarke–Wright para geração da solução inicial;
- uso do algoritmo de Dijkstra para correção dos caminhos mínimos na malha viária real;
- implementação computacional em Python e detalhamento das etapas do algoritmo.

Essa seção apresenta efetivamente o método de solução adotado no trabalho.

### 4. Seção 5 – Resultados e Análises:

Discute os resultados do redesenho das rotas, incluindo:

- comparação entre as distâncias totais percorridas no sistema atual e no sistema proposto;
- análise detalhada das quatro rotas otimizadas (Rotas 1, 2, 3 e 4);
- avaliação da cobertura espacial dos 26 nós e da redundância nas regiões críticas;
- estudo de variação de atendimentos por nó (antes e depois);
- demonstração da redução de 10,52% na quilometragem total do sistema;
- interpretação operacional dos ganhos obtidos: redução de atrasos, melhor distribuição de carga e maior regularidade dos ciclos.

Essa seção confirma que o modelo proposto produz rotas mais curtas, equilibradas e coerentes com a geografia do campus.

## Conclusão

A conclusão apresenta as considerações finais do estudo, destacando:

- a contribuição da heurística de Clarke & Wright para a melhoria da mobilidade interna;
- a relevância prática dos resultados para a gestão da USP e para o planejamento de transporte;
- limitações do modelo e sugestões de pesquisas futuras, como integração com dados de GPS, técnicas de otimização dinâmica e simulações de fluxo.

## 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma revisão de literatura de principais tópicos relevantes para os objetivos deste estudo e está dividido nas seguintes seções:

### 3.1 O Problema de Roteamento de Veículos (VRP)

O Problema de Roteamento de Veículos (Vehicle Routing Problem – VRP) foi introduzido por Dantzig e Ramser em 1959 como uma formulação matemática destinada a otimizar operações de transporte, inicialmente sob o nome Truck Dispatching Problem. Seu primeiro estudo de caso envolvia o roteamento de caminhões responsáveis pela distribuição de óleo de um depósito central para diferentes postos de abastecimento, com o objetivo de minimizar a distância total percorrida. Desde então, o VRP consolidou-se como um dos problemas mais estudados na área de Pesquisa Operacional e Otimização Combinatória, tanto pela sua relevância prática quanto pela elevada complexidade computacional que apresenta. A amplitude de suas aplicações e a quantidade de variáveis envolvidas ampliam significativamente o nível de dificuldade para encontrar soluções ótimas, o que motivou o desenvolvimento de métodos exatos, heurísticos e metaheurísticos ao longo das últimas décadas ([SCHEUERER; WENDOLSKY, 2006](#)), o VRP consiste em determinar rotas eficientes para uma frota de veículos que parte de um único depósito  $D$ , ao qual todos os veículos devem retornar, atendendo um conjunto de clientes  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ . Cada cliente possui uma demanda específica  $d_i$ , e o número de veículos  $V$  está limitado a realizar uma única rota. Esse problema costuma ser representado por um grafo, como ilustrado na Figura 1, no qual o depósito é indicado por um retângulo e os clientes por círculos, interligados por arestas com seus respectivos custos, como distância ou tempo de deslocamento. Os clientes aparecem como nós comuns (representados por círculos) e as conexões entre eles são modeladas por arestas associadas a custos. Como ilustrado na Figura 1, o VRP envolve a definição de rotas ótimas para uma frota de veículos a partir de um depósito central

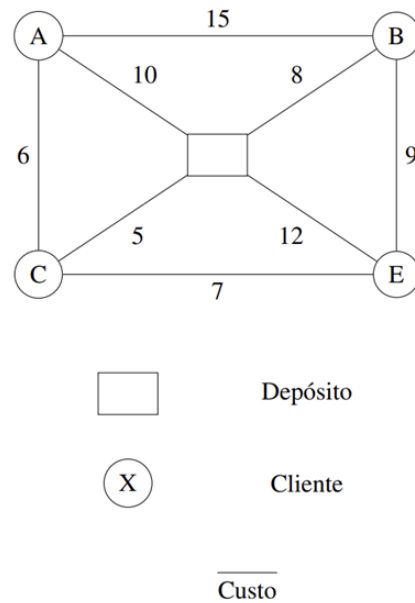


Figura 1 – Exemplo de VRP

**Fonte:** Adaptação de *Heurística Clarke–Wright para o Problema de Roteamento com Múltiplos Depósitos, Entregas Divididas e em Lotes*, João Almir da Costa Junior.

O objetivo central do VRP é definir o conjunto de rotas que minimize o custo total de operação, garantindo que todos os clientes sejam atendidos respeitando as restrições impostas ao problema (como capacidade dos veículos, janelas de tempo ou limites operacionais). Esse modelo possui ampla aplicação prática em sistemas de distribuição, coleta, entrega e logística em geral, sendo fundamental para empresas que buscam aumentar sua eficiência e reduzir custos operacionais segundo (NIGHTINGALE; SUBRAMANIAN, 2023).

A relevância do VRP decorre de sua capacidade de representar cenários reais complexos de transporte, nos quais decisões inadequadas, como rotas mal planejadas ou desequilíbrio na distribuição da demanda, podem resultar em atrasos, desperdício de recursos e perda de produtividade. Dessa forma, a combinação entre modelagem matemática e técnicas avançadas de solução, como heurísticas e metaheurísticas, torna-se essencial para lidar com a elevada complexidade desse problema e promover ganhos significativos nas operações de transporte e distribuição.

### 3.1.1 Importância e aplicações

O VRP ocupa posição central em problemas de logística, transporte e gestão da cadeia de suprimentos. Sua estrutura básica permite modelar situações em que uma frota de veículos deve atender um conjunto de clientes distribuídos geograficamente, a partir de um ou mais depósitos, respeitando restrições operacionais e buscando minimizar algum critério de custo (distância, tempo, emissões) (HU; WANG; ZENG, 2009).

Na prática, o VRP aparece em contextos muito variados, como: distribuição de mercadorias em redes de varejo, transporte público e escolar, coleta de resíduos sólidos, distribuição de combustíveis, roteamento de caminhões refrigerados, planejamento de entregas urbanas, despacho de táxis, gestão de frotas elétricas e sistemas colaborativos de transporte de cargas (FERNANDO; THIBBOTUWAWA; KILIC, 2024). Essa diversidade de aplicações explica a grande quantidade de variantes do problema e o interesse contínuo da literatura em propor novos modelos e algoritmos (MOLINA; SALMERON; EGUÍA, 2020).

### 3.1.2 Formulação clássica e características

Na formulação clássica, o VRP considera um depósito central a partir do qual parte uma frota homogênea de veículos, todos com a mesma capacidade, que deve atender um conjunto de clientes  $C = \{1, 2, \dots, n\}$ , cada qual com uma demanda conhecida  $q_i$ . Os veículos iniciam e terminam suas rotas no depósito, e cada cliente deve ser atendido exatamente uma vez por algum veículo (MOLINA; SALMERON; EGUÍA, 2020). O objetivo típico é determinar o conjunto de rotas que minimiza a distância total percorrida ou o custo operacional agregado, garantindo o atendimento integral da demanda e o respeito às restrições de capacidade dos veículos (STANOJEVIĆ; STANOJEVIĆ; VUJOŠEVIĆ, 2013).

Do ponto de vista da modelagem, o VRP é geralmente representado em um grafo ponderado  $G = (N, A)$ , em que  $N$  é o conjunto de nós (depósito + clientes) e  $A$  o conjunto de arcos possíveis entre esses nós. A cada arco  $(i, j) \in A$  associa-se um custo  $c_{ij}$ , usualmente a distância ou o tempo de deslocamento entre  $i$  e  $j$ . As variáveis de decisão indicam se cada arco é ou não utilizado em alguma rota, e o modelo inclui ainda restrições para evitar sub-rotas, garantir a conectividade e respeitar os limites de capacidade e de operação (HU; WANG; ZENG, 2009).

## 3.2 Definição e Estrutura do VRP

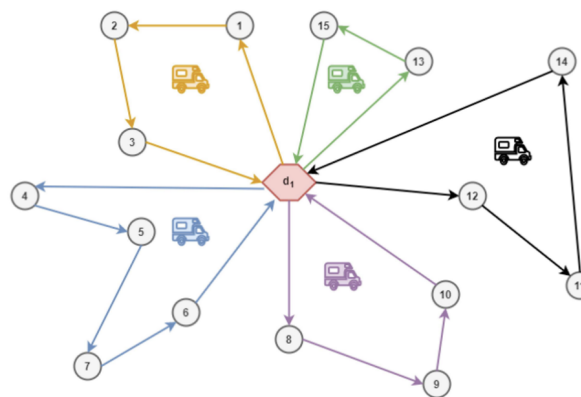
O Problema de Roteamento de Veículos (VRP) pode ser formalmente definido como o problema de determinar um conjunto ótimo de rotas para uma frota de veículos, geralmente homogênea, partindo de um mesmo local, que deve atender um conjunto de clientes geograficamente distribuídos. Cada cliente possui uma demanda conhecida, e o objetivo principal é minimizar o custo total associado ao transporte, o qual pode ser medido em termos de distância percorrida, tempo de viagem ou número total de veículos utilizados como (SCHEUERER; WENDOLSKY, 2006). Cada veículo deve partir do local, atender um subconjunto de clientes e retornar a ele, respeitando restrições operacionais como capacidade máxima, tempo máximo de percurso.

O Problema de Roteamento de Veículos (PRV) passou a ser entendido como uma extensão natural do Problema do Caixeiro Viajante (PCV). Assim como no PCV, busca-se determinar um percurso de menor custo que visite um conjunto de pontos exatamente uma vez. A diferença

central é que, no PRV, não há apenas um agente, mas sim vários veículos, todos partindo de um mesmo depósito, atendendo grupos distintos de clientes de maneira coordenada e retornando ao ponto de origem. Dessa forma, o PRV generaliza o PCV ao permitir múltiplas rotas simultâneas, cada uma associada a um veículo e sujeita a restrições operacionais, como capacidade e distância máxima.

A Figura 2 ilustra um exemplo típico do PRV: um depósito central e quinze pontos de entrega distribuídos espacialmente. Após a execução de um algoritmo de roteirização, o conjunto de pontos é dividido em cinco rotas, cada uma atribuída a um veículo distinto.

Figura 2 – Exemplo típico do PRV com um depósito central e quinze pontos de entrega.



**Fonte:** Adaptação de Kovács, Agárdi e Bányai (2020).

Tanto o PRV quanto o PCV figuram entre os problemas mais desafiadores da otimização combinatória, área que trata de modelos definidos sobre conjuntos finitos e compostos por valores discretos. A complexidade desses problemas cresce a uma taxa superior à exponencial, o que rapidamente torna ineficazes os métodos e algoritmos exatos. Para ilustrar essa expansão combinatória, uma instância do PCV com apenas  $n = 15$  pontos já apresenta mais de 600 trilhões de possíveis sequências de visita (DANTZIG; RAMSER, 1959).

Em razão dessas características, ambos os problemas pertencem à classe dos problemas NP-difíceis, para os quais não se conhece nenhum algoritmo eficiente capaz de resolvê-los de maneira ótima em todos os casos, nem se sabe se tal algoritmo um dia poderá ser desenvolvido. Apesar disso, há uma variedade de algoritmos de aproximação, heurísticas e metaheurísticas capazes de produzir soluções de boa qualidade em tempos computacionais viáveis para grande parte das aplicações práticas (GRECO, 2008).

### 3.2.1 Evolução da pesquisa em VRP

Diversos estudos de revisão apontam que o VRP, desde sua formulação original, tem sido um dos problemas mais prolíficos em termos de produção científica e desenvolvimento metodológico (HU; WANG; ZENG, 2009). Ao longo dos anos, foram propostos:

- modelos exatos baseados em programação inteira, branch-and-cut e branch-and-price para instâncias de pequeno e médio porte;
- heurísticas construtivas e de melhoria, como a heurística de savings de Clarke & Wright e variantes de 2-opt, 3-opt e VNS (STANOJEVIĆ; STANOJEVIĆ; VUJOŠEVIĆ, 2013);
- metaheurísticas avançadas, como algoritmos genéticos, recozimento simulado, algoritmos meméticos, busca tabu e abordagens híbridas (MOLINA; SALMERON; EGUIA, 2020).

Revisões recentes enfatizam a tendência de integração do VRP com outros problemas de decisão (como localização de facilidades, gestão de estoques e alocação de recursos), bem como sua aplicação em contextos emergentes, como frotas elétricas, logística urbana sustentável e transporte colaborativo (MATIJEVIĆ; ILIN; PARDALOS, 2024).

O VRP, desde sua origem como *Truck Dispatching Problem* (DANTZIG; RAMSER, 1959), consolidou-se como um eixo central da pesquisa em otimização aplicada à logística e ao transporte. Sua importância decorre tanto da relevância prática pela possibilidade de reduzir custos, tempos de viagem e emissões, quanto da riqueza teórica por envolver um problema NP-difícil com grande variedade de extensões e desafios de solução. A presente pesquisa insere-se nesse contexto ao adotar o CVRP e a heurística de Clarke & Wright como base para a modelagem e otimização das rotas dos ônibus circulares no Campus Butantã da USP, alinhando-se à literatura contemporânea que utiliza o VRP como ferramenta para melhorar sistemas reais de transporte (HU; WANG; ZENG, 2009). Diante desse cenário, a literatura consolidou o uso de aproximações, heurísticas e metaheurísticas, que não garantem otimalidade global, mas conseguem produzir soluções de alta qualidade em tempos computacionais compatíveis com aplicações práticas. Técnicas como heurísticas construtivas, busca local, VNS, algoritmos genéticos, Simulated Annealing e outros métodos híbridos têm se mostrado extremamente eficazes na exploração inteligente do espaço de soluções, oferecendo um equilíbrio adequado entre eficiência computacional e qualidade dos resultados (GRECO, 2008).

### 3.2.1.1 Importância Prática e Aplicações do VRP

O Problema de Roteamento de Veículos (VRP) possui ampla aplicação em setores que demandam planejamento logístico eficiente, tais como distribuição de mercadorias, coleta de resíduos, atendimento domiciliar, transporte de passageiros e serviços de emergência (SCHEUERER; WENDOLSKY, 2006). Em sistemas de transporte público, especialmente em linhas circulares, como o caso dos ônibus da USP, o VRP permite modelar o problema de atender múltiplos pontos de embarque e desembarque com uma frota limitada, buscando minimizar percursos, equilibrar a distribuição da demanda e reduzir o tempo de deslocamento dos usuários.

Essa capacidade de adaptação torna o VRP uma ferramenta essencial para o planejamento e otimização de rotas em ambientes urbanos e institucionais, em que é necessário conciliar

eficiência operacional, qualidade de serviço e restrições físicas ou operacionais diversas Gounaris (GOUNARIS, 2011).

### 3.2.1.2 Principais Variantes do VRP

Ao longo dos anos, diversas variantes do VRP foram desenvolvidas para lidar com situações reais mais complexas. Entre elas, destacam-se:

- **VRP Capacitado (CVRP):** caracteriza-se por um único depósito que serve como ponto de partida e retorno para todos os veículos, os quais possuem capacidade uniforme. É uma das versões mais utilizadas em aplicações logísticas tradicionais (MOLINA; SALMERON; EGUIA, 2020).
- **VRP com Coleta e Entrega (VRPPD):** cada veículo realiza tanto entregas quanto coletas ao longo da rota, exigindo planejamento que considere simultaneamente fluxos de ida e retorno (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP com Múltiplos Depósitos (MDVRP):** considera vários pontos de partida e chegada, sendo aplicável quando existe mais de um centro operacional (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP com Coletas e Entregas (VRPPD):** nesta variante, cada veículo também realiza entregas e retiradas ao longo do percurso, mas com ênfase em cenários em que os fluxos de carga são fortemente acoplados, exigindo sincronização mais rigorosa entre os nós atendidos (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP com Janelas de Tempo (VRPTW):** introduz restrições temporais, de modo que cada cliente só pode ser atendido dentro de um intervalo específico, tornando o problema mais aderente à realidade operacional de serviços regulares (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP com Entrega Dividida (SDVRP):** permite que a demanda de um cliente seja atendida por mais de um veículo quando isso gera rotas mais eficientes ou permite respeitar limites de capacidade (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP Periódico (PVRP):** as entregas são planejadas para múltiplos dias, e não apenas para um período único, exigindo combinar frequência de atendimento e atribuição de rotas ao longo de um horizonte de planejamento mais amplo (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP com Frota Heterogênea (HFVRP):** incorpora veículos com capacidades, custos e características operacionais diferentes, refletindo situações reais em que frotas não são uniformes (TOTH; VIGO, 2014).
- **Dial-a-Ride Problem (DARP):** versão voltada ao transporte de pessoas, em que usuários são levados de pontos de origem a destinos específicos. Por envolver passageiros, e não

cargas, introduz requisitos adicionais, como conforto, segurança e limites de tempo de viagem (TOTH; VIGO, 2014).

- **VRP Estocástico (SVRP):** considera incertezas, como demanda aleatória, tempos de viagem variáveis ou probabilidades associadas à presença do veículo em determinadas rotas (TOTH; VIGO, 2014).
- **VRP Dinâmico (DVRP):** leva em conta que informações podem mudar ao longo do tempo, como surgimento de novos clientes, alterações de demanda ou mudanças na disponibilidade dos veículos (TOTH; VIGO, 2014).
- **Problema de Roteamento de Inventário (IRP):** integra decisões de gerenciamento de estoques às decisões de roteamento, combinando o VRP clássico com políticas de reabastecimento (TOTH; VIGO, 2014).

Essas variantes demonstram a flexibilidade do VRP para modelar uma ampla gama de problemas reais, refletindo a complexidade dos sistemas de transporte modernos e a necessidade de ferramentas adaptáveis a diferentes restrições operacionais.

### 3.3 O Problema de Roteamento de Veículos com Capacidade (CVRP)

O *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) é uma das variantes mais importantes e estudadas do Problema de Roteamento de Veículos (VRP). Assim como o VRP clássico, o CVRP busca determinar um conjunto de rotas eficientes para atender um conjunto de clientes geograficamente distribuídos, mas incorpora explicitamente a restrição de capacidade dos veículos. Por essa razão, o CVRP é amplamente aplicado em problemas reais de logística, transporte e distribuição (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021).

No CVRP, uma frota de veículos homogêneos parte de um *único depósito* para atender um conjunto de clientes, cada qual com uma demanda conhecida, retornando ao depósito após completar a rota. Cada veículo possui capacidade fixa, o que implica que o somatório das demandas atendidas em cada rota não pode exceder sua capacidade. O objetivo é construir rotas que minimizem o custo total, em geral, medido em distância percorrida, tempo ou número de veículos, sujeitas às restrições de capacidade (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014).

Essencialmente, o CVRP pode ser caracterizado pelos seguintes elementos estruturais:

- **Depósito único:** todos os veículos iniciam e terminam a rota no mesmo ponto (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014);
- **Frota homogênea:** veículos possuem capacidades e custos operacionais iguais (LIU; HUANG; MA, 2009);

- **Demanda conhecida:** cada cliente apresenta uma demanda fixa e previamente definida (LIU; HUANG; MA, 2009);
- **Restrição de capacidade:** o total atendido pelo veículo não deve exceder sua capacidade (LIU; HUANG; MA, 2009);
- **Visita única:** cada cliente deve ser atendido exatamente uma vez por um veículo (JARADAT; AYOB; ALMARASHDEH, 2016);
- **Objetivo:** minimizar o custo total (distância, tempo, frota utilizada) (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014).

### 3.3.1 Aplicações práticas do CVRP

Devido à sua versatilidade e relevância prática, o CVRP aparece em diversos setores:

- **Distribuição de mercadorias** em redes varejistas, atacado e logística B2B (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021);
- **Coleta de resíduos sólidos**, rotas de caminhões compactadores (JIANG; LU; ZHANG, 2022);
- **Serviços de entrega expressa e logística urbana** no chamado “último quilômetro” (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021);
- **Distribuição de alimentos** e produtos perecíveis (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021);
- **Planejamento de rotas de abastecimento** em cadeias industriais complexas (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014);
- **Gestão de transporte corporativo e universitário**, como redes internas de ônibus, caso analisado neste trabalho.

Essas aplicações refletem a importância do CVRP na redução de custos logísticos, no aumento da produtividade e na melhoria da qualidade dos serviços prestados (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021).

### 3.3.2 Desafios computacionais e variantes

O CVRP é um problema clássico de otimização combinatória NP-difícil, o que torna sua resolução computacionalmente desafiadora conforme o número de clientes cresce. Mesmo instâncias moderadas podem exigir enormes capacidades computacionais caso se tente obter a solução ótima por métodos exatos (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014). Por isso, a literatura apresenta três grandes famílias de métodos de solução:

1. **Métodos exatos** Baseados em programação inteira, branch-and-cut e branch-and-price. São adequados apenas para instâncias pequenas devido ao custo computacional elevado.
2. **Heurísticas clássicas** Incluem algoritmos construtivos, como Clarke & Wright, e heurísticas de melhoria, como 2-opt, 3-opt, VND e VNS ([STANOJEVIĆ; STANOJEVIĆ; VUJOŠEVIĆ, 2013](#)).
3. **Metaheurísticas** Como algoritmos genéticos, busca tabu, recozimento simulado, algoritmos meméticos e métodos híbridos ([MOLINA; SALMERON; EGUIA, 2020](#)).

Além disso, inúmeras variantes foram introduzidas ao longo das últimas décadas para atender diferentes realidades operacionais, incluindo:

- CVRP com janelas de tempo (CVRPTW);
- CVRP com múltiplos depósitos;
- CVRP dinâmico e estocástico;
- CVRP verde e ecoeficiente;
- CVRP com dependência de carregamento e restrições de eixo.

Tais extensões refletem a evolução e a diversidade das aplicações do CVRP em sistemas de transporte modernos ([MATIJEVIĆ; ILIN; PARDALOS, 2024](#)).

### 3.3.3 Resumo conceitual

O CVRP consolidou-se como um dos problemas centrais da pesquisa em logística e pesquisa operacional. Desde sua formulação, tornou-se essencial para a modelagem de sistemas reais de distribuição e transporte, permitindo ganhos significativos em eficiência, custos e sustentabilidade ([MACHADO; MAURI; ROSA, 2021](#)).

No contexto deste trabalho, o CVRP fornece a base teórica para a modelagem das rotas dos ônibus circulares da USP. A heurística de Clarke & Wright, adotada como método de solução, encaixa-se diretamente na família de heurísticas tradicionais para VRP, oferecendo equilíbrio entre qualidade da solução e viabilidade de implementação computacional, conforme amplamente discutido na literatura ([SUBRAMANIAN; UCHOA; OCHI, 2013](#)).

## 3.4 O Problema de Roteamento de Veículos com Capacidade (CVRP)

O *Capacitated Vehicle Routing Problem* (CVRP) é uma das variantes mais importantes e estudadas do Problema de Roteamento de Veículos (VRP). Assim como o VRP clássico, o

CVRP busca determinar um conjunto de rotas eficientes para atender um conjunto de clientes geograficamente distribuídos, mas incorpora explicitamente a restrição de capacidade dos veículos. Por essa razão, o CVRP é amplamente aplicado em problemas reais de logística, transporte e distribuição (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021).

No CVRP, uma frota de veículos homogêneos parte de um *único depósito* para atender um conjunto de clientes, cada qual com uma demanda conhecida, retornando ao depósito após completar a rota. Cada veículo possui capacidade fixa, o que implica que o somatório das demandas atendidas em cada rota não pode exceder sua capacidade. O objetivo é construir rotas que minimizem o custo total em geral, medido em distância percorrida, tempo ou número de veículos sujeitas às restrições de capacidade (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014).

Essencialmente, o CVRP pode ser caracterizado pelos seguintes elementos estruturais:

- **Depósito único:** todos os veículos iniciam e terminam a rota no mesmo ponto (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014);
- **Frota homogênea:** veículos possuem capacidades e custos operacionais iguais (LIU; HUANG; MA, 2009);
- **Demanda conhecida:** cada cliente apresenta uma demanda fixa e previamente definida (LIU; HUANG; MA, 2009);
- **Restrição de capacidade:** o total atendido pelo veículo não deve exceder sua capacidade (LIU; HUANG; MA, 2009);
- **Visita única:** cada cliente deve ser atendido exatamente uma vez por um veículo (JARADAT; AYOB; ALMARASHDEH, 2016);
- **Objetivo:** minimizar o custo total (distância, tempo, frota utilizada) (SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014).

### 3.5 Aplicações práticas do CVRP

Devido à sua versatilidade e relevância prática, o CVRP aparece em diversos setores (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021);:

- **Distribuição de mercadorias** em redes varejistas, atacado e logística B2B
- **Coleta de resíduos sólidos**, rotas de caminhões compactadores;
- **Serviços de entrega expressa e logística urbana** no chamado “último quilômetro”
- **Distribuição de alimentos** e produtos perecíveis;
- **Planejamento de rotas de abastecimento** em cadeias industriais complexas

- **Gestão de transporte corporativo e universitário**, como redes internas de ônibus caso analisado neste trabalho.

Essas aplicações refletem a importância do CVRP na redução de custos logísticos, no aumento da produtividade e na melhoria da qualidade dos serviços prestados

### 3.6 Desafios computacionais e variantes

O CVRP é um problema clássico de otimização combinatória NP-difícil, o que torna sua resolução computacionalmente desafiadora conforme o número de clientes cresce. Mesmo instâncias moderadas podem exigir enormes capacidades computacionais caso se tente obter a solução ótima por métodos exatos ([SPLIET; GABOR; DEKKER, 2014](#)). Por isso, a literatura apresenta três grandes famílias de métodos de solução:

1. **Métodos exatos** Baseados em programação inteira, branch-and-cut e branch-and-price. São adequados apenas para instâncias pequenas devido ao custo computacional elevado.
2. **Heurísticas clássicas** Incluem algoritmos construtivos, como Clarke & Wright, e heurísticas de melhoria, como 2-opt, 3-opt, VND e VNS ([STANOJEVIĆ; STANOJEVIĆ; VUJOŠEVIĆ, 2013](#)).
3. **Metaheurísticas** Como algoritmos genéticos, busca tabu, recozimento simulado, algoritmos meméticos e métodos híbridos ([MOLINA; SALMERON; EGUIA, 2020](#)).

Além disso, inúmeras variantes foram introduzidas ao longo das últimas décadas para atender diferentes realidades operacionais, incluindo:

- CVRP com janelas de tempo (CVRPTW);
- CVRP com múltiplos depósitos;
- CVRP dinâmico e estocástico;
- CVRP verde e ecoeficiente;
- CVRP com dependência de carregamento e restrições de eixo.

Tais extensões refletem a evolução e a diversidade das aplicações do CVRP em sistemas de transporte modernos. O CVRP consolidou-se como um dos problemas centrais da pesquisa em logística e pesquisa operacional. Desde sua formulação, tornou-se essencial para a modelagem de sistemas reais de distribuição e transporte, permitindo ganhos significativos em eficiência, custos e sustentabilidade ([MACHADO; MAURI; ROSA, 2021](#)). No contexto deste trabalho, o CVRP fornece a base teórica para a modelagem das rotas dos ônibus circulares da USP. A

heurística de Clarke & Wright, adotada como método de solução, encaixa-se diretamente na família de heurísticas tradicionais para VRP, oferecendo equilíbrio entre qualidade da solução e viabilidade de implementação computacional, conforme amplamente discutido na literatura.

### 3.7 Métodos de Solução

Até o presente momento, não há algoritmos que, simultaneamente, sejam rápidos e consumam pouca memória capazes de resolver de maneira exata todas as instâncias de VRP. Em problemas reais, especialmente aqueles de grande porte, métodos exatos tornam-se inviáveis devido ao crescimento explosivo do espaço de soluções. Como alternativa, surgiram diversas abordagens heurísticas que, embora não garantam uma solução ótima global, têm se mostrado altamente eficientes na obtenção de soluções iniciais de boa qualidade. Essas soluções podem, posteriormente, servir como ponto de partida para procedimentos exatos que buscam refinar o resultado.

O VRP é reconhecido como um problema NP-difícil, o que implica que o esforço computacional necessário para encontrar a solução ótima cresce de forma explosiva à medida que o número de pontos aumenta. Em outras palavras, mesmo pequenos acréscimos no tamanho do problema tornam inviável a aplicação de algoritmos exatos, já que o número de combinações possíveis cresce de maneira superexponencial. Consequentemente, na prática, resolver o VRP de forma ótima para instâncias grandes, como sistemas de transporte ou distribuição em larga escala, é praticamente impossível dentro de um tempo razoável.

Por esse motivo, grande parte das aplicações reais recorre a métodos que não garantem otimalidade global, mas que são capazes de produzir soluções de elevada qualidade operacional em tempos de processamento compatíveis com as necessidades do planejamento e da operação. Esses métodos dividem-se em três grandes categorias:

1. **Métodos exatos:** buscam a solução ótima, modelando o VRP como um problema de Programação Linear Inteira (PLI) e utilizando algoritmos como *Branch-and-Cut* e *Branch-and-Price*. Embora matematicamente precisos, esses métodos apresentam limitações severas para instâncias maiores devido ao custo computacional crescente. Assim, sua aplicação é restrita a problemas de pequeno a médio porte, ou a situações em que uma formulação altamente simplificada é aceitável (CORDEAU; TOTH; VIGO, 2005).
2. **Heurísticas:** são procedimentos que constroem soluções de forma rápida, seguindo regras práticas como escolher sempre o ponto mais próximo (*Nearest Neighbor*) ou unir rotas que produzem maior economia, como ocorre na heurística de Clarke–Wright. Embora não assegurem a obtenção da solução ótima, heurísticas são extremamente eficientes para gerar soluções iniciais e são amplamente utilizadas em contextos reais devido à sua simplicidade, rapidez e bom desempenho prático (CLARKE; WRIGHT, 1964).

3. **Metaheurísticas:** constituem abordagens mais sofisticadas que orientam heurísticas simples para explorar de forma inteligente o espaço de soluções, reduzindo o risco de aprisionamento em ótimos locais (CLARKE; WRIGHT, 1964). Entre as metaheurísticas mais relevantes para o VRP destacam-se:

- **Algoritmos Genéticos (AG):** inspirados na evolução natural, criam uma população de rotas e aplicam operadores de cruzamento e mutação para gerar novas soluções ao longo das gerações.
- **Busca Tabu (*Tabu Search*):** utiliza uma estrutura de memória (lista tabu) para impedir que o algoritmo retorne a soluções já exploradas recentemente, aumentando a diversidade da busca.
- ***Simulated Annealing* (SA):** baseado no processo físico de recozimento de metais, permite ocasionalmente aceitar soluções piores no início da execução, favorecendo a exploração ampla do espaço de busca antes da convergência.

### 3.8 Heurísticas

As heurísticas constituem um conjunto de métodos empregados para obter soluções satisfatórias em problemas de otimização cuja resolução exata é inviável ou excessivamente demorada. Diferentemente dos algoritmos exatos, que garantem a identificação da melhor solução, os procedimentos heurísticos produzem resultados aproximados em prazos significativamente menores, o que os torna adequados para problemas de grande escala e elevada complexidade, comuns na computação e na pesquisa operacional (CLARKE; WRIGHT, 1964).

A principal característica das heurísticas é a capacidade de explorar, de maneira eficiente, um espaço de busca muito amplo utilizando apenas informações parciais do problema. Embora não assegurem a obtenção da melhor solução possível, frequentemente alcançam resultados suficientemente bons para uso prático, cumprindo as necessidades operacionais sem exigir o elevado custo computacional dos métodos exatos.

Esses métodos apresentam diversas vantagens: possuem alto desempenho computacional, demandando menos tempo e recursos; são simples de implementar, pois seguem regras e estratégias diretas; e são flexíveis, permitindo adaptações a diferentes estruturas de problemas e ambientes. Além disso, combinam a exploração de novas regiões do espaço de solução com a exploração de regiões já identificadas como promissoras, favorecendo a busca de boas soluções mesmo em situações complexas.

A aplicação das heurísticas é muito ampla e inclui roteamento de veículos, planejamento de produção, alocação de recursos, agendamento de tarefas e projeto de redes. Em muitos desses contextos, encontrar a melhor solução é impraticável devido ao tamanho do problema ou às restrições de tempo e processamento. Nesses casos, a heurística representa um caminho viável e

eficaz para a obtenção de soluções de qualidade adequada para uso real (CLARKE; WRIGHT, 1964).

Apesar de suas vantagens, as heurísticas apresentam limitações. A principal é a ausência de garantia de que a solução encontrada seja a melhor possível. A qualidade do resultado depende do método utilizado e das condições iniciais. Em certas situações, o algoritmo pode ficar preso em soluções inferiores e não conseguir avançar para resultados melhores. Ainda assim, as heurísticas desempenham papel fundamental na área de otimização, consolidando-se como ferramentas essenciais para enfrentar problemas complexos em diversas áreas da ciência e da engenharia.

### 3.9 Clarke–Wright

A heurística de Clarke e Wright, proposta originalmente em 1964, foi desenvolvida com o propósito de organizar de forma mais eficiente as rotas de veículos que partem de um ponto central para atender diversos destinos. Seu objetivo principal é reduzir a distância total percorrida ou, de maneira equivalente, minimizar os custos operacionais associados ao transporte (CLARKE; WRIGHT, 1964).

O método conhecido como *Clarke and Wright Savings* inicia com a configuração mais simples possível: cada cliente é atendido individualmente por um veículo que parte do depósito e retorna a ele em seguida. A partir dessa configuração inicial, o algoritmo calcula a economia gerada ao unir dois clientes em uma mesma rota. Esse valor, chamado de *economia* ou *savings*, indica o quanto é vantajoso substituir duas rotas separadas por uma rota combinada. (CLARKE; WRIGHT, 1964).

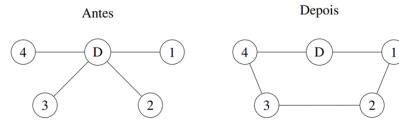
A economia entre dois clientes  $i$  e  $j$  é obtida por meio da seguinte expressão:

$$S_{ij} = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j), \quad (3.1)$$

em que  $d(D, i)$  e  $d(D, j)$  representam as distâncias entre o depósito  $D$  e cada um dos clientes, enquanto  $d(i, j)$  corresponde à distância que separa os dois clientes entre si.

Após calcular esses valores para todos os pares possíveis, organiza-se a lista de economias em ordem decrescente, de modo que as combinações mais vantajosas sejam avaliadas primeiro. A partir dessa ordenação, o algoritmo inicia a construção das rotas, unindo clientes sempre que essa fusão não violar as restrições do problema, como limites de capacidade do veículo ou regras de estruturação das rotas. O procedimento segue de forma progressiva, incorporando conexões viáveis e descartando aquelas incompatíveis com as restrições. Ao final desse processo iterativo, obtêm-se rotas mais curtas e eficientes, com redução significativa da distância total percorrida pela frota. (CLARKE; WRIGHT, 1964).

Figura 3 – Exemplo de junção de rotas do Clarke-Wright



**Fonte:** *Elaboração própria*

A heurística é valorizada por sua simplicidade e eficácia em encontrar soluções viáveis rapidamente, especialmente em problemas complexos de roteamento.

A economia de custo  $S_{ij}$  para a fusão das rotas  $R_i$  e  $R_j$  é dada por:

$$S_{ij} = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j), \quad (3.2)$$

onde  $d(D, i)$  e  $d(D, j)$  representam as distâncias do depósito  $D$  até os clientes  $i$  e  $j$ , respectivamente, e  $d(i, j)$  é a distância entre os clientes  $i$  e  $j$ .

A fusão das rotas  $R_i$  e  $R_j$  é factível se a soma das demandas dos clientes  $i$  e  $j$  não exceder a capacidade máxima  $C$  do veículo:

$$q_i + q_j \leq C, \quad (3.3)$$

onde  $q_i$  e  $q_j$  são as demandas dos clientes  $i$  e  $j$ , respectivamente.

Considere no grafo com as seguintes distâncias:

$$d(D, 1) = 10, \quad d(D, 2) = 12, \quad d(D, 3) = 8, \quad d(D, 4) = 9$$

$$d(1, 2) = 6, \quad d(2, 3) = 7, \quad d(3, 4) = 5, \quad d(4, 1) = 4$$

Calculamos os *savings*:

$$S_{1,2} = 10 + 12 - 6 = 16$$

$$S_{4,1} = 9 + 10 - 4 = 15$$

$$S_{2,3} = 12 + 8 - 7 = 13$$

$$S_{3,4} = 8 + 9 - 5 = 12$$

Após o cálculo, ordenamos os *savings* em ordem decrescente e formamos as rotas otimizadas seguindo os passos:

1. Unimos os clientes 1 e 2, pois  $S_{1,2}$  é o maior.

2. Unimos os clientes 4 e 1, estendendo a rota anterior.
3. Unimos os clientes 2 e 3, conectando mais um nó à sequência.
4. Finalmente, conectamos 3 e 4, formando um único circuito fechado.

O grafo final reflete essa nova configuração, na qual os clientes estão conectados diretamente entre si, reduzindo a distância total percorrida e otimizando a rota. A heurística é valorizada por sua simplicidade e eficácia em encontrar soluções viáveis rapidamente, especialmente em problemas complexos de roteamento.

### 3.10 Pseudocódigo da Heurística de Clarke–Wright

A utilização de uma abordagem heurística neste trabalho se justifica pela própria natureza do VRP, classificado como NP-difícil, o que torna inviável obter soluções exatas em tempo razoável quando o número de pontos cresce, como ocorre no sistema de ônibus circulares da USP. Métodos exatos demandariam alto custo computacional e não conseguiriam incorporar todas as restrições reais do campus, como capacidade dos veículos, múltiplas paradas, pontos críticos de demanda e necessidade de rotas equilibradas (CLARKE; WRIGHT, 1964).

Diante disso, a heurística de Clarke–Wright, em sua versão paralela, mostra-se particularmente adequada. Um pseudocódigo simplificado pode ser descrito da seguinte forma:

---

#### Algoritmo 1: Clarke-Wright

---

**Passo 1:** Calcular as economias  $s(i, j) = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j)$  para cada par de nós de demanda  $(i, j)$ , vide Seção 2.3.

**Passo 2:** Classificar as economias  $s(i, j)$  e listá-las em ordem decrescente. Processar a lista de economias começando com o maior valor.

**Passo 3:** Para cada economia  $s(i, j)$  na lista:

*Seção a:* Se nem  $i$  nem  $j$  foram atribuídos a uma rota, criar uma nova rota incluindo  $i$  e  $j$ .

*Seção b:* Se exatamente um dos nós for atribuído a uma rota existente e estiver nas extremidades da rota, adicionar o link  $(i, j)$  à mesma rota.

*Seção c:* Se ambos os nós já foram atribuídos a duas rotas diferentes e estão nas extremidades das rotas nas listas encadeadas, mesclar ambas as rotas.

**Passo 4:** Se a lista de economias não foi completamente processada, retornar ao Passo 3, processando o próximo item. Caso contrário, parar e a solução do VRP será composta pelas rotas criadas no Passo 3.

Se algum nó não foi atribuído a uma rota, ele deve ser atendido por uma rota que começa e termina no depósito  $D$ .

---

A heurística para resolver o VRP costuma ser dividida em métodos construtivos e métodos de melhoria. As heurísticas construtivas criam rotas progressivamente, partindo de uma solução vazia e adicionando clientes até que todos sejam atendidos. Exemplos clássicos incluem a heurística de Clarke–Wright (CLARKE; WRIGHT, 1964) e a proposta de Mole e Jameson (MOLE;

JAMESON, 1976), que melhora o desempenho da primeira. Trabalhos como os de Christofides, Mingozi e Toth (CHRISTOFIDES; MINGOZZI; TOTH, 1981), Thompson e Psaraftis (THOMPSON; PSARAFTIS, 1993) e Kindervater e Savelsbergh (KINDERVATER; SAVELSBERGH, 2003) representam extensões importantes dessa linha, podendo operar de forma sequencial, expandindo uma rota por vez, ou paralela, construindo várias rotas simultaneamente.

Os métodos de melhoria, por sua vez, partem de uma solução já construída e procuram aprimorá-la ao reestruturar partes das rotas. Essas técnicas podem atuar em uma única rota (intra-rota) ou envolver diversas rotas simultaneamente (inter-rotas). A base desses métodos é a estrutura de vizinhança  $k$ -opt, que realiza trocas sistemáticas de  $k$  arestas por outras  $k$  arestas em busca de uma configuração superior. Entre os métodos mais conhecidos, o 2-opt, proposto por Croes (CROES, 1958), é um dos mais usados devido à sua simplicidade e bons resultados práticos.

A heurística de Clarke e Wright pode ser implementada de duas formas distintas, que influenciam diretamente a qualidade das rotas geradas e a eficiência do processo de construção das soluções. Essas versões são conhecidas como abordagem sequencial e abordagem paralela, e diferem na maneira como as fusões entre rotas são realizadas.

### 3.10.1 Abordagem Sequencial

Na versão sequencial, as rotas são combinadas de maneira estritamente ordenada, seguindo passo a passo a lista de economias (*savings*) do maior para o menor valor. Nesse processo, somente uma rota é construída por vez. O algoritmo inicia com rotas individuais para cada cliente e, a partir dos *savings* calculados, une gradualmente duas rotas sempre que essa fusão resultar em uma economia positiva e respeitar as restrições de capacidade dos veículos (TOTH; VIGO, 2002).

Essa abordagem é simples e intuitiva, mas possui uma limitação importante: a cada fusão realizada, o espaço de possibilidades futuras diminui, podendo levar o algoritmo a “fechar” prematuramente uma rota que poderia ser combinada de forma mais eficiente posteriormente. Isso pode gerar soluções menos flexíveis e, em muitos casos, com custo total maior. Fernando et al. (2024) destacam que a versão sequencial é mais suscetível a ficar presa em soluções locais, pois cada etapa limita a construção das etapas seguintes.

### 3.10.2 Abordagem Paralela

Na versão paralela, as fusões entre rotas são realizadas de maneira simultânea, analisando o conjunto inteiro de economias antes de consolidar as rotas finais. Em vez de construir uma rota completa de cada vez, o algoritmo permite que várias rotas se desenvolvam em paralelo, (TOTH; VIGO, 2002) com base nos maiores *savings* disponíveis no momento. Isso proporciona duas vantagens centrais:

- **Maior flexibilidade:** o algoritmo não aceita fusões de forma imediata e obrigatória; ele considera múltiplas possibilidades ao mesmo tempo.
- **Melhor desempenho prático:** como não “fecha” rotas prematuramente, consegue gerar combinações que resultam em menores distâncias totais percorridas.

A versão paralela geralmente produz soluções mais eficientes que a sequencial (FERNANDO; THIBBOTUWAWA; KILIC, 2024) mostra que, especialmente em problemas de maior escala ou com rotas que precisam atender múltiplos grupos de pontos, como no caso dos ônibus circulares da USP.

Justificativa da Escolha da Versão Paralela No contexto das rotas dos ônibus circulares da USP, a versão paralela apresenta vantagens claras:

1. O campus possui muitos pontos de parada distribuídos de forma irregular;
2. A demanda entre os pontos é heterogênea e exige rotas equilibradas;
3. As linhas não podem ser “fechadas” cedo demais, pois isso prejudicaria o balanceamento;
4. O objetivo é reduzir distância e tempo, garantindo viabilidade operacional.

Assim, a abordagem paralela oferece:

- Soluções básicas factíveis (IBFS) mais eficientes;
- Menor custo total de roteirização;
- Rotas mais curtas e bem estruturadas;
- Melhor adaptação ao cenário real dos circulares da USP.

Como reforçado por (FERNANDO; THIBBOTUWAWA; KILIC, 2024), a versão paralela tende a gerar resultados superiores em comparação com a versão sequencial, motivo pelo qual foi a opção adotada neste trabalho.

### 3.11 Transporte Coletivo na USP: Diagnóstico e Proposições de Melhoria

Um estudo de grande relevância para o entendimento da mobilidade interna na Universidade de São Paulo foi desenvolvido em 2010 por alunos da Escola Politécnica, como parte de um projeto de formatura. Intitulado *Transporte Coletivo na USP: Diagnóstico e Proposições de Melhoria* (PAIVA et al., 2010), o trabalho realizou um mapeamento abrangente do funcionamento

do transporte coletivo na Cidade Universitária, seguido da construção de propostas voltadas para aprimorar sua eficiência.

Para compor o diagnóstico, o grupo contou com duas bases principais de pesquisa. A primeira, conduzida pela COCESP (Coordenadoria do Campus da Capital), buscou identificar o perfil e a quantidade de usuários que utilizavam os ônibus circulares. A segunda, também com apoio da COCESP, teve como objetivo levantar os padrões de origem e destino dos passageiros, possibilitando compreender os fluxos predominantes dentro do campus (PAIVA et al., 2010).

É importante considerar as especificidades do contexto analisado no estudo: à época, os circulares eram totalmente gratuitos, operados diretamente pela Prefeitura do Campus, e circulavam exclusivamente no interior da Cidade Universitária. Ademais, a Estação Butantã do Metrô ainda não havia sido inaugurada, embora sua abertura fosse prevista e discutida no trabalho como um elemento que, futuramente, alteraria significativamente a demanda pelo sistema.

No que se refere às linhas municipais que atendiam a CUASO naquele período, o estudo identificou a existência de dez linhas provenientes de diferentes regiões da Região Metropolitana de São Paulo.

### **3.12 Reorganização de linhas como ferramenta de melhoria operacional**

A literatura de planejamento de transporte público mostra que mudanças no desenho das linhas e na distribuição da frota podem melhorar significativamente a qualidade do serviço, mesmo sem aumento do número total de veículos. Um exemplo disso é a experiência anterior com as antigas linhas internas 8012/10 e 8022/10, que foram objeto de reestruturação antes da implantação das rotas atuais (SANTANA, 2019).

Na configuração original, o sistema operava com apenas duas linhas principais (8012/10 e 8022/10), cada uma com nove veículos dedicados. Na prática, isso significava que toda a demanda interna do campus se concentrava em dois itinerários relativamente longos e muito carregados, o que favorecia situações de superlotação e tempos de espera elevados, especialmente nos horários de pico.

Após o redesenho, a frota total permaneceu a mesma (18 veículos), mas passou a ser distribuída entre três linhas: 8012/10 com cinco ônibus, 8022/10 com oito e a nova linha 8032/10 com cinco veículos (SANTANA, 2019). Em vez de aumentar a quantidade de ônibus, o que se fez foi fragmentar e redistribuir a oferta, criando uma rota adicional voltada a absorver parte da demanda que antes se concentrava nas duas linhas originais.

Os dados de movimentação de passageiros ilustram bem esse efeito. Antes da criação da nova linha, as duas rotas existentes transportavam juntas cerca de 35,2 mil passageiros em um dia útil típico. Após a reconfiguração, o volume total permaneceu praticamente no mesmo patamar, mas passou a se distribuir da seguinte forma: aproximadamente 11 mil passageiros/dia

na 8012/10, 17 mil passageiros/dia na 8022/10 e 7,4 mil passageiros/dia na 8032/10. Ou seja, a demanda agregada se manteve estável, mas foi espalhada por três eixos distintos, reduzindo a pressão sobre cada serviço isoladamente.

Do ponto de vista operacional, isso significa que a carga média por veículo também se tornou mais equilibrada. No arranjo antigo, 18 ônibus dividiam o atendimento de 35,2 mil usuários, resultando em uma utilização média bastante elevada em cada veículo. Na configuração com três linhas, parte da demanda é explicitamente canalizada para a nova rota 8032/10, que atua como “linha de alívio”, tirando passageiros das rotas mais saturadas e oferecendo um caminho mais direto para determinados deslocamentos. A consequência esperada é a redução da lotação nos horários críticos, melhora nas condições de embarque/desembarque e diminuição do tempo em fila nos pontos de maior movimento.

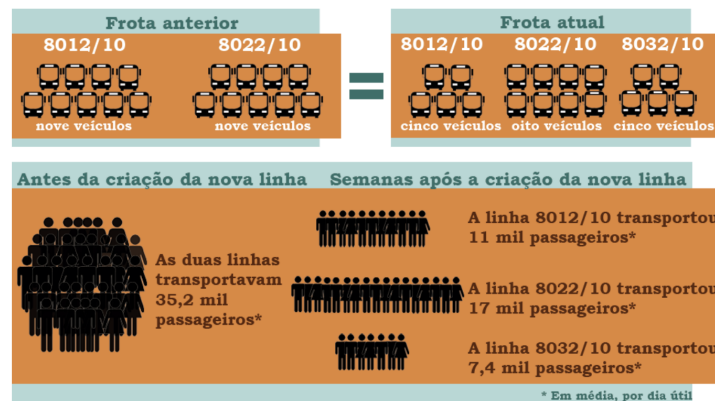
Esse exemplo reforça um ponto central da fundamentação teórica do TCC: não é apenas o tamanho da frota que determina o desempenho do sistema, mas principalmente como essa frota é distribuída em rotas, ciclos e frequências. Em outras palavras, o problema é de desenho de rede e roteirização, mais do que simplesmente de quantidade de ônibus. Ferramentas de otimização, como heurísticas de roteamento de veículos, são justamente empregadas para encontrar combinações de linhas e trajetos que usem melhor os mesmos recursos (veículos, motoristas, combustível), distribuindo a demanda de forma mais homogênea e reduzindo a quilometragem ociosa.

No contexto do seu trabalho, esse caso anterior serve como evidência empírica de que intervenções no desenho das rotas podem trazer ganhos significativos sem necessidade de ampliar recursos. A análise das atuais linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10 segue a mesma lógica: a partir da medição de distâncias, tempos de ciclo, headways e demandas por ponto, busca-se redesenhar o sistema para reduzir a distância total percorrida e, ao mesmo tempo, melhorar a distribuição da oferta ao redor dos principais polos geradores de viagens do campus.

### 3.13 Evolução da frota por linha

A figura 4 apresenta como a frota de ônibus foi redistribuída quando a nova linha 8032/10 foi criada, a partir de um cenário inicial com apenas duas linhas (8012/10 e 8022/10). No arranjo original, cada uma dessas linhas operava com 9 veículos, totalizando 18 ônibus em circulação. Após a introdução da 8032/10, a frota total permaneceu a mesma (18 veículos), mas passou a ser dividida entre três serviços: 5 veículos na 8012/10, 8 na 8022/10 e 5 na 8032/10 (SANTANA, 2019).

Figura 4 – Mapa de pontos dos circulares.



Fonte: SPTrans.

O ponto central dessa tabela é mostrar que a intervenção não foi baseada em “comprar mais ônibus”, mas em reorganizar a frota existente. Em vez de concentrar 18 veículos em apenas duas linhas muito carregadas, o sistema passa a operar com três linhas, permitindo desenhar trajetos mais específicos e adequar melhor a oferta de viagens a diferentes eixos de demanda. Em termos de fundamentação teórica, essa redistribuição ilustra o princípio de que mudanças de desenho de rede e de alocação de frota podem melhorar a qualidade do serviço sem aumento de custo operacional direto (número de veículos permanece constante). A Tabela 1 apresenta a redistribuição da frota decorrente da criação da linha 8032/10. Antes da implantação, as linhas 8012/10 e 8022/10 operavam com 9 veículos cada, totalizando 18 unidades concentradas em apenas duas linhas. Após a introdução da 8032/10, essa mesma frota foi redistribuída entre três serviços: 8012/10 passou a operar com 5 veículos, 8022/10 com 8, e a nova 8032/10 com 5.

Tabela 1 – Evolução da frota das linhas 8012/10, 8022/10 e 8032/10.

Situação	Linha	Frota (veículos)
Antes da criação da 8032/10	8012/10	9
	8022/10	9
Após a criação da 8032/10	8012/10	5
	8022/10	8
	8032/10	5

Fonte: Elaboração própria.

Essa reorganização evidencia que a criação da 8032/10 não demandou aumento de frota, mas sim uma realocação interna, permitindo maior equilíbrio entre as linhas e reduzindo a sobrecarga anteriormente concentrada. Dessa forma, a tabela mostra que a expansão da rede

foi viabilizada exclusivamente por redistribuição operacional, mantendo constante o total de veículos disponíveis.

### 3.14 Demanda média diária por linha

A Tabela 2 sintetiza como o volume de passageiros se comportou antes e depois da criação da linha 8032/10. No cenário anterior, as duas linhas existentes (8012/10 e 8022/10, consideradas em conjunto) transportavam, em média, 35,2 mil passageiros por dia útil. Após a criação da 8032/10, a demanda total manteve-se praticamente a mesma, mas passou a ser distribuída entre três linhas: cerca de 11 mil passageiros/dia na 8012/10, 17 mil na 8022/10 e 7,4 mil na 8032/10 (SANTANA, 2019).

Tabela 2 – Demanda média diária de passageiros por linha antes e após a criação da 8032/10.

Situação	Linha	Passageiros/dia (mil)
Antes da criação da 8032/10	8012/10 + 8022/10	35,2
	8012/10	11,0
Após a criação da 8032/10	8022/10	17,0
	8032/10	7,4

**Fonte:** Elaboração própria.

Essa tabela evidencia dois aspectos importantes como a estabilidade da demanda global: o total de passageiros atendidos pelo sistema não se altera de forma significativa com a criação da nova linha. Ou seja, a intervenção não “cria” demanda, mas reorganiza o atendimento da demanda já existente. Redistribuição de fluxos: parte dos passageiros que antes se concentravam em apenas duas linhas passa a ser atendida por uma terceira opção (8032/10). Na prática, isso reduz a pressão de lotação sobre as linhas originais e melhora o conforto e a dispersão da demanda ao longo da rede.

### 3.15 Produtividade global do sistema

A Tabela 3 resume o efeito da reestruturação em termos de produtividade do sistema como um todo. Ela compara dois indicadores agregados: Frota total, que permanece constante em 18 veículos antes e depois da criação da 8032/10; Passageiros transportados por dia e passageiros/dia por veículo. No cenário inicial (duas linhas), os 18 veículos transportavam 35,2 mil passageiros/dia, o que corresponde a uma produtividade média de 1,96 mil passageiros por veículo. Após a criação da nova linha, o total sobe levemente para 35,4 mil passageiros/dia, resultando em cerca de 1,97 mil passageiros por veículo. A Tabela 3 mostra que a criação da linha 8032/10, mesmo mantendo a mesma frota total de 18 veículos, aumentou levemente a produtividade operacional do sistema. O número de passageiros transportados por dia passou de

35,2 mil para 35,4 mil, enquanto a produtividade por veículo subiu de 1,96 mil para 1,97 mil passageiros/dia por ônibus.

Tabela 3 – Comparação global de frota e produtividade antes e depois da criação da 8032/10.

Situação	Linhas	Frota total	Passageiros/dia (mil)	Passag./dia por veículo (mil)
Antes da criação da 8032/10	2	18	35,2	1,96
Após criação da 8032/10	3	18	35,4	1,97

Fonte: Elaboração própria.

Essa variação indica que a reorganização das linhas não implicou aumento de frota, mas sim redistribuição da carga de demanda. Isso é coerente com os resultados encontrados neste estudo para o cenário otimizado das Rotas 1–4, onde melhorias de cobertura e redução de distâncias não exigem mais veículos, mas sim um redesenho mais eficiente dos itinerários. A produtividade média do sistema permanece praticamente constante. Não há um ganho expressivo de “eficiência” no sentido estrito de transportar muito mais gente com o mesmo número de ônibus; o indicador de passageiros por veículo cresce apenas marginalmente.

O principal benefício é qualitativo e distributivo, não apenas quantitativo. Do ponto de vista de planejamento de transportes, o resultado mais relevante não é o aumento da produtividade global, mas a possibilidade de diminuir a superlotação em algumas viagens específicas, encurtar percursos para certos grupos de usuários e equilibrar melhor a oferta de assentos entre diferentes eixos da rede.

Com a implantação da linha 8032/10, houve uma redistribuição estratégica da capacidade existente: a 8012/10 passou de nove para cinco veículos, a 8022/10 aumentou sua frota para oito, e a nova 8032/10 iniciou suas operações com cinco veículos. Essa reorganização não ampliou o número total de ônibus, mas realocou recursos de maneira mais racional, alinhada às zonas de maior fluxo interno. Os dados comparativos do período subsequente reforçam os efeitos positivos dessa intervenção:

- a 8012/10 passou a transportar cerca de 11 mil passageiros/dia útil;
- a 8022/10 cerca de 17 mil passageiros/dia útil;
- a nova 8032/10 em torno de 7,4 mil passageiros/dia útil.

Essa redistribuição suavizou a pressão sobre as rotas mais críticas e tornou os fluxos mais equilibrados entre as linhas, reduzindo episódios de superlotação e melhorando o conforto percebido pelos usuários. Além disso, a criação da nova linha diminuiu sobreposições desnecessárias, otimizando os trajetos e reduzindo redundâncias, um dos pontos frequentemente destacados como problemáticos nas análises do *Jornal da USP*.

A reorganização também contribuiu para maior regularidade operacional: ao diminuir a saturação da 8012/10 e da 8022/10, os intervalos tornaram-se mais estáveis e o tempo de

espera, mais previsível. Esse efeito é coerente com o que a literatura especializada identifica como resultado típico de redes que passam por processos de “descompressão de demanda”. Em síntese, a criação da linha 8032/10 provocou transformações importantes na dinâmica interna do transporte do campus, demonstrando como mudanças relativamente simples, sem expansão de frota, podem gerar ganhos substanciais na qualidade do serviço.

Os efeitos observados validam a necessidade de análises sistemáticas de otimização, como o presente TCC propõe, reforçando que intervenções baseadas em modelagem e diagnóstico são essenciais para elevar o desempenho do sistema BUSP e orientar futuras políticas de mobilidade na USP. A Tabela 4 apresenta um panorama sintético, porém abrangente, dos impactos operacionais decorrentes da criação da linha 8032/10 no sistema de ônibus internos da USP. Os dados evidenciam que a mudança não alterou a frota total disponível mantida em 18 veículos, mas promoveu uma redistribuição estratégica dos recursos entre as linhas. Enquanto anteriormente os 18 ônibus eram divididos igualmente entre 8012/10 e 8022/10, a introdução da 8032/10 levou à realocação dos veículos, passando para uma estrutura mais equilibrada (5, 8 e 5 veículos, respectivamente). Essa reorganização teve efeitos diretos sobre o comportamento da demanda.

Tabela 4 – Comparativo entre indicadores antes e depois da criação da linha 8032/10.

Indicador	Antes da criação da 8032/10	Depois da criação da 8032/10	Impacto Observado
<b>Linhas operantes</b>	8012/10 e 8022/10	8012/10, 8022/10 e 8032/10	Ampliação da rede e redistribuição da demanda
<b>Frota total</b>	18 veículos (9+9)	18 veículos (5+8+5)	Frota mantida, redistribuída de forma estratégica
<b>Frota por linha</b>	8012/10: 9 veículos 8022/10: 9 veículos	8012/10: 5 veículos 8022/10: 8 veículos 8032/10: 5 veículos	Ajuste operacional para equilibrar fluxos
<b>Passageiros/dia útil (total)</b>	35,2 mil	~35,4 mil	Demanda semelhante, porém melhor distribuída
<b>8012/10 – Passageiros/dia útil</b>	35,2 mil (divididos entre duas linhas)	11 mil	Redução da carga por veículo
<b>8022/10 – Passageiros/dia útil</b>	35,2 mil (divididos entre duas linhas)	17 mil	Maior absorção da demanda residual
<b>8032/10 – Passageiros/dia útil</b>	Inexistente	7,4 mil	Linha criada para aliviar as rotas principais
<b>Superlotação</b>	Muito elevada	Redução significativa	Equilíbrio entre as três linhas
<b>Intervalo entre viagens</b>	Irregular devido à saturação	Maior regularidade	Menor variação e maior previsibilidade
<b>Qualidade percebida do serviço</b>	Baixa, com reclamações	Moderada a alta	Melhora mensurável na experiência do usuário
<b>Cobertura espacial</b>	Menos diversificada	Mais ampla e com menor sobreposição	Rede mais racionalizada

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 4 evidencia que a criação da linha 8032/10 representou uma reorganização

estrutural do sistema, sem aumento de frota, mas com efeitos operacionais relevantes. Embora o número total de veículos tenha permanecido em 18, a redistribuição entre as três linhas permitiu diluir a demanda antes concentrada nas 8012/10 e 8022/10. Isso resultou em redução expressiva da superlotação, maior regularidade dos intervalos e melhora geral da qualidade percebida pelos usuários. A tabela “Comparativo entre o sistema BUSP antes e depois da criação da linha 8032/10”, apresentada anteriormente neste trabalho, evidencia com clareza as mudanças estruturais introduzidas. Antes da inclusão da nova linha, as rotas 8012/10 e 8022/10 transportavam juntas aproximadamente 35,2 mil passageiros por dia útil, concentrando um volume muito superior à capacidade operacional de suas frotas originais. A elevada demanda, aliada a trajetos extensos, gerava superlotação nas plataformas, ônibus frequentemente cheios, tempos de espera imprevisíveis e intervalos irregulares, problemas amplamente relatados por usuários em reportagens e levantamentos institucionais.

A Tabela 1 sintetiza o movimento de reestruturação que ocorreu no sistema de circulares em um momento anterior: a frota total permaneceu em 18 veículos, mas deixou de estar concentrada apenas em duas linhas (8012/10 e 8022/10) para ser distribuída em três (8012/10, 8022/10 e 8032/10). Do ponto de vista de planejamento, esse é um exemplo clássico de redesenho de rede: não se aumentou o número de ônibus disponíveis, mas sim se reorganizou a forma como eles são alocados às rotas. Em vez de insistir em duas linhas sobrecarregadas, criou-se uma terceira linha capaz de absorver parte da demanda, especialmente nos trechos mais críticos.

A Tabela 2 reforça essa leitura ao mostrar que a demanda diária praticamente se manteve constante após a criação da 8032/10, mas passou a ser melhor distribuída entre as três linhas. Antes, 8012/10 e 8022/10 somavam cerca de 35,2 mil passageiros/dia; depois da reestruturação, a nova linha 8032/10 passou a transportar 7,4 mil passageiros/dia, enquanto 8022/10 concentrou cerca de 17 mil passageiros/dia e 8012/10 ficou com aproximadamente 11 mil passageiros/dia. Ou seja, a intervenção não “criou” novos passageiros, mas aliviou a superlotação ao redistribuir fluxos que antes se concentravam em apenas duas linhas.

Na Tabela 3 fica claro que a produtividade global do sistema (passageiros/dia por veículo) praticamente não se altera: em torno de 2 mil passageiros/dia por ônibus, tanto antes quanto depois da introdução da 8032/10. Isso indica que o principal ganho da mudança não está em transportar muito mais gente com a mesma frota, mas em melhorar a qualidade do serviço, reduzindo lotação excessiva, equalizando carregamentos entre as linhas e, potencialmente, diminuindo tempos de espera e de viagem para determinados grupos de usuários. Em outras palavras, o redesenho da rede buscou uma solução mais equilibrada, e não apenas mais “intensa” em termos de utilização da frota.

Esse exemplo histórico dialoga diretamente com a realidade atual das linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10. O diagnóstico feito neste trabalho mostra um quadro muito semelhante ao que motivou a criação da 8032/10: ciclos longos em algumas linhas, velocidades comerciais baixas em trechos internos, diferenças importantes de frequência (por exemplo, headways médios da ordem de 8,4 minutos na 8084-10 contra cerca de 24,8 minutos na 8085-10)

e concentração de demanda em poucos eixos. Assim como aconteceu com 8012/10 e 8022/10, há indícios de desequilíbrio entre oferta e demanda, sobretudo em torno dos pontos com maior população atendida (FFLCH, POLI, FEA, ECA, FCF/IQ, P3 e Butantã).

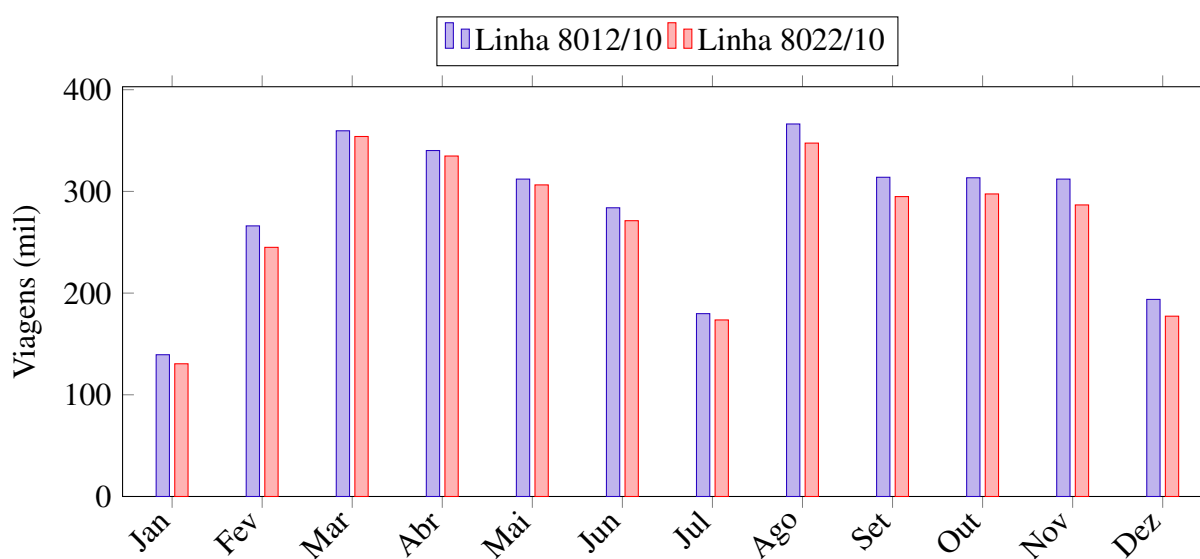
Diante disso, as tabelas 1, 2 e 3 não são apenas um exemplo ilustrativo, mas um precedente concreto de como pequenas alterações de desenho de rede apoiadas em análise quantitativa de frota e demanda, podem melhorar o desempenho do sistema sem necessariamente aumentar recursos. Elas servem como referência metodológica para o presente TCC: se, no passado, foi possível redesenhar as rotas (com uma nova linha e redistribuição de frota) para suavizar a superlotação, então faz sentido aplicar hoje heurísticas de roteirização, como Clarke & Wright e correções via caminho mínimo, para reavaliar o arranjo das linhas 8082–8085. A partir dessa fundamentação, o trabalho avança para a modelagem das rotas atuais, cálculo de distâncias, tempos de ciclo, velocidades, headways e construção de cenários alternativos que buscam o mesmo objetivo central: reorganizar a rede de circulares para atender melhor a demanda interna do campus, mantendo a coerência com as restrições operacionais existentes.

### **3.16 Demanda e características operacionais dos circulares da USP**

A análise histórica das antigas linhas 8012/10 e 8022/10 permite caracterizar a ordem de grandeza e o perfil de utilização do sistema de ônibus circulares da Cidade Universitária. Os indicadores anuais resumidos na Tabela 5 mostram que cada uma dessas linhas movimentou, em 2016, algo em torno de 3,3 milhões de viagens, com médias mensais acima de 260 mil embarques. Em outras palavras, mesmo antes da reestruturação recente que gerou as linhas 8082–10 a 8085–10, o sistema já operava em uma escala comparável a de um corredor urbano de média capacidade, o que reforça o papel dos circulares como infraestrutura essencial de mobilidade interna da USP. A figura 5 apresenta a distribuição mensal de viagens nas linhas 8012/10 e 8022/10 ao longo de 2016, evidenciando de forma clara o padrão de sazonalidade típico da mobilidade interna no campus. Observa-se a presença de picos expressivos nos meses letivos, especialmente março, agosto e setembro, acompanhados de quedas acentuadas em períodos de recesso acadêmico, como janeiro, julho e dezembro. Esse comportamento reforça a necessidade de que qualquer proposta de redesenho das rotas considere a variabilidade temporal da demanda, evitando análises baseadas apenas em médias anuais. Além disso, a tabela demonstra que ambas as linhas operavam com volumes semelhantes, revelando um sistema já bastante pressionado antes da reforma de 2024 e justificando a aplicação de técnicas de otimização como as desenvolvidas neste trabalho. A Figura 5 revela um comportamento sazonal marcante na demanda das linhas 8012/10 e 8022/10 ao longo de 2016. Observa-se que ambos os serviços apresentam crescimento acentuado no volume de viagens a partir de fevereiro, atingindo o pico em março, mês historicamente associado ao início pleno do calendário letivo. Após uma ligeira queda em abril e maio, os valores permanecem elevados até junho, quando então ocorre redução

significativa no período de férias de julho. Em agosto, a retomada das atividades acadêmicas restabelece rapidamente os níveis de demanda, novamente próximos aos patamares máximos observados no primeiro semestre. Ao final do ano, nota-se nova queda nos meses de novembro e dezembro, coerente com o encerramento das aulas e diminuição da circulação no campus. Em síntese, a sazonalidade apresentada confirma o forte vínculo entre o uso das linhas e o calendário universitário, reforçando a importância de estratégias operacionais adaptadas aos ciclos acadêmicos.

Figura 5 – Sazonalidade mensal de viagens nas linhas 8012/10 e 8022/10 em 2016.



Fonte: Elaboração própria.

Essa figura 5 mostra a forte sazonalidade do sistema: picos de viagens em fevereiro–março e agosto–outubro (períodos letivos completos) e queda em janeiro, julho e dezembro (férias). É um bom argumento pra justificar que qualquer redesenho de linhas internas (como as 8082–8085 do seu TCC) precisa considerar variações de demanda ao longo do ano, não apenas um dia “típico”.

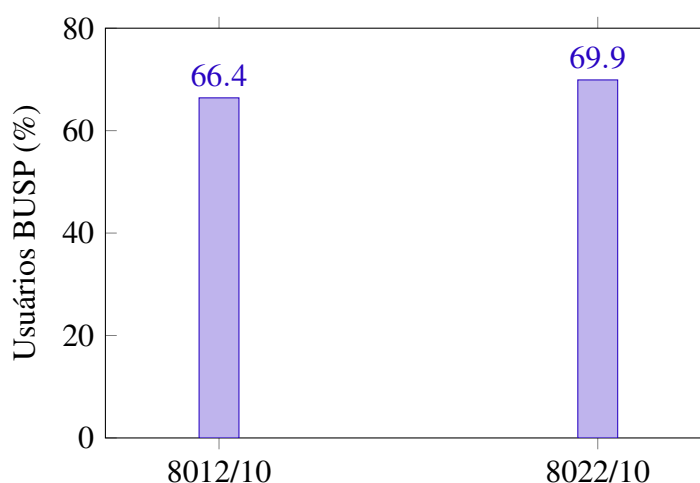
A Figura 6 apresenta a proporção de usuários cadastrados no BUSP que utilizaram as linhas 8012/10 e 8022/10 ao longo de 2016. Os valores observados, 66,4% na linha 8012/10 e 69,9% na linha 8022/10, evidenciam que a maior parte dos deslocamentos internos na USP é realizada por usuários recorrentes, sobretudo estudantes, docentes e servidores que dependem diariamente dos circulares para acessar atividades acadêmicas, administrativas e de pesquisa. Esse padrão revela um perfil de demanda altamente fidelizado, característico de sistemas cuja função é eminentemente estrutural no cotidiano da comunidade universitária.

Essa predominância de usuários frequentes implica requisitos operacionais mais rigorosos para a rede. Passageiros recorrentes são especialmente sensíveis à regularidade das viagens, percebendo de forma mais intensa atrasos, intervalos irregulares e episódios de superlotação, o que reforça a necessidade de rotas estáveis, ciclos mais curtos e menor variabilidade no

desempenho ao longo do dia. A previsibilidade da demanda, por sua vez, favorece a aplicação de heurísticas de roteirização como o método de Clarke–Wright empregado neste trabalho, uma vez que os fluxos apresentam menor volatilidade e podem ser representados com maior precisão nos modelos matemáticos.

A Figura 6 mostra que as linhas 8012/10 e 8022/10 apresentam alta participação de usuários BUSP em 2016, com proporções de 66,4% e 69,9%, respectivamente. Esses valores indicam que ambas as linhas são fortemente utilizadas pelo público interno da USP, reforçando seu papel como eixos essenciais de mobilidade no campus. Além disso, a diferença entre as duas proporções sugere que a 8022/10 concentra um volume ligeiramente maior de passageiros recorrentes da comunidade universitária, o que contribui para explicar sua maior carga operacional e a necessidade de intervenções específicas de balanceamento de demanda observadas nos anos seguintes.

Figura 6 – Proporção de usuários BUSP nas linhas 8012/10 e 8022/10 em 2016.



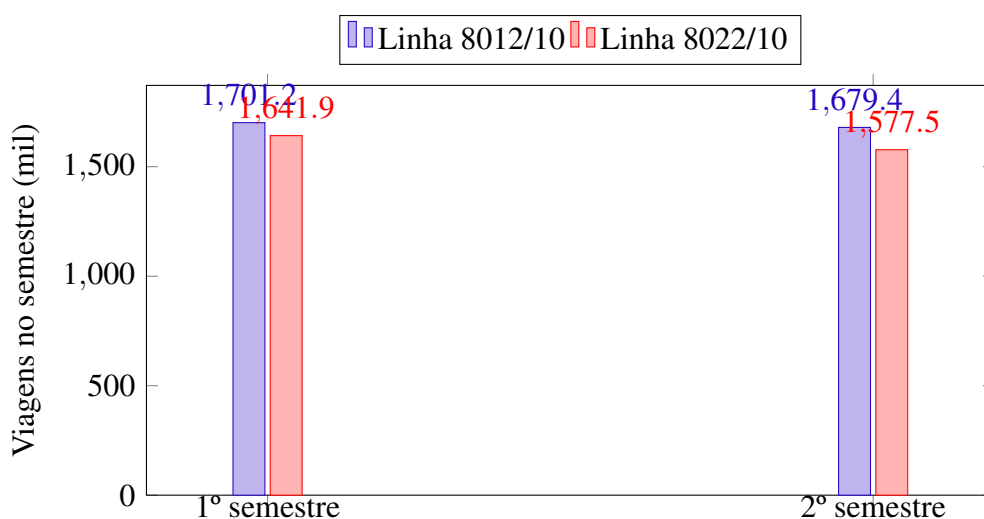
Fonte: Elaboração própria.

A expressiva participação de usuários BUSP demonstra que o sistema de transporte interno da USP funciona como um serviço essencial e não como um modal de uso eventual. Isso reforça a justificativa central deste estudo: a necessidade de reorganizar as rotas com base em ferramentas de otimização que privilegiem regularidade, redução dos tempos de viagem e maior eficiência operacional, elementos que impactam diretamente a experiência diária de grande parte da comunidade universitária.

O caráter “cativo” da demanda aparece de forma ainda mais clara na Tabela 7. Em ambas as linhas, aproximadamente dois terços dos passageiros utilizam o BUSP, o que significa que uma mesma pessoa faz dezenas ou centenas de viagens ao longo de um semestre. Em sistemas com essa configuração, melhorias aparentemente modestas em indicadores operacionais como redução de 2–3 minutos na espera média ou alívio de superlotação em certos horários são acumuladas na rotina diária e geram ganhos significativos de conforto, pontualidade acadêmica e até desempenho estudantil. Na fundamentação teórica, isso justifica a adoção de modelos

de roteirização orientados à demanda recorrente, como o que você aplica às linhas 8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10, em vez de análises puramente estáticas baseadas em um “dia médio”. A Figura 7 evidencia que ambas as linhas 8012/10 e 8022/10 mantêm um volume elevado de viagens nos dois semestres de 2016, com variações relativamente pequenas ao longo do ano. No primeiro semestre, a 8012/10 registra cerca de 1,70 milhão de viagens, caindo ligeiramente para 1,68 milhão no segundo semestre. A 8022/10 apresenta dinâmica semelhante, passando de aproximadamente 1,64 milhão para 1,58 milhão. Essa estabilidade indica que a demanda é estrutural e fortemente associada ao calendário acadêmico, com pequenas reduções típicas do segundo semestre, quando há períodos letivos mais curtos e menor concentração de eventos acadêmicos. Em conjunto, os resultados reforçam que ambas as linhas desempenham papel fundamental na mobilidade da USP, exigindo planejamento contínuo para manter níveis adequados de frequência e qualidade do serviço.

Figura 7 – Viagens por semestre nas linhas 8012/10 e 8022/10 em 2016.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 7 apresenta o total de viagens realizadas nas linhas 8012/10 e 8022/10 ao longo do primeiro e do segundo semestre de 2016. Observa-se que ambas mantêm volumes elevados e relativamente estáveis, cerca de 1,70 milhão e 1,68 milhão de viagens na 8012/10, e 1,64 milhão e 1,58 milhão na 8022/10, evidenciando que a demanda pelo sistema de transporte interno da USP é composta majoritariamente por usuários recorrentes, com padrões de uso consistentes entre os períodos letivos. Essa estabilidade semestral revela que o BUSP opera como um serviço essencial da rotina universitária, cuja procura se mantém alta independentemente de variações sazonais amplas no calendário geral.

Além da estabilidade semestral, a distribuição mensal de viagens revela uma sazonalidade marcada, diretamente associada ao calendário acadêmico. A figura 5 mostra que janeiro, período de férias, concentra a menor demanda nas duas linhas, enquanto meses letivos como março, agosto e setembro registram picos de utilização. A diferença entre o mês de pico e o mês de vale

ultrapassa 220 mil viagens, representando aumentos de 60% a 70% em relação a janeiro. Do ponto de vista da teoria de operação de sistemas de transporte, esse padrão indica que projetar rotas e dimensionar frota apenas com base em médias anuais pode mascarar necessidades reais: uma solução “adequada em média” pode falhar nos momentos de maior pressão operacional, como início de semestre, vésperas de prova, horários de almoço nos bandejões e janelas de troca de aula. Essa sazonalidade dialoga diretamente com o problema investigado neste TCC. As linhas atuais 8082–10 e 8083–10 apresentam ciclos longos e são responsáveis por conectar pontos de elevada demanda, como FFLCH, POLI, FEA, ECA, CRUSP e CEPEUSP, aos terminais Butantã e P3. Em horários de maior movimento, atrasos gerados no início do ciclo se propagam ao longo de toda a rota, formando filas nos pontos de embarque e reproduzindo os mesmos cenários de superlotação observados nas antigas linhas 8012/10 e 8022/10. A fundamentação construída a partir das tabelas apresentadas, em conjunto com a Figura 7, evidencia a necessidade de estratégias de roteirização mais robustas, capazes de incorporar variações temporais de demanda e a importância relativa de cada ponto da rede.

A combinação desses indicadores permite uma leitura integrada da eficiência do sistema: embora o volume anual de viagens nas linhas antigas seja próximo e a proporção de usuários BUSP seja alta, a sazonalidade mensal e a concentração de fluxos em períodos específicos mostram que o desafio não está apenas na capacidade total, mas em como essa capacidade é distribuída ao longo do tempo e do espaço. Isso reforça a pertinência da aplicação de heurísticas de roteirização, como Clarke & Wright, que reduzem a quilometragem total, encurtam ciclos e reorganizam a cobertura dos principais polos de demanda. No contexto das linhas 8082–10 a 8085–10, o uso dessas técnicas busca reproduzir, de maneira sistemática, o efeito positivo observado historicamente com a criação da linha 8032/10: sem aumentar a frota, redistribuir viagens entre trajetos mais coerentes, aliviar áreas saturadas e melhorar a qualidade percebida pelos usuários regulares do transporte interno da USP.

### 3.17 Síntese da Fundamentação Teórica

A revisão de literatura apresentada neste capítulo permitiu consolidar os principais fundamentos conceituais, metodológicos e aplicados que sustentam o desenvolvimento deste Trabalho de Conclusão de Curso. A partir do estudo aprofundado do Problema de Roteamento de Veículos (VRP), suas variantes, complexidade computacional e métodos de solução, tornou-se possível compreender o enquadramento do sistema de ônibus circulares da USP em um contexto clássico de otimização combinatória, cuja solução exata é inviável para instâncias de médio e grande porte devido ao crescimento superexponencial do espaço de busca (DANTZIG; RAMSER, 1959; GRECO, 2008).

O VRP e o PCV foram caracterizados como problemas NP-difíceis, exigindo abordagens heurísticas e metaheurísticas para alcançar soluções de boa qualidade em tempo computacional reduzido (SCHEUERER; WENDOLSKY, 2006). Nesse cenário, métodos como Clarke–Wright,

2-opt, 3-opt, VNS, algoritmos genéticos, busca tabu e Simulated Annealing formam o arcabouço contemporâneo de soluções aproximadas amplamente utilizadas em sistemas reais de transporte e distribuição (MOLINA; SALMERON; EGUIA, 2020; GOUNARIS, 2011). Entre essas técnicas, a heurística de Clarke & Wright destaca-se por sua simplicidade, desempenho prático e robustez, justificando sua escolha neste trabalho como método de construção das rotas básicas.

A fundamentação também contextualizou a importância prática do VRP e do CVRP em operações logísticas urbanas, redes de transporte público, sistemas de coleta e infraestruturas universitárias, ressaltando como modelos de roteirização podem reduzir distâncias percorridas, tempos de viagem, emissões e custos operacionais (MACHADO; MAURI; ROSA, 2021; JIANG; LU; ZHANG, 2022). No caso particular da Cidade Universitária da USP, um território de mais de 3,6 milhões de metros quadrados, 60 km de ruas internas e circulação estimada acima de 100 mil pessoas por dia, a aplicação de técnicas de otimização é não apenas recomendável, mas necessária para corrigir distorções estruturais como superposição excessiva de rotas, ciclos prolongados e frequências desbalanceadas.

Os estudos internos e externos sobre mobilidade no campus, incluindo o diagnóstico clássico de Paiva et al. (2010) (PAIVA et al., 2010) e análises recentes que tratam da demanda e impacto do transporte coletivo no ambiente universitário, reforçam que o sistema atual apresenta fragilidades significativas, especialmente nos eixos FFLCH–POLI–FEA–ECA, Terminal Butantã e Estação CPTM. A presença de usuários altamente recorrentes (66–70% de passageiros com BUSP) (SILVA et al., 2018) aumenta a sensibilidade às irregularidades, exigindo redes mais estáveis, frequências menores e maior redundância operacional.

Por fim, a análise da literatura demonstrou que o emprego da heurística paralela de Clarke–Wright, associado ao algoritmo de Dijkstra para caminhos mínimos, constitui uma estratégia metodológica consistente para o redesenho das rotas internas da USP. Essa abordagem é compatível com a complexidade espacial do campus, com a natureza recorrente da demanda, com as restrições operacionais impostas pelos limites de frota e com a necessidade de racionalização do uso das vias internas.

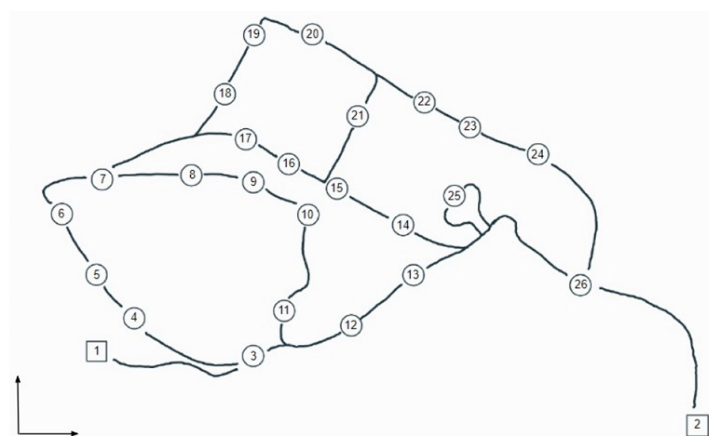
Assim, a fundamentação teórica aqui desenvolvida oferece o suporte conceitual necessário para o capítulo seguinte, dedicado à modelagem, implementação e análise dos resultados da otimização proposta. Os princípios discutidos e complexidade, heurísticas, variantes do VRP, demanda estudantil, operação de transporte público e roteirização aplicada, formam a base que sustenta a construção metodológica do modelo e orientam a interpretação técnica dos resultados obtidos.

## 4 DADOS E PREMISAS

A construção do modelo de roteirização partiu, em primeiro lugar, da definição da rede viária interna do campus e dos pontos atendidos pelos circulares. Foi elaborado um mapa esquemático contendo 26 pontos de parada numerados, que representam os principais acessos e polos geradores de viagens da Cidade Universitária (terminais P3 e Butantã, unidades de ensino, restaurantes universitários, equipamentos esportivos e áreas residenciais). Esse mapa funciona como a base gráfica do estudo e sintetiza o traçado das vias internas e a localização relativa de cada ponto.

A Figura 8 apresenta a distribuição espacial dos 26 pontos de parada utilizados pelo sistema de ônibus circulares da USP. Esse mapa constitui a base estrutural de todo o processo de roteirização desenvolvido neste trabalho, pois define a geometria da rede viária interna, a localização relativa dos nós e a conectividade entre os principais polos acadêmicos, administrativos, esportivos e de integração externa. A correta representação desses pontos é essencial para a construção da matriz de distâncias, para o cálculo dos caminhos mínimos e para a aplicação consistente da heurística de Clarke–Wright no capítulo de Métodos.

Figura 8 – Mapa de pontos dos circulares.



**Fonte:** Elaboração própria.

A partir desse esquema, foi construída uma matriz de distâncias entre todos os pares de pontos. Para cada par  $(i, j)$ , foi consultada em uma ferramenta de mapas digitais a distância percorrida por automóvel, seguindo o trajeto recomendado pelo sistema, de forma a aproximar o

percurso efetivamente realizado pelos ônibus nas vias internas e nos acessos ao metrô Butantã. Os valores obtidos (em metros) foram organizados em uma matriz quadrada  $26 \times 26$ , simétrica, com a diagonal principal igual a zero. Essa matriz constitui o insumo principal do modelo de roteirização, pois define o custo de deslocamento entre quaisquer dois nós da rede.

A Figura 9 reúne, em formato matricial, todas as distâncias viárias entre os 26 pontos de parada do sistema de ônibus circulares da USP. Essa matriz constitui o núcleo de informações do modelo de roteirização, pois traduz a malha viária real do campus em um grafo ponderado, permitindo que a heurística de Clarke–Wright calcule corretamente os savings entre pares de nós e que o algoritmo de Dijkstra determine os caminhos mínimos entre pontos consecutivos.

Figura 9 – Matriz de distâncias entre os pontos do campus.

	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
Terminal P3	1	-	4355	936	1590	1924	2532	2791	2663	2673	2278	1512	1464	1702	2560	3066	3359	3569	3606	3984	4403	3384	3918	4410	3702	2882	3163
Terminal Butantã	2	4355	-	3341	4182	4542	4733	4452	4486	4771	4277	3523	3019	2763	2532	3025	3303	3592	3892	4133	3454	3568	3146	2614	2015	2243	1742
Vila Indiana	3	936	3341	-	813	1162	1765	2017	2024	1710	1309	534	495	738	1612	2113	2401	2685	2830	3210	3629	2431	2965	3463	2738	1918	2199
IB	4	1590	4182	813	-	334	942	1201	1376	1663	2145	1385	1307	1544	2413	2611	1989	2312	2010	2393	2814	2929	3377	3865	3544	2724	3005
Odontologia	5	1924	4542	1162	334	-	608	867	1042	1331	1788	1781	1733	1976	2727	2234	1942	1638	1644	2028	2440	2558	2993	3494	4271	3129	3436
HU	6	2532	4733	1765	942	608	-	288	525	744	1140	1990	2270	2540	2070	1580	1320	1020	1010	1480	1660	1890	2470	2870	3600	3050	3360
Prefeitura	7	2791	4452	2017	1201	867	288	-	239	508	871	1750	2010	2260	1740	1240	921	667	696	1170	1400	1530	2170	2580	3270	2660	3000
IF	8	2663	4486	2024	1376	1042	525	239	-	368	716	1570	1830	2270	1760	1260	975	672	694	1170	1370	1550	2160	2580	3300	2620	3010
IME	9	2673	4771	1710	1663	1331	744	508	368	-	359	1250	1530	2150	2070	1580	1260	982	1010	1480	1670	1890	2400	2820	3540	2930	3310
FAU	10	2278	4277	1309	2145	1788	1140	871	716	359	-	841	1180	1760	2290	2070	1770	1440	1440	1910	2080	2360	2890	3300	3410	2550	2870
ICB	11	1512	3523	534	1385	1781	1990	1750	1570	1250	841	-	278	889	1440	1930	2220	2270	2320	2720	2930	2290	2850	3220	2530	1740	2000
Seade	12	1464	3019	495	1307	1733	2270	2010	1630	1530	1180	278	-	508	1020	1530	1820	2130	2310	2810	2850	1840	2380	2860	2090	1380	1630
IQ	13	1702	2763	738	1544	1976	2540	2260	2270	2150	1760	889	508	-	466	954	1250	1580	1810	2290	2320	1400	1930	2320	1630	787	1110
FFLCH	14	2560	2532	1612	2413	2727	2070	1740	1760	2070	2290	1440	1020	466	-	450	737	1100	1320	1740	1820	808	1410	1820	1700	870	1220
Agências	15	3066	3025	2113	2611	2234	1580	1240	1260	1580	2070	1930	1530	954	450	-	353	641	937	1360	1400	419	985	1390	2090	1240	1560
FEA	16	3359	3303	2401	1989	1942	1320	921	975	1260	1770	2220	1820	1250	737	353	-	354	590	1010	1210	546	1060	1480	2200	1620	1920
Poli - Biênio	17	3569	3592	2685	2312	1638	1020	667	672	982	1440	2270	2130	1580	1100	641	354	-	238	626	872	883	1420	1850	2540	1920	2250
Poli - Produção	18	3606	3892	2830	2010	1644	1010	696	694	1010	1440	2320	2310	1810	1320	937	590	238	-	467	661	1050	1440	1860	2610	2080	2480
Poli - Mecânica	19	3984	4133	3210	2393	2028	1480	1170	1170	1480	1910	2720	2810	2290	1740	1360	1010	626	467	-	235	1180	1020	1450	2140	2520	2650
IP	20	4403	3454	3629	2814	2440	1660	1400	1370	1670	2080	2930	2850	2320	1820	1400	1210	872	661	235	-	856	724	1118	1830	2510	2330
ECA	21	3384	3568	2431	2929	2558	1890	1530	1550	1890	2360	2290	1840	1400	808	419	546	883	1050	1180	856	-	477	871	1584	1670	2091
EEFE	22	3918	3146	2965	3377	2993	2470	2170	2160	2400	2890	2850	2380	1930	1410	985	1060	1420	1440	1020	724	477	-	394	1107	2614	1614
CRUSP	23	4410	2614	3463	3865	3494	2870	2580	2580	2820	3300	3220	2860	2320	1820	1390	1480	1850	1860	1450	1118	871	394	-	713	2220	1220
CEPEUSP	24	3702	2015	2738	3544	4271	3600	3270	3300	3540	3410	2530	2090	1630	1700	2090	2200	2540	2610	2140	1830	1584	1107	713	-	1510	516
Central	25	2882	2243	1918	2724	3129	3050	2660	2620	2930	2550	1740	1380	787	870	1240	1620	1920	2080	2520	2510	1670	2614	2220	1510	-	940
Estação CPTM	26	3163	1742	2199	3005	3436	3360	3000	3010	3310	2870	2000	1630	1110	1220	1560	1920	2250	2480	2650	2330	2091	1614	1220	516	940	-

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se que a matriz é densa, com grande variação de distâncias entre pares de pontos próximos (como IME–IQ) e pontos periféricamente afastados (como HU–CPTM). Essa heterogeneidade reforça a necessidade de ferramentas de otimização: rotas desenhadas apenas por intuição humana tendem a subestimar trechos longos e a superestimar conexões curtas, enquanto o modelo computacional consegue identificar combinações mais eficientes considerando toda a estrutura geográfica do campus. Assim, a matriz de distâncias não apenas fundamenta o processo matemático do TCC, mas também evidencia a complexidade espacial envolvida no redesenho das rotas.

Além das distâncias geográficas, foram coletadas informações operacionais das quatro linhas atuais (8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10) no sistema da SPTrans, incluindo horários de funcionamento, quadros de partidas ao longo do dia e tempos estimados de viagem por período (manhã, entropico e tarde). Esses dados permitem calcular o tempo de ciclo de cada linha, estimar a velocidade média dos circulares e derivar indicadores como o headway médio e a quantidade de veículos necessária em operação.

As distâncias percorridas por ciclo completo nas linhas atualmente em operação encontram-

se sistematizadas na Tabela 5, que sintetiza os valores de ida e volta (ou laços completos) de cada itinerário. Como apresentado na tabela, cada linha apresenta extensão distinta, evidenciando a heterogeneidade estrutural do sistema: enquanto as linhas 8082–10 e 8083–10 possuem ciclos mais longos, refletindo sua função de ligação entre o Terminal Butantã e o miolo central do campus, os laços internos (8084–10 e 8085–10) apresentam percursos mais compactos. Os valores consolidados em 5 constituem a referência operacional fundamental para caracterizar o esforço mínimo necessário à manutenção do sistema, além de servirem como base comparativa para etapas posteriores da análise. É a partir dessa distribuição de distâncias que se torna possível avaliar, com maior rigor, tanto o desempenho do cenário atual quanto o potencial de otimização explorado nos modelos subsequentes.

As distâncias reais por *ciclo* (ida+volta ou laço completo) de cada linha atual são:

Tabela 5 – Distância do ciclo (ida + volta) por linha (situação atual).

<b>Linha</b>	<b>Cálculo</b>	<b>Ciclo (km)</b>
8082–10	8,204 + 9,396	<b>17,600</b>
8083–10	8,591 + 6,694	<b>15,285</b>
8084–10	Laço único	<b>7,652</b>
8085–10	Laço único	<b>13,208</b>
<b>Total (4 linhas)</b>		<b>53,746</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir dos dados da SPTrans.

A solução construída pela heurística de Clarke–Wright (com ajuste por caminho mínimo) resultou em um conjunto otimizado composto por três rotas, cuja soma totaliza 34,881 km por ciclo agregado, considerando os trechos individuais (8,424 + 7,116 + 10,226 + 9,115). Para efeito de comparação numérica, o ciclo agregado das quatro linhas atuais (8082, 8083, 8084 e 8085) corresponde a 53,746 km, conforme sistematizado na Tabela 6. Nesta etapa, o objetivo é apenas apresentar os valores de referência, sem realizar inferências ou análises sobre variações operacionais. A Tabela 6 apresenta a quilometragem total percorrida por ciclo agregado no cenário atual e no cenário proposto pelo modelo de roteirização. No arranjo vigente, composto pelas quatro linhas 8082, 8083, 8084 e 8085, o ciclo agregado atinge 53,746 km, valor que representa a soma dos percursos completos necessários para manter a operação mínima do sistema. Já o cenário elaborado por meio da heurística de Clarke–Wright, estruturado em quatro rotas consolidadas, totaliza 48,089 km por ciclo agregado. Esses valores são apresentados com o objetivo de fornecer o referencial numérico da configuração atual e da configuração otimizada, compondo a base descritiva utilizada nas análises subsequentes do trabalho.

Tabela 6 – Quilometragem por ciclo agregado: cenário atual e cenário proposto.

Cenário	Km por ciclo agregado
Linhas atuais (8082, 8083, 8084, 8085)	53,746
Proposta (4 rotas via Clarke–Wright)	48,089

Fonte: Elaboração própria.

Por fim, para incorporar a dimensão da demanda, foram utilizados levantamentos da população atendida em cada instituto e ponto relevante do campus (como FFLCH, POLI, FEA, ECA, FCF/IQ, CRUSP, CEPEUSP, terminais P3 e Butantã, entre outros). A partir desses valores, identificaram-se os pontos com maior concentração de usuários e estabeleceram-se critérios de atendimento mínimo, como a exigência de que nós com mais de 3.000 pessoas por dia sejam atendidos por pelo menos duas rotas distintas. Essa regra de projeto é fundamental para que o modelo de otimização não produza soluções com sobrecarga em uma única linha e orienta a análise dos cenários de redesenho de rotas.

## 4.1 Limite de Pontos por Rota

Com base nos resultados obtidos nas simulações e nos padrões observados nas rotas finais, todas contendo oito ou mais pontos atendidos, estabeleceu-se que cada rota deve contemplar, no mínimo, 8 pontos. Essa restrição evita a formação de rotas muito curtas, que seriam ineficientes operacionalmente e resultariam em desequilíbrio entre os percursos.

A exigência de um número mínimo de pontos está alinhada com:

- a necessidade de rotas mais completas, aproveitando ao máximo cada ciclo do veículo;
- a manutenção do equilíbrio entre as rotas, evitando sobrecarga em umas e subutilização em outras;
- a redução do total de rotas necessárias, contribuindo para percursos finais mais econômicos;
- a coerência com os resultados do modelo, que mostrou soluções ótimas contendo de 8 a 9 pontos por rota.

Essa restrição também reforça a natureza circular e contínua do sistema BUSP, garantindo que cada ciclo de operação cubra uma quantidade suficiente de pontos relevantes dentro do campus.

## 4.2 Métodos

A solução do problema combinou:

1. modelagem do problema como um VRP capacitado (CVRP);

2. aplicação da heurística paralela de Clarke–Wright;
3. uso do algoritmo de Dijkstra para reforço de caminhos mínimos na malha viária real;
4. implementação computacional em Python.

### 4.3 Modelagem do Problema

A otimização das rotas dos ônibus circulares da USP pode ser formalizada como um Problema de Roteamento de Veículos Capacitado (CVRP), em que se deseja definir rotas de ônibus circulares que partem de um ou mais pontos de suprimento (Metrô Butantã e Terminal P3), atendem um conjunto de pontos de parada dentro do campus e retornam ao ponto de origem. Cada ponto de parada é representado como um nó de um grafo e as ligações possíveis entre esses nós são representadas por arestas ponderadas pela distância viária entre os pontos.

O objetivo do modelo é encontrar um conjunto de rotas que:

- atenda todos os pontos de parada ao menos uma vez;
- respeite as restrições de capacidade implícita (por meio do limite de pontos por rota);
- garanta uma oferta reforçada em pontos de maior demanda;
- minimize a distância total percorrida pelos veículos em um ciclo.

As distâncias entre os pontos foram obtidas a partir de rotas de carro no Google Maps e reunidas em uma matriz de distâncias, que é utilizada como base para o cálculo de custos do modelo.

### 4.4 Formulação Matemática do CVRP

Considere:

- $N = \{0, 1, \dots, n\}$ : conjunto de nós, em que 0 representa o depósito;
- $C = \{1, \dots, n\}$ : conjunto de clientes (pontos de parada);
- $K$ : conjunto de veículos disponíveis;
- $d_{ij}$ : distância (ou custo) para ir do nó  $i$  ao nó  $j$ ;
- $q_i$ : demanda associada ao cliente  $i$ ;
- $Q$ : capacidade máxima de cada veículo.

Variáveis de decisão:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se a aresta } (i, j) \text{ é percorrida por algum veículo,} \\ 0, & \text{caso contrário;} \end{cases} \quad (4.1)$$

$$u_i \geq 0, \quad \text{variável auxiliar associada ao fluxo (restrições de subrota).} \quad (4.2)$$

#### 4.4.1 Função objetivo

$$\min \sum_{i \in N} \sum_{j \in N, j \neq i} d_{ij} x_{ij} \quad (4.3)$$

#### 4.4.2 Restrições

Cada cliente deve ser atendido exatamente uma vez:

$$\sum_{j \in N, j \neq i} x_{ij} = 1, \quad \forall i \in C. \quad (4.4)$$

Fluxo de entrada e saída deve ser conservado:

$$\sum_{i \in N, i \neq j} x_{ij} = \sum_{k \in N, k \neq j} x_{jk}, \quad \forall j \in N. \quad (4.5)$$

Capacidade dos veículos (para qualquer subconjunto de nós  $R \subseteq C$ ):

$$\sum_{i \in R} q_i \leq Q. \quad (4.6)$$

Eliminação de subrotas (restrições do tipo MTZ):

$$u_i - u_j + Q x_{ij} \leq Q - q_j, \quad \forall i, j \in C, i \neq j. \quad (4.7)$$

Domínio das variáveis binárias:

$$x_{ij} \in \{0, 1\}, \quad \forall i, j \in N, i \neq j. \quad (4.8)$$

Essa formulação clássica do CVRP foi adaptada para incorporar as características específicas do sistema BUSP, em especial o limite mínimo de pontos por rota e a priorização de pontos de alta demanda.

### 4.5 Heurística de Clarke & Wright (versão paralela)

Para a geração de uma solução inicial de boa qualidade foi utilizada a heurística construtiva de Clarke & Wright, na sua versão paralela. Nessa heurística, o custo é representado exclusivamente pela distância percorrida e a frota é tratada como ilimitada e paralela, assumindo que é possível ter tantos ônibus quanto rotas forem necessárias.

O funcionamento geral é o seguinte:

1. Parte-se de uma solução trivial em que cada ponto de parada  $i$  possui sua própria rota: depósito  $\rightarrow i \rightarrow$  depósito.
2. Calculam-se os *savings* (economias) para todos os pares de pontos  $i$  e  $j$ :

$$s(i, j) = d(D, i) + d(D, j) - d(i, j),$$

em que  $D$  representa o depósito. Esse valor mede o quanto se economiza ao ligar diretamente  $i$  e  $j$  em uma única rota, em comparação com o caso em que cada um é atendido separadamente via depósito.

3. Ordenam-se os valores de  $s(i, j)$  em ordem decrescente, formando uma lista de economias.
4. Percorre-se essa lista tentando fundir rotas: para cada par  $(i, j)$ , se  $i$  está na ponta de uma rota  $R_1$  e  $j$  na ponta de outra rota  $R_2$ , testa-se a fusão de  $R_1$  e  $R_2$  em um único roteiro. A fusão é aceita se:
  - os pontos ainda não estiverem em uma rota finalizada;
  - a nova rota não ultrapassar o limite de 8 pontos;
  - não houver duplicação indevida de um mesmo ponto dentro da rota.
5. O procedimento segue até que não seja mais possível realizar fusões, resultando em um conjunto de rotas que cobre todos os pontos.

Essa versão paralela permite formar várias rotas simultaneamente, buscando uma configuração de menor custo global (distância total) que atenda às restrições de pontos máximos por rota e de cobertura mínima por ponto.

## 4.6 Passos da heurística paralela

1. Calcular todos os  $S_{ij}$  para pares de clientes  $(i, j)$ .
2. Ordenar os  $S_{ij}$  em ordem decrescente.
3. Percorrer a lista ordenada e tentar mesclar rotas, respeitando:
  - capacidade do veículo:  $\sum q_i \leq Q$  (no caso, compatível com o limite operacional adotado);
  - atendimento mínimo aos pontos críticos (pontos de alta demanda devem permanecer em pelo menos duas rotas);
  - ausência de subrotas;
  - ausência de duplicação de nós em uma mesma rota.

4. Formar o conjunto final de rotas quando nenhuma fusão adicional factível puder ser realizada.

A versão paralela tenta várias fusões ao mesmo tempo, permitindo que múltiplas rotas se desenvolvam simultaneamente a partir dos maiores *savings*, o que tende a gerar soluções melhores do que a versão sequencial.

## 4.7 Complemento com o algoritmo de Dijkstra

A sequência de pontos obtida com a heurística de Clarke & Wright define a ordem de atendimento, mas não necessariamente o trajeto detalhado entre dois pontos consecutivos. Para garantir que cada trecho entre dois nós siga o caminho mais curto possível na malha viária, utiliza-se o algoritmo de Dijkstra.

O procedimento é:

- considera-se a matriz de distâncias como um grafo ponderado;
- para cada par consecutivo  $(i, j)$  de uma rota, aplica-se o algoritmo de Dijkstra com origem em  $i$  para obter o caminho mínimo até  $j$ ;
- o caminho encontrado, possivelmente incluindo pontos intermediários, é incorporado à rota final;
- garante-se que as rotas se iniciem e terminem em um dos pontos de suprimento (Metrô Butantã ou P3).

Dessa forma, as rotas finais conciliam a estrutura global definida pela heurística de savings com o percurso local mais eficiente do ponto de vista de distância.

## 4.8 Regras de projeto e adaptação ao contexto do campus

Para representar melhor a realidade operacional dos circulares da Cidade Universitária, algumas adaptações foram incorporadas à heurística:

1. **Pontos críticos com múltiplas rotas:** institutos e pontos de grande concentração de usuários (por exemplo, FFLCH, POLI, FEA, ECA, FCF/IQ, terminais e áreas de alimentação) foram classificados como nós críticos. Para esses pontos, impôs-se a exigência de que fossem atendidos por pelo menos duas rotas distintas, reduzindo o risco de superlotação concentrada em uma única linha.
2. **Limite de pontos por rota:** para evitar percursos excessivamente longos e ciclos muito demorados, estabeleceu-se um limite máximo de oito pontos de parada em cada rota básica

gerada pela heurística. Essa escolha também é compatível com a prática operacional, em que rotas muito extensas tendem a acumular atrasos.

3. **Tratamento da frota como paralela:** na etapa de construção das rotas, a frota é considerada suficientemente grande para atender todas as rotas em paralelo. Essa suposição simplifica o processo de geração de rotas; a checagem de frota necessária é feita posteriormente a partir dos tempos de ciclo e dos *headways*.

Essas regras foram incorporadas diretamente na lógica de combinação dos pares  $(i, j)$  na heurística de Clarke–Wright, de modo que apenas as fusões compatíveis com essas restrições são aceitas.

## 4.9 Demanda e critérios de atendimento

A modelagem da demanda neste estudo baseou-se em informações operacionais e institucionais disponibilizadas pela Prefeitura do Campus da Capital (PUSP–CB), pela Coordenadoria do Campus da Capital (COCESP) e por levantamentos internos realizados ao longo dos últimos anos no âmbito do planejamento da mobilidade na Cidade Universitária. Esses dados, amplamente citados em comunicados oficiais, audiências públicas e diagnósticos de mobilidade, permitem estimar com boa aproximação o volume diário de usuários associado a cada unidade acadêmica e ponto relevante do campus.

Os levantamentos mais recentes da PUSP–CB indicam que a circulação diária no Campus Butantã supera 100 mil pessoas, considerando alunos, docentes, servidores, visitantes, funcionários terceirizados e usuários dos serviços de saúde e pesquisa. Esse fluxo está distribuído de forma altamente heterogênea entre os diferentes setores da CUASO, refletindo tanto a dimensão dos institutos quanto sua atividade acadêmica ao longo do dia.

Com base nesses documentos, foram considerados como pontos de maior concentração de usuários (demanda elevada) aqueles associados a grandes unidades de ensino, restaurantes universitários, polos estudantis e portões de chegada. Entre os principais polos de atração, destacam-se:

- **FFLCH** — maior unidade acadêmica da USP em número de alunos e fluxo diário;
- **POLI (todas as seções)** — forte atividade de graduação e pós-graduação, alta circulação contínua;
- **FEA** — grande volume de alunos nos três ciclos e intensa movimentação administrativa;
- **ECA** — elevada demanda concentrada em horários específicos (períodos de aula e laboratórios);
- **FCF/IQ** — fluxo significativo de estudantes, pesquisadores e atividades laboratoriais;

- **Terminal Butantã (Metrô)** — principal porta de entrada do campus, com dezenas de milhares de passageiros/dia;
- **Terminal P3** — segundo ponto estruturante de chegada, articulando CRUSP, CEPEUSP e unidades próximas;
- **Bandejão Central / Praça do Relógio** — foco de alimentação, convivência e forte concentração no horário de almoço.

A PUSP–CB destaca ainda que a distribuição temporal da demanda apresenta o padrão típico de um campus universitário de grande porte:

- **Manhã (07h–11h):** maior entrada de estudantes e funcionários, início das atividades acadêmicas;
- **Vespertino (11h–17h):** pico de circulação devido ao horário de almoço e trocas de aula;
- **Noturno (17h–22h):** forte concentração de alunos de cursos noturnos e saída geral do campus.

Nos períodos de maior movimento, especialmente no intervalo entre 11h e 15h, a PUSP–CB registra saturação nos principais eixos de circulação, com especial pressão sobre FFLCH, POLI, FEA, ECA, FAU e entorno da Praça do Relógio. Essas informações justificam plenamente a necessidade de priorizar esses nós na modelagem de rotas.

À luz desses dados, adotaram-se as seguintes regras de projeto para o modelo:

- Pontos classificados pela PUSP–CB como polos de grande circulação (acima de aproximadamente 3 mil usuários/dia), bem como portões estruturantes (Butantã e P3), devem ser atendidos por pelo menos duas rotas distintas, garantindo redundância e mitigando riscos de superlotação.
- Pontos de menor fluxo, associados a unidades periféricas ou de menor densidade estudantil, devem ser atendidos por pelo menos uma rota, assegurando a cobertura completa da malha de transporte interno.

Considerando esse critério, os pontos críticos do sistema foram definidos como:

*FFLCH, POLI, FEA, ECA, FCF/IQ, Terminal Butantã, Terminal P3 e Bandejão Central / Praça do Relógio.*

Esses pontos desempenham papel central na mobilidade da CUASO e, portanto, funcionam como âncoras estruturais de qualquer rede de transporte interna. O modelo de roteirização incorpora essa lógica ao garantir que esses nós participem de múltiplas rotas, reforçando a capacidade operacional do sistema exatamente nos segmentos mais demandados pela comunidade universitária.

#### 4.9.1 Priorização de cobertura

A Tabela 7 consolida os pontos críticos pela demanda e a exigência mínima de rotas.

Tabela 7 – Pontos críticos por demanda e exigência mínima de cobertura.

Ponto	Demanda (pessoas/dia)	Mínimo de rotas
FFLCH	14,203	$\geq 2$
POLI / Poli–Biênio	8,926	$\geq 2$
FEA	4,109	$\geq 2$
ECA	3,766	$\geq 2$
FCF/IQ	3,293	$\geq 2$
Terminal Butantã	3,500	$\geq 2$
Terminal P3	3,000	$\geq 2$
Bandejão / Central (vespertino)	1,700	Reforço no vespertino

Fonte: Elaboração própria.

#### 4.9.2 Pontos de alta demanda (mínimo de 2 rotas)

Foram classificados como prioritários os pontos que apresentam maior circulação de usuários (acima de aproximadamente 3 mil pessoas) ou alta importância estratégica, seja por concentração de institutos, atividades estudantis ou serviços centrais:

- Central (25);
- Poli – Biênio (17);
- FEA (16);
- FFLCH (14);
- Portão 3;
- Bandejão Central.

Tais pontos recebem pelo menos duas rotas, para evitar gargalos e reduzir o risco de superlotação. Todos os demais pontos possuem garantia de atendimento por ao menos uma rota, assegurando cobertura universal dentro do campus.

#### 4.9.3 Roteirização (Clarke–Wright paralelo + correções)

Aplicou-se a heurística de Clarke–Wright (versão paralela), com custo igual à distância total percorrida e frota paralela na geração inicial:

- (i) **Cobertura mínima:**  $\geq 2$  rotas nos pontos críticos definidos pela demanda.

- (ii) **8 pontos por rota:** controla tamanho do ciclo/tempo.
- (iii) **Pós-processo por caminho mínimo** (Dijkstra) para amarrar as rotas aos depósitos (Butantã e P3) e completar trechos não previstos pela heurística, garantindo conexão e cobertura sem alterar a contagem de “rotas por ponto”.

*Racional:* o *savings* de Clarke–Wright combina nós que maximizam  $d(\text{Dep}, i) + d(\text{Dep}, j) - d(i, j)$ . A versão paralela tende a gerar menor custo total e melhor paralelização do atendimento. As duas restrições (pontos críticos e tamanho de rota) evitam superlotação e ciclos muito longos, alinhando-se à prática operacional no campus.

## 4.10 Ajuste das rotas com caminho mínimo

A solução devolvida pela heurística trabalha sobre um grafo simplificado, em que os arcos conectam diretamente os pontos de parada. Entretanto, no traçado real do campus nem sempre existe uma ligação direta entre dois pontos, sendo necessário percorrer vias intermediárias. Para representar melhor essa realidade, após a etapa de agrupamento de nós foi aplicado o algoritmo de Dijkstra para completar cada rota.

Para cada rota construída, o algoritmo de caminho mínimo é usado para encontrar o trajeto mais curto entre o depósito e o primeiro ponto da rota, entre pares consecutivos de pontos e entre o último ponto e o depósito de retorno. Com isso, o percurso final do circular passa a incluir também pontos intermediários que não haviam sido escolhidos explicitamente pela heurística, mas que pertencem ao caminho mais curto na malha viária. Esses pontos adicionais não entram na contagem de demanda nem na regra de “número de rotas por ponto”, pois são assumidos como trechos em que o veículo já circula carregado.

## 4.11 Procedimento computacional

Toda a lógica descrita foi implementada em linguagem Python. O programa recebe como entrada a matriz de distâncias entre os 26 pontos, a lista dos nós críticos, o limite de pontos por rota e os depósitos considerados. Em seguida, realiza as seguintes etapas:

1. construção da solução inicial (uma rota por ponto);
2. cálculo da matriz de *savings*  $s(i, j)$ ;
3. ordenação dos *savings* em ordem decrescente e aplicação da heurística paralela de Clarke–Wright, respeitando as restrições de projeto;
4. aplicação do algoritmo de Dijkstra para cada rota obtida, gerando o percurso completo na rede viária;
5. cálculo da distância total percorrida em cada cenário de rotas.

A partir das rotas finais e das distâncias associadas, procede-se à comparação com a configuração atual das linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10, bem como à análise dos impactos sobre tempos de ciclo, *headways* e atendimento dos pontos de maior demanda.

## 4.12 Fluxo geral do método

O fluxo completo do método adotado pode ser resumido em seis etapas:

1. **Coleta de dados:** identificação dos pontos de parada, obtenção das coordenadas geográficas e construção da matriz de distâncias (Google Maps).
2. **Definição de parâmetros:** escolha dos depósitos, definição do limite de pontos por rota e do número mínimo de rotas que devem atender cada ponto.
3. **Aplicação da heurística de Clarke & Wright:** cálculo dos savings, construção das rotas iniciais e fusão sucessiva de rotas, respeitando as restrições.
4. **Correção com Dijkstra:** detalhamento dos caminhos entre pontos consecutivos, garantindo percurso mínimo entre eles e conexão adequada aos depósitos.
5. **Cálculo de indicadores:** distância total percorrida por ciclo, distância por rota e quantidade de rotas por ponto.
6. **Análise qualitativa:** avaliação da cobertura dos pontos de alta demanda e comparação da quilometragem total com o sistema atual.

## 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Esta seção apresenta os resultados obtidos pela aplicação da heurística de Clarke & Wright, complementada pelo algoritmo de Dijkstra, para o redesenho das rotas dos ônibus circulares do Campus Butantã. Todos os resultados numéricos, tabelas, mapas e rotas analisadas foram extraídos do relatório-base fornecido pelo grupo .

### 5.0.1 Resultados da aplicação do modelo de roteirização

#### 5.0.1.1 Distâncias das rotas atuais

A Tabela 8 apresenta as distâncias percorridas pelas rotas atuais dos circulares internos, considerando o percurso completo de cada itinerário.

Tabela 8 – Distâncias dos circulares atuais (ida, volta e rotas em laço).

<b>Circular</b>	<b>Rota</b>	<b>Distância (km)</b>
8082 – Ida	2-26-24-23-22-20-19-18-7-8-9-10-11-3-1	8,204
8082 – Volta	1-3-11-10-9-8-7-18-19-20-21-22-23-24-26-2	9,396
8083 – Ida	2-26-25-13-12-3-4-5-6-7-6-5-4-1	8,591
8083 – Volta	1-4-5-4-3-12-13-26-2	6,694
8084	2-26-14-15-16-17-16-15-14-26-2	7,652
8085	1-3-4-5-6-7-17-16-15-14-23-24-23-14-15-16-17-7-6-5-4-1	13,208
<b>Total</b>		<b>53,746</b>

**Fonte:** Elaboração própria a partir dos dados da SPTrans.

A Tabela 8 mostra que, na configuração atual das linhas internas 8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10, a soma das distâncias percorridas pelos itinerários (considerando idas, voltas e laços completos) atinge aproximadamente 53,7 km por ciclo completo do sistema. Além disso, observa-se uma heterogeneidade relevante entre as rotas: enquanto a 8084 percorre cerca de 7,7 km, a 8085 chega a 13,2 km, produzindo uma diferença superior a 5,5 km entre a rota mais curta e a mais longa.

### 5.0.2 Análise descritiva das rotas atuais com base na Tabela de Distâncias e nos mapas oficiais da SPTrans

A Tabela referente às “Distâncias dos circulares atuais” sintetiza a configuração operacional das quatro linhas internas da USP com 8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10, revelando diferenças marcantes quanto ao percurso, extensão e cobertura espacial. A interpretação dessas rotas deve ser realizada em conjunto com os mapas oficiais disponibilizados pela SPTrans, pois somente a análise espacial do território permite compreender por que algumas linhas apresentam ciclos mais longos, velocidades menores e assimetrias relevantes no carregamento de usuários.

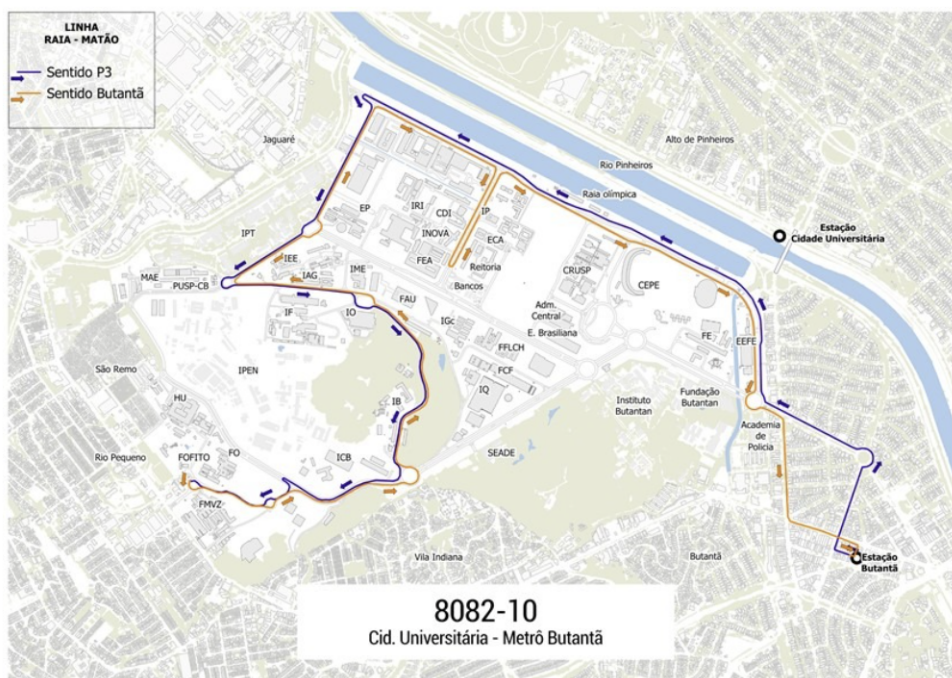
A seguir apresenta-se uma análise individual de cada linha, conectando: (i) a rota numérica apresentada na tabela; (ii) sua representação cartográfica; (iii) as implicações operacionais identificadas.

#### 5.0.2.1 Linha 8082–10

Os registros operacionais indicam que a linha 8082–10 percorre 8,204 km no sentido “ida” e 9,396 km no sentido “volta”, totalizando 17,600 km por ciclo completo. Essa diferença entre os dois sentidos revela uma assimetria importante no desenho da rota: o trajeto em direção ao Metrô Butantã é significativamente mais longo. Esse alongamento não decorre de ineficiência arbitrária, mas sim de condicionantes da malha viária interna, que obrigam o ônibus a contornar a Raia Olímpica, a Avenida da Universidade e outros eixos estruturantes do campus antes de acessar a área do terminal.

A análise do mapa da 8082–10 confirma esse comportamento: a rota é obrigada a percorrer um arco mais amplo na aproximação ao Butantã, atravessando vias internas sinuosas e englobando diversos institutos distribuídos ao longo da porção norte e central da Cidade Universitária. Por outro lado, o sentido P3 apresenta um retorno mais direto, seguindo corredores internos menos extensos. Essa configuração desigual contribui para ciclos maiores, maior variabilidade de tempo de viagem e maior propensão ao acúmulo de atrasos, fenômenos típicos em rotas com assimetrias estruturais significativas. A configuração espacial da linha 8082–10, apresentada na Figura 10, revela que sua geometria operacional é fortemente condicionada pela distribuição dos polos geradores de viagens dentro do campus. O traçado no sentido Butantã precisa conectar sucessivamente núcleos acadêmicos dispersos, o que obriga o veículo a seguir um percurso em “meandro”, com múltiplas deflexões e mudanças de direção. Essa característica aumenta o comprimento efetivo do trajeto, mas também amplia a área de cobertura, atendendo regiões que não possuem conexões diretas entre si.

Figura 10 – Mapa da linha 8082-10



Fonte: <<https://puspcb.usp.br/destaques/onibus-busp/>>

Ao longo desse percurso, o trajeto atende diversos institutos situados no eixo norte como ICB, POLI, IQ, IGc e IAG, mas especialmente dispersas. No retorno em direção ao Matão, o ônibus percorre um conjunto de vias internas sinuosas próximas ao IEE e ao IPT, o que torna o deslocamento mais demorado e sujeito a maior variabilidade operacional, além de reforçar o caráter extenso e assimétrico do ciclo atual.

#### 5.0.2.1.1 Diagnóstico operacional

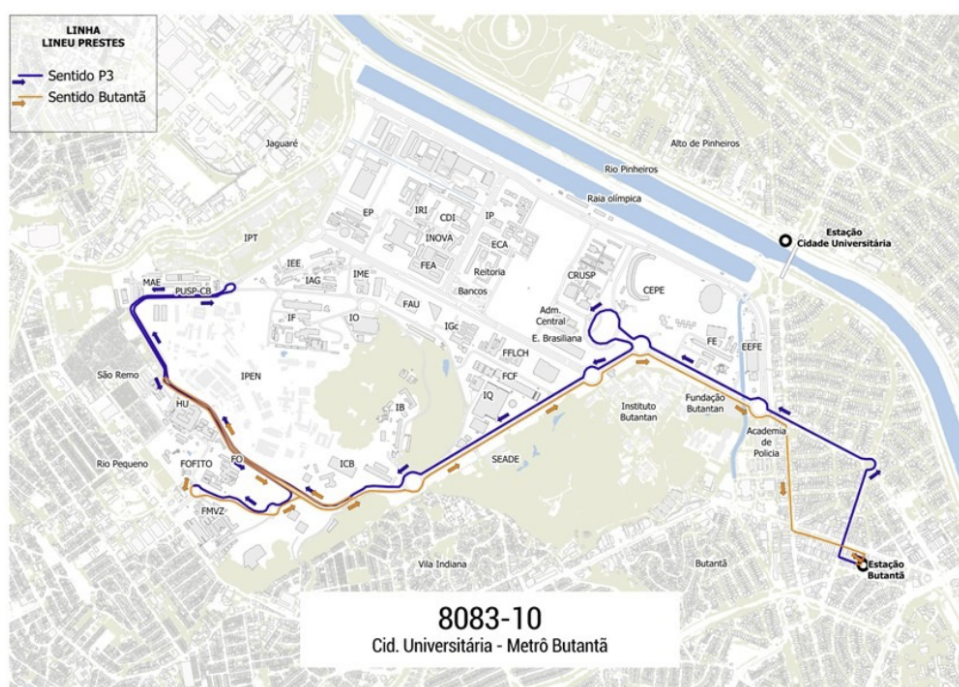
A linha 8082–10 destaca-se por ser uma das rotas mais longas de todo o sistema de circulares, característica que influencia diretamente seu desempenho operacional. Seu percurso atravessa áreas extensas do campus, muitas delas com demanda relativamente dispersa, o que torna o atendimento menos concentrado e aumenta o tempo total de deslocamento. Apesar dessa dispersão, a linha contempla também alguns dos principais polos geradores de viagens da USP, como FEA, FFLCH, Poli, CRUSP e CEPEUSP, o que reforça sua importância estratégica dentro da rede. Entretanto, a combinação entre grande extensão do trajeto, múltiplos pontos de alta demanda e longos deslocamentos internos contribui para uma maior probabilidade de atrasos acumulados ao longo do ciclo. Na prática, a 8082–10 opera como eixo estrutural de conexão entre regiões periféricas do campus e o Metrô Butantã, mas seu caráter alongado e irregular evidencia limitações importantes da configuração atual, justificando plenamente a necessidade de redesenho e otimização da rota. A configuração espacial da linha 8083–10, apresentada na Figura 11, evidencia um traçado que combina atendimento a polos acadêmicos centrais com um

retorno estruturalmente mais direto em direção ao Terminal P3. Diferentemente da 8082–10, cuja geometria envolve desvios laterais e aproximações sinuosas, a 8083–10 adota eixos viários mais lineares, especialmente no sentido de volta, o que contribui para um percurso mais curto e menos sujeito a dispersões laterais.

### 5.0.2.2 Linha 8083–10

Os dados operacionais mostram que a linha 8083–10 percorre 8,591 km no sentido “ida” e 6,694 km no sentido “volta”, totalizando 15,285 km por ciclo completo. Em comparação com a 8082–10, trata-se de uma rota ligeiramente mais curta e com assimetria menos acentuada entre os dois sentidos. Essa diferença indica que, embora ainda existam condicionantes da malha viária que obrigam variações no percurso de ida e volta, o 8083–10 consegue realizar um retorno mais direto, reduzindo o comprimento total do ciclo e, conseqüentemente, a probabilidade de acúmulo de atrasos.

Figura 11 – Mapa da linha 8083-10



Fonte: <<https://puspcb.usp.br/destaques/onibus-busp/>>

A leitura integrada do trajeto da linha 8083–10 mostra que seu comportamento operacional possui uma forte similaridade estrutural com a linha 8082–10 no sentido Metrô → Campus. Em ambos os casos, a aproximação inicial se dá pelo eixo Butantã–USP, convergindo rapidamente para a região formada por IME, IQ, ICB e FAU, um conjunto de institutos centrais com elevado fluxo diário de estudantes e servidores. Essa sobreposição confirma que as duas linhas operam essencialmente como corredores paralelos, duplicando a oferta em um mesmo trecho do campus e contribuindo para a concentração de veículos em vias muito próximas.

O diferencial da 8083–10 surge no retorno: ao utilizar a Avenida Lineu Prestes como principal corredor de volta ao Terminal P3, a rota estabelece um deslocamento mais direto, retilíneo e com menor interferência viária. Esse desenho reduz a extensão total do ciclo e evita curvas e desvios característicos da 8082–10, que contorna setores mais periféricos antes de retornar ao ponto de origem. O resultado é um ciclo ligeiramente mais curto, de melhor fluidez operacional e menor tendência a acumular atrasos ao longo do dia. Além disso, a rota mantém forte atendimento a institutos acadêmicos centrais, IME, IQ, ICB e FAU, reforçando sua função como uma das principais linhas estruturais do campus. Entretanto, essa mesma característica contribui para a redundância observada entre as rotas 8082–10 e 8083–10, já que ambas percorrem praticamente a mesma espinha dorsal do campus, disputando a mesma demanda e repetindo trajetos idênticos em longos trechos.

#### 5.0.2.2.1 Diagnóstico operacional

A análise operacional da linha 8083-10 indica que o retorno pela Avenida Lineu Prestes contribui para a redução do ciclo, pois oferece um trajeto mais direto e com menor número de interferências viárias. Apesar dessa vantagem, a rota atravessa áreas caracterizadas por forte desnível topográfico e concentração elevada de tráfego interno, fatores que ampliam a variabilidade do tempo de viagem e favorecem a ocorrência de atrasos ao longo do dia. Além disso, a linha apresenta ampla sobreposição com a 8082-10, reproduzindo praticamente os mesmos corredores de atendimento. Essa redundância gera duplicidade operacional e dispersão de recursos, consumindo quilometragem e esforço de frota que poderiam ser direcionados a regiões menos atendidas ou a rotas que enfrentam maior pressão de demanda. Assim, embora funcional, a 8083-10 opera com baixa eficiência espacial, reforçando a necessidade de um redesenho que elimine trechos redundantes e promova uma redistribuição mais equilibrada da oferta dentro da rede. A Figura 12 mostra que a linha 8084–10 opera exclusivamente no miolo da Cidade Universitária, percorrendo um laço compacto que conecta os principais institutos acadêmicos e o CRUSP. Seu desenho circular, sem variações entre ida e volta, favorece ciclos estáveis, embora a elevada concentração de pedestres, ciclistas e pontos de parada reduza sua velocidade média. Trata-se, portanto, de uma rota essencialmente interna, voltada à redistribuição de passageiros entre unidades próximas e ao suporte das linhas troncais do sistema.

#### 5.0.2.3 Linha 8084–10

A linha 8084-10 configura-se como um laço único de 7,652 km, característica que a distingue das demais rotas do sistema. Por operar em formato circular, apresenta o ciclo mais curto entre todas as linhas e praticamente não possui assimetrias entre os sentidos de operação, já que ida e volta percorrem o mesmo arco viário. Essa estrutura compacta favorece maior regularidade operacional, embora a rota sofra com baixa velocidade média devido ao elevado número de paradas e à intensa circulação na região central do campus.



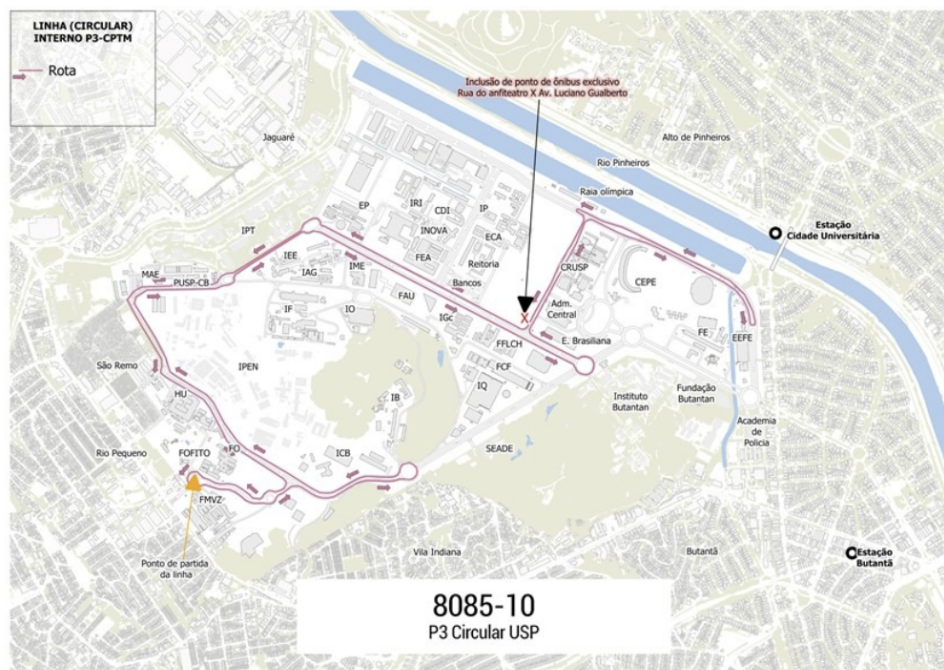
Em síntese, trata-se de uma rota essencial para o funcionamento do sistema, mas exposta a condições que aumentam sua vulnerabilidade operacional: concentração de demanda, grande fluxo de usuários circulando entre prédios próximos e coexistência com modais leves de mobilidade. Por essa razão, sua possibilidade de ganho estrutural é limitada. Qualquer tentativa de melhoria sistêmica deve, portanto, considerar o alívio operacional da 8084-10 por meio de reorganização das demais rotas exatamente como propõe o modelo otimizado desenvolvido neste trabalho. A Figura 13 mostra que a linha 8085-10 percorre praticamente todo o perímetro da Cidade Universitária, conectando setores mais afastados e de menor densidade. Seu formato de laço extenso, associado às grandes distâncias entre unidades atendidas, explica o ciclo de 13,208 km, um dos maiores entre as linhas circulares. Essa configuração espacial favorece tempos de viagem mais longos e maior variabilidade operacional, refletindo a função periférica e distributiva que a rota desempenha no sistema.

#### **5.0.2.4 Linha 8085-10**

A linha 8085-10 tem um ciclo total de 13,208 km, o que a caracteriza como a segunda rota mais longa de todo o sistema de circulares. Essa extensão expressiva está diretamente relacionada ao desenho espacial da linha, que percorre quase todo o perímetro do campus, conectando regiões amplas e menos adensadas.

O mapa da 8085-10 evidencia essa característica ao mostrar um trajeto que contorna setores periféricos, passando por unidades afastadas entre si e cobrindo áreas de baixa continuidade urbana. Esse formato de laço extenso explica por que a rota tende a apresentar tempos de viagem maiores e menor regularidade operacional, além de ser percebida pelos usuários como uma linha mais demorada em comparação às demais.

Figura 13 – Mapa da linha 8085-10



Fonte: <<https://puspcb.usp.br/destaques/onibus-busp/>>

A 8085–10 realiza praticamente uma cobertura perimetral de todo o campus, descrevendo um grande anel que passa por setores mais afastados da malha central. Seu trajeto inclui regiões periféricas importantes como FMVZ, FO e HU, antes de retornar pela porção sul do campus e pela área do CEPEUSP, fechando um circuito amplo e contínuo. Esse desenho reforça sua função como rota de ligação perimetral, conectando unidades que não são plenamente atendidas pelas demais linhas e garantindo acesso regular a áreas de menor densidade, ainda que ao custo de um ciclo mais longo e operacionalmente mais exigente.

#### 5.0.2.4.1 Diagnóstico operacional

A 8085–10 apresenta a menor frequência de todo o sistema, com intervalos médios próximos de 25 minutos entre viagens, o que se traduz em tempos de espera elevados e menor atratividade para os usuários. Como seu percurso é extenso e abrange áreas geograficamente dispersas, a linha opera com baixa eficiência espacial, percorrendo longos trechos com demanda relativamente diluída. Embora seja indispensável para garantir atendimento às zonas periféricas do campus, o formato atual do itinerário revela um desenho operacional pouco racionalizado, reforçando a necessidade de ferramentas de otimização como heurísticas de roteirização para reorganizar o fluxo, encurtar trajetos e melhorar a distribuição da oferta.

### 5.0.3 Distância real por ciclo (ida + volta)

A partir da Tabela 1 – *Distância dos circulares* do Relatório Grupo 3 (artigo 1), tem-se as seguintes distâncias por sentido para cada linha:

- 8082 – Ida: 8,204 km;
- 8082 – Volta: 9,396 km;
- 8083 – Ida: 8,591 km;
- 8083 – Volta: 6,694 km;
- 8084: 7,652 km (rota única em laço);
- 8085: 13,208 km (rota única em laço).

Portanto, a distância do ciclo completo (ida + volta, ou laço inteiro) é dada pela Tabela 9.

Tabela 9 – Distância do ciclo completo (ida + volta) por linha.

Linha	Distância do ciclo (km)	Cálculo
8082-10	17,600	8,204 + 9,396
8083-10	15,285	8,591 + 6,694
8084-10	7,652	Laço único
8085-10	13,208	Laço único

Fonte: Elaboração própria.

A análise conjunta da Tabela de distâncias e dos mapas das quatro linhas atuais mostra que o sistema apresenta forte heterogeneidade entre as rotas, tanto em extensão quanto em cobertura territorial. As linhas 8082–10 e 8083–10 formam eixos longos que conectam o metrô a múltiplas unidades acadêmicas, porém sofrem com sobreposição de trajetos e ciclos extensos. A 8084–10, embora seja a mais curta, apresenta velocidades reduzidas devido ao tráfego intenso na região central e acaba sendo a linha mais pressionada pela demanda interna. Já a 8085–10, com seu percurso periférico e disperso, torna-se lenta e pouco frequente, aumentando tempos de espera e reduzindo sua atratividade.

Essas assimetrias estruturais confirmam que o arranjo atual das rotas não está otimizado, resultando em: duplicidade de cobertura em alguns trechos, falta de atendimento eficiente em outros, ciclos longos e frequências desbalanceadas. Este diagnóstico reforça a pertinência da abordagem proposta neste trabalho: utilizar heurísticas de roteirização (Clarke & Wright combinada a Dijkstra) para reduzir redundâncias, encurtar percursos e redistribuir a carga entre as rotas, mantendo a cobertura integral dos 26 pontos do campus.

## 5.1 Caracterização operacional das quatro linhas circulares atuais

A Tabela 10 resume os principais indicadores operacionais das quatro linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10, a partir dos quadros de horários e dos tempos estimados de viagem publicados pela SPTrans para o Campus Butantã (consulta ao site de itinerários em 2025) e das distâncias levantadas.

Tabela 10 – Indicadores operacionais das linhas circulares atuais da USP (dados SPTrans).

Linha	Horário de operação	Partidas/dia	Headway médio	Perfil de oferta
8082-10	04:25–01:13	≈ 89	≈ 14 min	frequência intermediária
8083-10	04:30–01:55	≈ 84	≈ 15 min	frequência intermediária
8084-10	05:00–00:40	≈ 140	≈ 8 min	linha mais frequente
8085-10	04:00–01:30	52	≈ 25 min	menor frequência, rota longa

**Fonte:** Elaboração própria a partir dos quadros de horários.

Todas as quatro linhas funcionam por mais de 20 horas por dia, reforçando o caráter de serviço essencial na mobilidade interna.

As linhas 8082-10 e 8083-10 apresentam intervalos médios em torno de 14–15 min, com leve intensificação nos picos (intervalos mais curtos) e alívio no início e final da operação.

A 8084-10 é claramente a linha mais frequente, com cerca de 8 minutos entre partidas durante a maior parte do dia e algo acima de 10 minutos apenas nas extremidades da operação.

A 8085-10 é a linha com menor oferta horária, com headway médio próximo de 25 minutos; na prática, é percebida pelos usuários como “linha que demora mais a passar”, o que está alinhado com os relatos de espera prolongada e maior estresse nos pontos de parada.

Essa diferenciação de oferta é coerente com a ideia de combinar linhas mais “capilarizadas” (maior cobertura e maior frequência, como a 8084-10) com linhas mais “expressas” ou estruturais, como sugerido por estudos anteriores sobre o BUSP.

### 5.1.1 Tempo de ciclo SPTrans e velocidades médias

#### 5.1.1.1 Tempo de ciclo (dados SPTrans)

Nas telas de itinerário da SPTrans, o tempo informado corresponde ao tempo do ciclo completo da linha (ida + volta, ou laço inteiro), e não apenas a uma viagem em um único sentido. Os tempos por período são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Tempo de ciclo estimado por período (dados SPTrans).

<b>Linha</b>	<b>Manhã</b>	<b>Entrepico</b>	<b>Tarde</b>
8082-10	41 min	40 min	40 min
8083-10	35 min	33 min	32 min
8084-10	38 min	36 min	36 min
8085-10	42 min	43 min	42 min

**Fonte:** Elaboração própria com dados SPTrans.

### 5.1.2 Tempo de ciclo usando sempre ida + volta

Consolidando o uso da distância do ciclo completo e o fato de que o tempo da SPTrans já é o ciclo inteiro, tem-se a Tabela 12, que resume distância e tempo de ciclo por período.

Tabela 12 – Tempo de ciclo

<b>Linha</b>	<b>Período</b>	<b>Distância (km)</b>	<b>Tempo (min)</b>
8082-10	Manhã	17,600	41
	Entrepico	17,600	40
	Tarde	17,600	40
8083-10	Manhã	15,285	35
	Entrepico	15,285	33
	Tarde	15,285	32
8084-10	Manhã	7,652	38
	Entrepico	7,652	36
	Tarde	7,652	36
8085-10	Manhã	13,208	42
	Entrepico	13,208	43
	Tarde	13,208	42

**Fonte:** Elaboração própria.

De forma qualitativa, a Tabela 12 apresenta os comportamentos distintos e coerentes com a configuração espacial de cada trajeto. A 8082–10 se destaca por operar o ciclo mais longo, variando entre 40 e 41 minutos, resultado direto de sua maior extensão física e das múltiplas aproximações aos institutos do eixo norte do campus. A 8083–10, embora também apresente um ciclo relativamente elevado, situando-se entre 32 e 35 minutos, percorre uma distância ligeiramente menor, beneficiada pelo retorno mais retilíneo proporcionado pelo corredor da Avenida Lineu Prestes. Em contraste, a 8084–10 realiza o ciclo mais curto do sistema, entre 36 e 38 minutos, reflexo de sua rota compacta e circular, concentrada inteiramente na região central da Cidade Universitária, ainda que a elevada quantidade de paradas contribua para manter sua velocidade média reduzida. Por fim, a 8085–10 apresenta um ciclo intermediário, entre 42 e 43 minutos, porém associado a uma distância maior do que a da 8084–10, uma vez que percorre um

laço periférico mais extenso, conectando setores mais afastados entre si.

### 5.1.3 Headway médio, número de ciclos diários e frota aproximada

#### 5.1.3.1 Headway médio

Com base nos quadros de partidas da SPTrans, obtém-se aproximadamente:

- 8082-10: ~ 89 partidas/dia, operação 04h25–01h13 ( $\approx 20,8$  h);
- 8083-10: ~ 84 partidas/dia, operação 04h30–01h55 ( $\approx 21,4$  h);
- 8084-10: ~ 140 partidas/dia, operação 05h00–00h40 ( $\approx 19,7$  h);
- 8085-10: 52 partidas/dia, operação 04h00–01h30 ( $\approx 21,5$  h).

O headway médio é aproximado por:

$$\text{headway médio} \approx \frac{\text{duração da operação (min)}}{\text{número de partidas}}.$$

Os valores resultantes são apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Headway médio aproximado por linha.

Linha	Operação (h)	Partidas/dia	Headway médio
8082-10	04h25–01h13 ( $\sim 20,8$ h)	$\sim 89$	$\sim 14,0$ min
8083-10	04h30–01h55 ( $\sim 21,4$ h)	$\sim 84$	$\sim 15,3$ min
8084-10	05h00–00h40 ( $\sim 19,7$ h)	$\sim 140$	$\sim 8,4$ min
8085-10	04h00–01h30 ( $\sim 21,5$ h)	52	$\sim 24,8$ min

**Fonte:** Elaboração própria.

Em resumo, a 8084-10 é a linha mais frequente (ônibus a cada  $\sim 8$  minutos), a 8085-10 é a menos frequente (esperas médias em torno de 25 minutos) e 8082-10 e 8083-10 situam-se em um patamar intermediário (14–15 minutos).

#### 5.1.3.2 Número máximo de ciclos por veículo ao longo do dia

Admitindo operação contínua e tempo de ciclo no entropico, o número máximo teórico de ciclos que um único veículo consegue completar em um dia é dado por:

$$\text{ciclos/dia} \approx \frac{\text{duração da operação (min)}}{\text{tempo de ciclo no entropico (min)}}.$$

A Tabela 14 sintetiza o número aproximado de ciclos que cada linha é capaz de realizar ao longo de um dia típico de operação, considerando seu respectivo tempo de ciclo e a duração diária

do serviço. Observa-se que a 8083–10 apresenta o maior potencial de ciclos, atingindo cerca de 39 viagens diárias devido ao seu ciclo relativamente curto e à operação prolongada. Em seguida aparecem as linhas 8084–10 e 8082–10, com aproximadamente 33 e 31 ciclos, respectivamente, refletindo suas diferenças de extensão e tempo médio de percurso. Já a 8085–10, apesar de operar por mais horas, possui o menor número estimado de ciclos (cerca de 30), resultado do ciclo mais longo entre as quatro. Esses valores fornecem uma visão geral da produtividade potencial de cada linha dentro do sistema circular.

Tabela 14 – Número máximo aproximado de ciclos por veículo ao longo do dia.

Linha	Operação (h)	Ciclo (min)	Ciclos/dia
8082-10	20,8	40	~31
8083-10	21,4	33	~39
8084-10	19,7	36	~33
8085-10	21,5	43	~30

Fonte: Elaboração própria com dados SPTrans.

### 5.1.3.3 Velocidades médias por período (ciclo completo)

Como o tempo fornecido pela SPTrans já se refere ao ciclo completo, a velocidade média de cada linha em cada período é calculada por:

$$v = \frac{d_{\text{ciclo}}}{t/60},$$

onde  $d_{\text{ciclo}}$  é a distância total do ciclo (km), conforme a Tabela 9, e  $t$  é o tempo de ciclo informado pela SPTrans (minutos). Os resultados são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Velocidade média por ciclo completo em cada linha e período.

Linha	Período	Distância (km)	Tempo (min)	Veloc. (km/h)
8082-10	Manhã	17,600	41	25,8
	Entrepico	17,600	40	26,4
	Tarde	17,600	40	26,4
8083-10	Manhã	15,285	35	26,2
	Entrepico	15,285	33	27,8
	Tarde	15,285	32	28,7
8084-10	Manhã	7,652	38	12,1
	Entrepico	7,652	36	12,8
	Tarde	7,652	36	12,8
8085-10	Manhã	13,208	42	18,9
	Entrepico	13,208	43	18,4
	Tarde	13,208	42	18,9

Fonte: Elaboração própria com dados SPTrans.

Com essa interpretação (tempo da SPTrans como ciclo completo), as linhas 8082-10 e 8083-10 apresentam velocidades médias elevadas, na faixa de 25,8 a 28,7 km/h. A linha 8085-10 opera em torno de 18,4–18,9 km/h, enquanto a 8084-10 apresenta as menores velocidades médias, próximas de 12,1–12,8 km/h. Isso indica que a 8084-10 realiza um ciclo relativamente curto em termos de distância, porém com operação mais lenta (maior número de paradas e interferências), ao passo que 8082-10 e 8083-10 percorrem ciclos mais longos em tempos relativamente reduzidos.

#### 5.1.3.4 Frota aproximada por linha

Adotando o tempo de ciclo no entropico e o headway médio diário, uma estimativa do número de ônibus necessários em cada linha é dada por:

$$\text{número de veículos} \approx \frac{\text{tempo de ciclo}}{\text{headway}}.$$

A Tabela 16 apresenta a estimativa de frota necessária para a operação das quatro linhas do sistema a partir da relação entre tempo de ciclo e headway praticado. Observa-se que a 8082–10 demanda aproximadamente três veículos para manter seu intervalo médio de 14 minutos, enquanto a 8083–10 opera com uma necessidade entre dois e três veículos, refletindo seu ciclo mais curto. A 8084–10, por sua vez, exige a maior frota relativa dentre as linhas circulares, variando entre quatro e cinco veículos devido ao headway reduzido e à alta demanda na região central. Por fim, a 8085–10 requer cerca de dois veículos, compatível com seu ciclo mais longo e com um intervalo operacional mais espaçado. Esses valores sintetizam a dimensão mínima de frota necessária para garantir a regularidade do serviço em cada linha.

Tabela 16 – Estimativa de frota necessária por linha.

Linha	Ciclo (min)	Headway (min)	Frota estimada
8082-10	~40	~14,0	~3
8083-10	~33	~15,3	~2–3
8084-10	~36	~8,4	~4–5
8085-10	~43	~24,8	~2

**Fonte:** Elaboração própria.

Somando, obtém-se algo em torno de 11 a 13 veículos em operação simultânea, lembrando que a frota total alocada ao sistema é de 18 ônibus, segundo informado pela Prefeitura da USP. A diferença pode ser atribuída a veículos de reserva, folgas operacionais, manutenção e contingências, o que é esperado em sistemas de transporte público.

A partir das distâncias reais de cada rota, obtidas na Tabela 1 do relatório de referência, e dos tempos de ciclo divulgados pela SPTrans, foi possível estimar a velocidade média, o tempo de giro, o headway e a frota necessária das quatro linhas atuais (8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10). Considerando que o tempo informado pela SPTrans já se refere ao ciclo completo,

as linhas 8082-10 e 8083-10 apresentam velocidades médias elevadas, entre aproximadamente 26 e 29 km/h, ao passo que a 8084-10 opera com valores próximos de 12–13 km/h e a 8085-10 em torno de 18–19 km/h. A linha 8084-10 combina, portanto, menor distância por ciclo com operação mais lenta, enquanto 8082-10 e 8083-10 percorrem distâncias maiores em tempos relativamente reduzidos.

O cruzamento entre tempo de ciclo e headway médio indica que a linha 8084-10 é a mais frequente do sistema, com intervalos próximos de 8,4 minutos, ao passo que a 8085-10 apresenta os maiores intervalos, em torno de 24,8 minutos, tornando-se mais suscetível a atrasos percebidos pelos usuários. As linhas 8082-10 e 8083-10 apresentam frequências intermediárias, em torno de 14–15 minutos. A estimativa de frota aponta para a necessidade de aproximadamente 3 veículos na 8082-10, 2–3 veículos na 8083-10, 4–5 na 8084-10 e 2 na 8085-10, totalizando cerca de 11 a 13 ônibus em operação simultânea, com o restante da frota dedicado a reservas e manutenção. Esses resultados reforçam a importância de ajustar o desenho das rotas e a programação de partidas, de forma integrada, para equilibrar tempos de ciclo, frequência e utilização da frota, servindo de base para a aplicação dos modelos de otimização apresentados nos capítulos seguintes.

#### 5.1.4 Velocidade por ciclo e Desempenho Operacional

A Tabela 17 resume o desempenho operacional das quatro linhas atuais a partir da média dos tempos de ciclo informados pela SPTrans (manhã, entropico e tarde). sentes no eixo central do campus.

A velocidade comercial por período é calculada como

$$v = \frac{\text{distância do ciclo (km)}}{\text{tempo do ciclo (h)}}.$$

Observa-se que as linhas 8082–10 e 8083–10 apresentam as maiores velocidades médias, em torno de 26–28 km/h, coerentes com percursos relativamente lineares e com menor densidade de paradas ao longo do trajeto. Em contraste, a linha 8084–10, apesar de ser a rota com menor distância de ciclo (7,652 km), exibe o maior tempo médio de giro (36,7 minutos) e, consequentemente, a menor velocidade média (aproximadamente 12,5 km/h), reflexo direto da forte concentração de demanda e das inúmeras interferências pre

Tabela 17 – Velocidade média por ciclo completo (média dos períodos).

Linha	Distância (km)	Tempo médio (min)	Velocidade (km/h)
8082-10	17,600	40,3	26,2
8083-10	15,285	33,3	27,5
8084-10	7,652	36,7	12,5
8085-10	13,208	42,3	18,7

**Fonte:** Elaboração própria.

A linha 8085–10 ocupa uma posição intermediária, com velocidade média em torno de 18,7 km/h e ciclo de 42,3 minutos, compatíveis com seu perfil de laço periférico longo, que conecta unidades mais afastadas e setores de menor densidade urbana. Esse conjunto de resultados reforça o diagnóstico construído ao longo do trabalho: enquanto 8082–10 e 8083–10 são estruturalmente longas, mas relativamente rápidas, a 8084–10 é curta porém lenta e saturada, e a 8085–10 combina percurso extenso com frequência reduzida. Essas assimetrias justificam a necessidade de reorganizar as rotas por meio do modelo de roteirização proposto, de forma a encurtar ciclos, redistribuir a demanda e elevar a eficiência global do sistema BUSP.

### 5.1.5 Resumo comparativo entre linhas

A Tabela 18 sintetiza os principais indicadores das quatro linhas atualmente em funcionamento no Campus Butantã (8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10) durante o período de entropico, faixa em que a operação tende a ser mais estável e menos sujeita às oscilações extremas dos horários de pico. A leitura conjunta da distância do ciclo, do tempo de giro, da velocidade operacional e do headway evidencia um conjunto de desequilíbrios estruturais no arranjo atual das rotas, que fundamentam diretamente a necessidade do redesenho apresentado neste trabalho.

Tabela 18 – Resumo operacional das linhas.

Linha	Dist. ciclo (km)	Ciclo (min)	Veloc. (km/h)	Headway (min)	Frota	Fonte: Elaboração própria.
8082-10	17,600	40	26,4	14,0	≈ 3	
8083-10	15,285	33	27,8	15,3	≈ 2–3	
8084-10	7,652	36	12,8	8,4	≈ 4–5	
8085-10	13,208	43	18,4	24,8	≈ 2	

Observa-se inicialmente que as linhas apresentam grande disparidade quanto à extensão dos percursos. As linhas 8082–10 e 8083–10, com 17,6 km e 15,3 km respectivamente, compõem o núcleo mais extenso do sistema, conectando o Metrô Butantã ao conjunto de institutos por trajetos longos e amplamente sobrepostos. A linha 8085–10, embora um pouco menor (13,2 km), também apresenta um ciclo relativamente disperso e pouco compacto. Em contraste, a 8084–10 possui apenas 7,7 km de extensão, configurando-se como a única rota curta do sistema. Essa diferença de escala gera uma forte assimetria operacional: enquanto algumas linhas exigem longos ciclos, outras possuem percursos consideravelmente menores, criando um desbalanceamento natural na alocação da frota e resultando em frequências bastante distintas entre si.

O tempo de ciclo segue comportamento semelhante. As linhas 8082–10 e 8083–10 apresentam tempos de giro moderados (40 e 33 minutos, respectivamente), enquanto a 8085–10 figura como o ciclo mais longo do sistema (43 minutos), reflexo direto de seu desenho disperso.

Já a 8084–10, apesar de seu percurso reduzido, apresenta um ciclo relativamente elevado (36 minutos), indicando a presença de diversas interferências operacionais, como elevado número de paradas, travessias de pedestres e fluxo intenso no eixo central do campus. O resultado é um sistema em que ciclos longos convivem com ciclos curtos, produzindo inconsistências no espaçamento das viagens e dificultando a regularidade da operação ao longo do dia.

A velocidade média operacional reforça ainda mais essa heterogeneidade. As linhas 8082–10 e 8083–10 apresentam velocidades elevadas, entre 26 e 29 km/h, coerentes com percursos mais retos e com menor densidade de paradas. Em sentido oposto, a linha 8084–10 opera com velocidade aproximada de 12,8 km/h, típica de rotas submetidas a tráfego intenso e elevado número de usuários embarcando e desembarcando ao longo do trajeto. A linha 8085–10 apresenta velocidade intermediária, na faixa de 18 km/h, compatível com sua função de cobertura periférica. Esse conjunto de discrepâncias deixa claro que o sistema atual não distribui adequadamente a carga operacional: algumas rotas conseguem operar com fluidez, enquanto outras acumulam interferências, lentidão e alta saturação.

O headway, que é intervalo médio entre partidas, também explicita o desequilíbrio da operação. A linha 8084–10, por atender a região central e possuir alta demanda, é a mais frequente do sistema, com intervalos de cerca de 8,4 minutos. As linhas 8082–10 e 8083–10, com ciclos mais longos e sobreposição significativa, apresentam headways intermediários, entre 14 e 15 minutos. Por fim, a linha 8085–10 opera com o maior intervalo do sistema, 24,8 minutos, gerando longas esperas que comprometem a atratividade dessa rota, especialmente considerando seu trajeto extenso e disperso.

A síntese desses indicadores revela um quadro de grandes assimetrias: as linhas 8082–10 e 8083–10 apresentam sobreposição excessiva de cobertura; a linha 8085–10 sofre com suboferta temporal; e a linha 8084–10 opera sob forte pressão da demanda, sendo submetida a níveis elevados de saturação. Além disso, a coexistência de ciclos muito longos com ciclos curtos contribui para a irregularidade das viagens, o acúmulo de atrasos e a sobrecarga de pontos centrais da rede, resultando em baixa previsibilidade operacional e insatisfação por parte dos usuários.

Diante desse diagnóstico, torna-se evidente a necessidade de um redesenho sistemático das rotas, capaz de balancear melhor a operação, encurtar trajetos, redistribuir a demanda e reduzir os tempos de espera. É justamente nesse contexto que o modelo de roteirização proposto neste trabalho se insere, apresentando uma alternativa estruturalmente superior para o funcionamento do sistema.

#### **5.1.5.1 Rotas propostas pelo modelo**

Após a aplicação da heurística de Clarke–Wright com as adaptações descritas na metodologia, foram obtidos quatro novos itinerários, apresentados na Tabela 19.

Tabela 19 – Distâncias das rotas propostas pelo modelo de roteirização.

Rota	Percurso	Distância (km)
Rota 1 – Ida	2-26-13-12-11-10-9-8-7-6-5-4-3-1	8,424
Rota 1 – Volta	1-3-12-13-14-15-21-22-23-24-26-2	7,116
Rota 2	2-26-24-23-22-20-19-18-17-16-15-14-16-2	10,226
Rota 3	2-26-14-15-16-17-16-15-14-25-26-2	9,115
Rota 4	1-3-4-5-6-7-17-16-15-14-23-24-23-14-15-16-17-7-6-5-4-1	13,208
<b>Total</b>	—	<b>48,089</b>

Fonte: Elaboração própria.

Já a Tabela 19 apresenta a solução obtida com a heurística de Clarke–Wright adaptada ao contexto do campus. Nesta configuração, também há cinco itinerários (Rota 1 – ida, Rota 1 – volta, Rota 2, Rota 3 e Rota 4), mas a distância total cai para 48,1 km. A Tabela 36 resume esse resultado: há uma redução absoluta de cerca de 5,7 km por ciclo, o que corresponde a uma economia próxima de 10,5% da quilometragem percorrida.

Outro aspecto importante é o *equilíbrio* entre os comprimentos das rotas. No cenário atual, a diferença entre a menor e a maior distância é de aproximadamente 5,6 km (7,652 km contra 13,208 km). Na solução proposta, a rota mais curta tem 7,116 km e a mais longa 10,226 km, reduzindo a amplitude para cerca de 3,1 km. Na prática, isso significa que os tempos de ciclo tendem a ficar mais homogêneos entre os itinerários, facilitando o dimensionamento de frota, a definição de horários e o equilíbrio de carga entre linhas.

Do ponto de vista operacional, a redução da distância média por itinerário de 12,02 km para 8,72 km (Tabela 36) indica que, mantendo-se a mesma frota, é possível:

- reduzir tempos de ciclo, encurtando o intervalo entre viagens sucessivas em um mesmo ponto;
- ou, alternativamente, manter tempos de ciclo semelhantes, porém com folgas maiores para absorver atrasos, aumentando a confiabilidade percebida pelos usuários.

Comparando os dois cenários, observa-se:

- Distância total atual: 53,746 km;
- Distância total proposta: 48,089 km;
- Economia absoluta: 5,657 km por ciclo;
- Economia relativa: aproximadamente 10,5% de redução de quilometragem.

Essa redução indica um potencial significativo de diminuição do tempo de deslocamento dos veículos, do consumo de combustível e dos custos operacionais. Mantida a mesma frota, essa

economia de distância pode ser convertida em maior frequência de atendimento ou em reserva de capacidade para horários de pico.

Em ambos os casos, o resultado converge para o objetivo central do trabalho: melhorar a qualidade de serviço sem necessariamente aumentar o número de veículos disponíveis.

### 5.1.6 Análise da Rota 1 (Ida e Volta) do Modelo Proposto

A Rota 1, dividida em dois trajetos, ida e volta, configura-se como o eixo estruturante do conjunto de rotas otimizadas geradas pela heurística paralela de Clarke & Wright. Seu papel central decorre da capacidade de conectar eficientemente os dois pontos de suprimento (Metrô Butantã e Terminal P3) aos principais polos acadêmicos do campus, garantindo elevada cobertura espacial com um ciclo reduzido e mais homogêneo em relação às rotas atualmente operadas pela SPTrans.

A Tabela 20 resume as distâncias dos dois segmentos (Ida e Volta), mostrando que a Rota 1 apresenta o ciclo mais curto entre todas as rotas propostas.

Tabela 20 – Distâncias dos segmentos Ida e Volta da Rota 1.

Segmento	Percurso	Distância (km)
Rota 1 – Ida	2-26-13-12-11-10-9-8-7-6-5-4-3-1	8,424
Rota 1 – Volta	1-3-12-13-14-15-21-22-23-24-26-2	7,116
<b>Ciclo total</b>	–	<b>15,540</b>

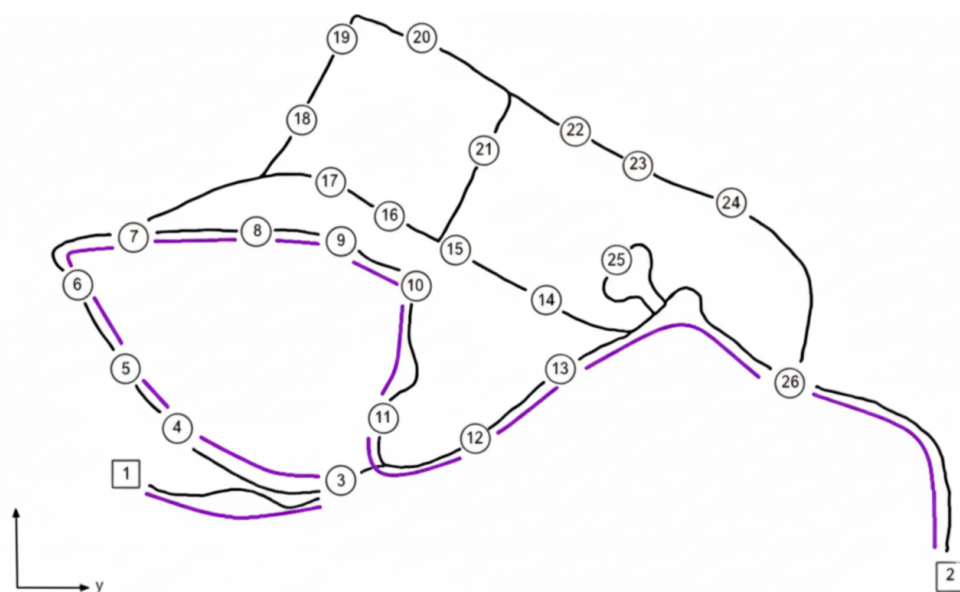
Fonte: Elaboração própria.

#### 5.1.6.1 Estrutura e características da Rota 1 – Ida

O percurso da ida Figura 14 apresenta uma sequência lógica e espacialmente coerente, a partir dessa organização observam-se três propriedades principais:

$$2 \rightarrow 26 \rightarrow 13 \rightarrow 12 \rightarrow 11 \rightarrow 10 \rightarrow 9 \rightarrow 8 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 1.$$

Figura 14 – Rota 1 – Ida



Fonte: Elaboração própria.

- **Acesso rápido ao interior do campus.** O percurso parte do Metrô Butantã (nó 2) e atinge rapidamente o eixo 26–13–12, desviando de voltas extensas e pouco eficientes presentes em rotas atuais como a 8082–10.
- **Cobertura encadeada do miolo acadêmico.** A rota percorre em sequência os principais polos: IQ, ICB, IME, FAU, IF, Poli, FEA e a região do P3, evitando duplicações e garantindo fluxo contínuo.
- **Encerramento no Terminal P3.** O término do percurso no nó 1 facilita o acoplamento com as outras rotas propostas e favorece sincronizações operacionais.

Do ponto de vista operacional, a extensão de apenas 8,424 km faz da Rota 1 o percurso mais curto entre todas as rotas otimizadas. Essa compactação do trajeto tem efeitos diretos e positivos sobre o desempenho do sistema: ciclos tornam-se naturalmente mais rápidos, reduzindo o tempo total necessário para que um veículo complete a volta; a variabilidade de atrasos diminui, já que rotas mais curtas são menos suscetíveis a acúmulos operacionais ao longo do percurso; e o sistema passa a ter maior capacidade de operar com intervalos menores entre viagens (headways reduzidos) sem qualquer necessidade de ampliar a frota disponível.

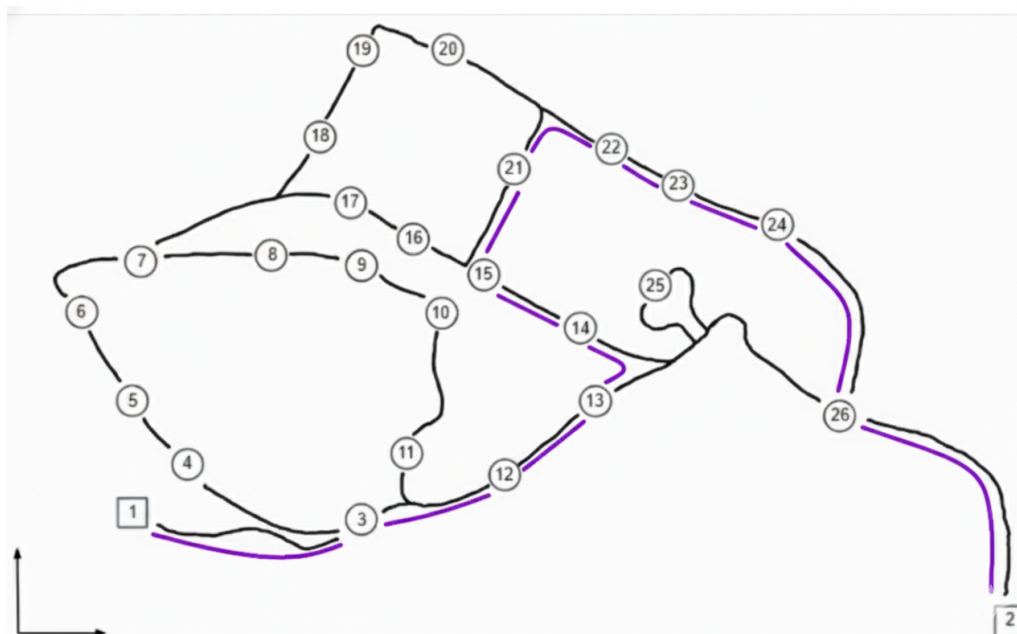
Em conjunto, esses fatores fazem com que a Rota 1 apresente o maior potencial de regularidade, previsibilidade e eficiência dentro da configuração otimizada.

#### 5.1.6.2 Estrutura e características da Rota 1 – Volta

A Figura 15 apresenta a sequência, esse trecho complementa funcionalmente a ida, apresentando três elementos-chave:

1 → 3 → 12 → 13 → 14 → 15 → 21 → 22 → 23 → 24 → 26 → 2.

Figura 15 – Rota 1 – Volta



**Fonte:** Elaboração própria.

Esse trecho complementa funcionalmente a ida, apresentando três elementos-chave:

- **Trajeto mais direto pelo corredor administrativo.** O caminho 14–15–21–22–23–24 reduz cruzamentos e elimina trechos sinuosos encontrados na ida, contribuindo para maior regularidade do ciclo.
- **Cobertura estratégica de alta circulação.** A volta passa pela FAU (14), Administração Central (15), área bancária (21–22–23) e retorno pelo eixo 24–26 até o Butantã, reforçando o atendimento às zonas de maior fluxo do campus.
- **Retorno direto ao depósito principal.** A chegada ao nó 2 (Butantã) conclui o ciclo de maneira rápida e simétrica.

Com uma extensão de apenas **7,116 km**, a volta é ainda mais curta que a ida, gerando um ciclo total muito inferior aos atuais. A Tabela 21 apresenta a diferença entre a distância total do ciclo da Rota 1 proposta e as duas linhas atuais com maior sobreposição espacial, 8082–10 e 8083–10. Observa-se que ambas percorrem trajetos ligeiramente mais longos que o ciclo da Rota 1, com acréscimos de 2,06 km e 0,26 km, respectivamente. Essa diferença reflete a maior dispersão viária das linhas atuais, cujos percursos incluem desvios laterais e aproximações mais extensas ao longo do eixo norte do campus. Já o traçado da Rota 1 apresenta uma estrutura mais

compacta, reduzindo distâncias sem comprometer a cobertura dos nós atendidos. Esses valores fornecem o primeiro indicativo quantitativo de que o redesenho espacial pode diminuir o esforço operacional diário mantendo a lógica estrutural do sistema.

Tabela 21 – Comparação das distâncias do ciclo da Rota 1 com linhas atuais.

Linha Atual	Distância do Ciclo (km)	Diferença para Rota 1 (km)
8082–10	17,600	+2,06
8083–10	15,285	+0,26

Fonte: Elaboração própria.

### 5.1.6.3 Papel estrutural da Rota 1 na rede otimizada

Em termos sistêmicos, a Rota 1 assume parte substancial da função atualmente desempenhada pelas linhas 8082–10 e 8083–10, reduzindo redundâncias e racionalizando a cobertura. Destacam-se os seguintes aspectos:

- **Redução de sobreposição.** Trechos como Butantã–IQ–IME–FEA–FFLCH, hoje duplicados por 8082–10 e 8083–10, passam a ser atendidos de forma única e organizada pela Rota 1.
- **Cobertura dos principais polos geradores.** A Rota 1 tangencia diretamente FFLCH (14), Poli (17), FEA (16), IQ/IB/IME (12–13–10) e toda a região administrativa (21–22–23), assegurando atendimento aos pontos de maior demanda.
- **Integração perfeita com as demais rotas otimizadas.** Enquanto a Rota 1 cobre o tronco central, a Rota 2 atende o laço norte (18–19–20), a Rota 3 reforça o eixo 14–15–16–17 e a Rota 4 reproduz eficientemente o laço periférico equivalente ao atual 8085–10.

A Rota 1 apresenta um ciclo total de 15,540 km, valor substancialmente menor que o da linha 8082–10 (17,600 km) e apenas levemente superior ao ciclo da 8083–10 (15,285 km). Embora a diferença para a 8083–10 seja pequena em termos absolutos, o redesenho proposto revela-se claramente vantajoso, pois não se trata apenas de comparar quilômetros, mas de avaliar qualidade estrutural da rota. A Rota 1 apresenta um ciclo total de 15,540 km, valor substancialmente menor que o da linha 8082–10 (17,600 km) e apenas levemente superior ao ciclo da 8083–10 (15,285 km). Embora a diferença para a 8083–10 seja pequena em termos absolutos, o redesenho proposto revela-se claramente vantajoso, pois não se trata apenas de comparar quilômetros, mas de avaliar qualidade estrutural da rota. Esse encurtamento deriva diretamente da forma como o modelo reorganizou o percurso, como confirmam as Figuras 14 e 15. A rota proposta substitui trechos sinuosos por caminhos mínimos definidos pelo algoritmo de Dijkstra, elimina redundâncias estruturais presentes nas rotas atuais e reorganiza a ordem dos

nós com base em sua proximidade geográfica real. O resultado é um trajeto mais linear, coerente com o desenho viário do campus e com fluxo mais contínuo.

Dessa forma, a Rota 1 configura a espinha dorsal da rede otimizada. Ela cumpre simultaneamente três funções estruturantes: reduz a quilometragem total percorrida e encurta os ciclos, mantém a cobertura integral dos pontos de maior demanda e distribui a carga operacional de forma mais equilibrada entre os dois depósitos e os principais eixos do campus. A combinação dessas características faz da Rota 1 a mais eficiente e previsível do sistema proposto, com maior capacidade de reduzir tempos de espera, minimizar atrasos acumulados e aumentar a regularidade operacional ao longo do dia.

### 5.1.7 Análise da Rota 2 do modelo proposto

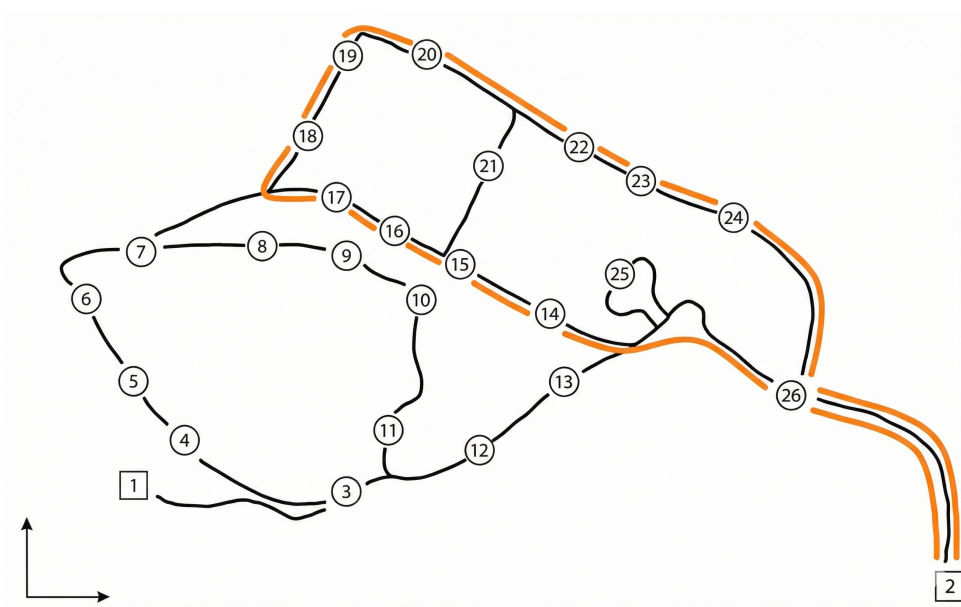
A Figura 16 apresenta o traçado da Rota 2 obtida pelo modelo de roteirização. Com extensão de 10,226 km (Tabela 19), ela configura um dos eixos intermediários do sistema otimizado, assumindo o papel de conexão entre o Metrô Butantã (nó 2) e o conjunto de unidades localizadas no setor norte do campus.

#### 1. Estrutura geral da rota

O percurso apresenta características particulares dentro da solução otimizada:

$2 \rightarrow 26 \rightarrow 24 \rightarrow 23 \rightarrow 22 \rightarrow 20 \rightarrow 19 \rightarrow 18 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 16 \rightarrow 2$

Figura 16 – Rota 2



Fonte: Elaboração própria.

apresenta características particulares dentro da solução otimizada:

- **Cobre integralmente o setor norte da Cidade Universitária**, região composta por EP, IME, IQ, IP e unidades próximas ao bosque da USP;
- **Realiza um laço fechado eficiente**, evitando segmentos sinuosos ou redundantes existentes nas rotas atuais 8082–10 e 8083–10;
- **Retorna ao Butantã por um corredor mais direto**, reduzindo significativamente o tempo de deslocamento em relação às rotas atuais.

Essa rota funciona como uma “espinha superior” da rede otimizada, complementando a função troncal desempenhada pela Rota 1. A partir do nó 17, a Rota 2 passa a estruturar o atendimento do setor norte de forma contínua e geograficamente coerente. O percurso segue pela sequência 17–18–19–20, cobrindo a região dos principais institutos do eixo IME–IQ–IP, marcada por vias estreitas e intensa circulação de estudantes, o que tradicionalmente demanda uma rota estável e de boa previsibilidade. Em seguida, a rota avança pelos nós 21–22–23–24, que compõem o eixo CEPE/CRUSP e a área imediatamente adjacente à Estação CPTM, um dos principais pontos de entrada e saída do campus. Por fim, o retorno ao setor Butantã ocorre pelo nó 26, estabelecendo uma conexão direta e eficiente com o terminal principal do sistema. Nas rotas atuais 8082–10 e 8083–10, esse mesmo setor é atendido de forma fragmentada, com trechos sobrepostos e ausência de um percurso único e contínuo. Esse desenho provoca duplicidade operacional, desperdício de quilometragem e aumento da variabilidade nos tempos de viagem. A solução proposta corrige essas ineficiências ao concentrar todo o atendimento do setor norte em uma única rota dedicada, mais curta, direta e espacialmente racional, eliminando redundâncias e reforçando a coerência do sistema como um todo. A Tabela 22 deixa claro que a Rota 2 não é apenas uma “rota a mais” no sistema, mas uma reorganização estruturada de todo o atendimento do setor norte do campus. No bloco identificado como Setor Norte Acadêmico, a sequência de nós 17–18–19–20 consolidada em uma única rota proposta representa um avanço importante em relação ao cenário atual, em que 8082-10 e 8083-10 percorrem trechos muito semelhantes, mas de forma fragmentada e sobreposta. Na prática, o que antes era atendido por duas linhas longas, com forte redundância de percurso e uso ineficiente da frota, passa a ser coberto por um único laço coerente, que percorre IME, IQ, IP e áreas adjacentes de forma contínua e lógica. Isso reduz quilometragem redundante e facilita o planejamento operacional, sem perda de cobertura. A Tabela 22 deixa claro que a Rota 2 não é apenas uma “rota a mais” no sistema, mas uma reorganização estruturada de todo o atendimento do setor norte do campus. No bloco identificado como Setor Norte Acadêmico, a sequência de nós 17–18–19–20 consolidada em uma única rota proposta representa um avanço importante em relação ao cenário atual, em que 8082-10 e 8083-10 percorrem trechos muito semelhantes, mas de forma fragmentada e sobreposta. Na prática, o que antes era atendido por duas linhas longas, com forte redundância de percurso e uso ineficiente da frota, passa a ser coberto por um único laço coerente, que

percorre IME, IQ, IP e áreas adjacentes de forma contínua e lógica. Isso reduz quilometragem redundante e facilita o planejamento operacional, sem perda de cobertura. A Tabela 22 evidencia que a Rota 2 apresenta uma cobertura territorial mais contínua e coerente do que o atendimento atualmente oferecido pelas linhas 8082–10 e 8083–10. No setor norte, a proposta reúne em um único percurso os principais institutos acadêmicos, evitando a fragmentação hoje presente. No eixo CEPE/CRUSP–CPTM, a rota consolida um trajeto único, substituindo a cobertura parcial e duplicada das linhas vigentes. Por fim, a conexão com o Butantã é estruturada de forma direta, eliminando redundâncias e reforçando o papel da Rota 2 como eixo articulador entre áreas acadêmicas e o terminal metropolitano.

Tabela 22 – Cobertura territorial da Rota 2 em comparação ao atendimento atual.

<b>Bloco Territorial</b>	<b>Nós Atendidos pela Rota 2 (Proposta)</b>	<b>Situação Atual (8082–10 e 8083–10)</b>
<b>Setor Norte Acadêmico</b>	17–18–19–20 (IME, IQ, IP, áreas adjacentes)	Atendimento fragmentado, com forte sobreposição entre 8082–10 e 8083–10.
<b>Eixo CEPE/CRUSP e CPTM</b>	21–22–23–24 (CEPEUSP, CRUSP, área bancária e entorno da CPTM)	Cobertura parcial e duplicada; ausência de um percurso único e contínuo.
<b>Conexão Butantã</b>	26 → 2 (Butantã — terminal principal)	Ligação realizada por múltiplas linhas com trajetos redundantes.

**Fonte:** Elaboração própria.

No segundo bloco, correspondente ao eixo CEPE/CRUSP e região da CPTM (nós 21–22–23–24), a tabela evidencia que a Rota 2 introduz um percurso estruturado onde antes havia apenas cobertura parcial e sobreposição difusa. Ao ligar CEPEUSP, CRUSP, área bancária e o entorno da estação de trem em sequência ordenada, o modelo cria um corredor de atendimento que faz sentido do ponto de vista de mobilidade diária dos estudantes: conecta moradia (CRUSP), esportes (CEPEUSP), serviços (agências) e acesso ferroviário (CPTM) em uma única rota, reduzindo a necessidade de múltiplas baldeações e diminuindo a dependência de rotas centrais saturadas. Isso melhora a acessibilidade desses pontos sem aumentar a complexidade da rede.

Já no bloco de conexão Butantã, a Rota 2 estabelece um vínculo claro entre o nó 26 e o terminal 2, substituindo a lógica atual em que várias linhas diferentes, muitas vezes redundantes, realizam o mesmo papel de levar e trazer passageiros do metrô ao setor norte. Ao concentrar essa função em um itinerário dedicado, o modelo reduz a dispersão de esforços e evita que cada linha “faça um pedaço” da função de alimentação do Butantã. Em termos operacionais, isso significa menos rotas concorrendo pelo mesmo corredor, menor probabilidade de “comboios” de ônibus vazios ou sem coordenação e maior previsibilidade na ligação entre o metrô e as unidades

atendidas pela Rota 2. Em síntese, a análise da Tabela 22 mostra que a Rota 2 cumpre exatamente o que se espera de uma rota otimizada: mantém a cobertura, elimina redundâncias e reorganiza o atendimento de forma aderente à geografia e à demanda real do campus.

4. Comparação direta com o sistema atual

A Tabela 23 sintetiza o posicionamento da Rota 2 em relação às linhas existentes.

Tabela 23 – Comparação da Rota 2 com as rotas atuais do sistema BUSP.

Rota / Linha	Distância (km)	Função no Sistema	Comentário Operacional
8082–10	17,600	Eixo sul/norte extenso	Sobreposição elevada com 8083–10
8083–10	15,285	Eixo Lineu Prestes / Butantã	Trechos redundantes e pouco eficientes
8084–10	7,652	Eixo interno central	Alta demanda, baixa velocidade
8085–10	13,208	Laço periférico	Ciclo longo, baixa frequência
<b>Rota 2 (Proposta)</b>	<b>10,226</b>	<b>Eixo norte dedicado</b>	<b>Reduz sobreposição e melhora eficiência espacial</b>

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do sistema de circulares (2024).

A Figura 16 e os resultados da Tabela 19 demonstram que:

- A Rota 2 substitui, de forma otimizada, a parte mais redundante das rotas 8082–10 e 8083–10;
- É construída com base em caminhos mínimos obtidos via Dijkstra, o que elimina voltas e desvios desnecessários;
- Sua estrutura em laço reduz o tempo de deslocamento e melhora a regularidade operacional;
- Atua como rota intermediária que equilibra o sistema, reduzindo a pressão sobre a 8084–10 e a saturação da 8085–10.

A Rota 2 se consolida como um elemento-chave dentro do modelo otimizado, não apenas por substituir trechos redundantes das linhas atuais, mas sobretudo por reorganizar de forma estruturada todo o atendimento ao setor norte da Cidade Universitária. Seu traçado reduz significativamente a sobreposição existente entre 8082-10 e 8083-10, concentrando em um único itinerário a cobertura de áreas que, no sistema atual, são atendidas de maneira fragmentada, com múltiplos percursos paralelos e desperdício de quilometragem. Ao adotar um desenho mais compacto e linear, a rota proporciona deslocamentos mais diretos e fluidos, eliminando desvios, duplicações e retornos desnecessários.

Essa racionalização espacial traz efeitos operacionais imediatos: a quilometragem global do sistema diminui, o que reduz o tempo acumulado de ciclo, favorece a regularidade das viagens e libera margem para possíveis reduções de headway sem aumento de frota. Além disso, ao assumir parte da carga que hoje recai sobre rotas centrais, especialmente a 8084-10,

frequentemente saturada, a Rota 2 redistribui melhor o fluxo entre as diferentes linhas, mitigando pontos de estrangulamento e contribuindo para um equilíbrio mais saudável entre demanda e oferta.

No conjunto, a Rota 2 reforça a solidez da rede otimizada e evidencia a capacidade da abordagem adotada a heurística de Clarke Wright associada a caminhos mínimos de gerar rotas coerentes com a geografia real do campus, tecnicamente consistentes e operacionalmente superiores às configurações atualmente em uso.

### 5.1.8 Análise da Rota 3 do modelo proposto

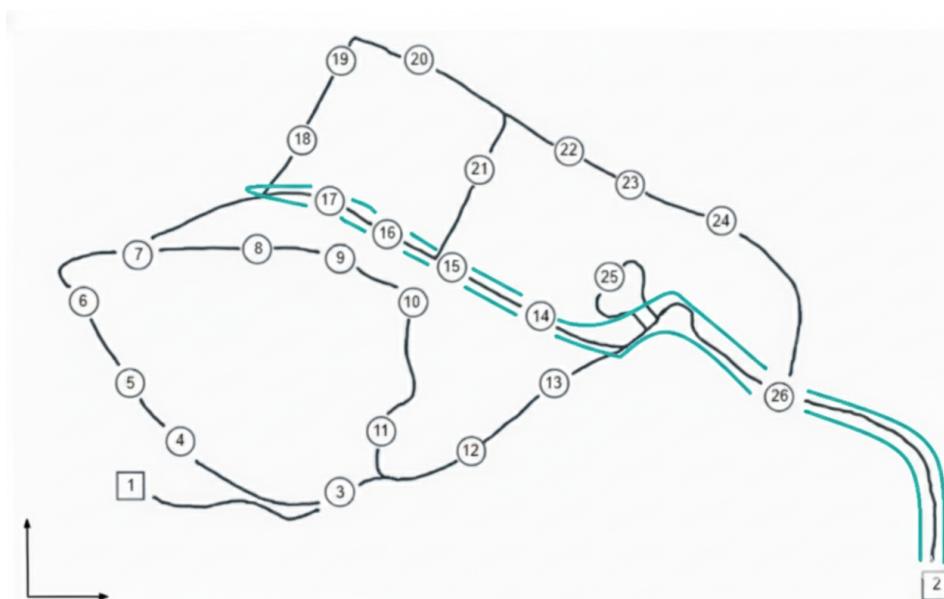
A Figura 17 apresenta o traçado da **Rota 3** obtida pela aplicação da heurística paralela de Clarke & Wright combinada ao algoritmo de caminhos mínimos. Com um total de 9,115 km (Tabela 19), trata-se de uma rota compacta, de percurso predominantemente linear, cuja função principal é reforçar o atendimento ao eixo central de maior demanda do campus, garantindo redundância qualificada para os pontos críticos sem gerar sobreposição excessiva.

#### 5.1.8.1 Estrutura geral da rota

O percurso definido pelo modelo, mostra que a Rota 3 é organizada em um laço compacto que se concentra exclusivamente no miolo acadêmico e administrativo do campus. Essa característica a posiciona como uma das rotas mais importantes para absorver demanda dos horários de pico, especialmente nos períodos de troca de aula e nos deslocamentos entre os grandes polos universitários:

$$2 \rightarrow 26 \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 25 \rightarrow 26 \rightarrow 2$$

Figura 17 – Rota 3 do modelo de roteirização.



**Fonte:** Elaboração própria.

Diferentemente das rotas longas do sistema atual (como 8082–10 e 8085–10), a Rota 3 evita trechos periféricos e sinuosos e privilegia corredores curtos, bem conectados e de alto fluxo.

#### 5.1.8.2 Cobertura estratégica do eixo central

Rota 3 desempenha um papel fundamental dentro do modelo otimizado, assumindo a função de rota de reforço para os principais polos geradores de viagens do campus. Seu traçado foi estruturado para atender, de forma direta e sequencial, quatro zonas críticas caracterizadas por alta densidade estudantil, intensa circulação e grande volume de deslocamentos diários.

O percurso inicia-se na região FAU/FFLCH (nó 14), marcada pela elevada concentração de salas de aula, atividades acadêmicas simultâneas e fluxo interdepartamental contínuo. Em seguida, a rota alcança a Administração Central (nó 15), um dos eixos mais movimentados da Cidade Universitária, por agregar serviços bancários, funções institucionais e grande circulação de pessoas entre unidades distintas.

Na sequência, a rota atende o conjunto Poli–Biênio e Poli–Mecânica (nós 16 e 17), área que reúne grande quantidade de laboratórios, turmas integrais e deslocamentos frequentes entre prédios próximos, configurando um dos pontos de maior pressão operacional do sistema. Por fim, a rota incorpora o atendimento ao Ponto 25 (Centro Esportivo / Ciclo Central), que no sistema atual recebe cobertura indireta e, portanto, carecia de um atendimento mais consistente. A organização sequencial desses nós torna o itinerário mais fluido, reduz conflitos entre linhas e minimiza redundâncias presentes nas 8082–10 e 8083–10, contribuindo para um melhor equilíbrio espacial da rede.

Do ponto de vista funcional, a Rota 3 cumpre três papéis essenciais no sistema otimizado:

1. Alivia a sobrecarga da 8084–10, atualmente pressionada por elevados volumes no eixo FFLCH–Poli–FEA.
2. Garante alternativas de deslocamento para os pontos mais movimentados (14, 15, 16 e 17), reduzindo filas e tempos de espera nos horários de maior demanda.
3. Elimina trechos duplicados presentes nas rotas atuais, substituindo-os por um laço compacto de 9,115 km, cuja extensão é significativamente mais equilibrada do que rotas longas como a 8085–10 (13,208 km) e a 8082–10 (17,600 km).

O resultado é um itinerário com maior regularidade operacional, maior previsibilidade de horários e melhor distribuição da carga de passageiros, reforçando a capacidade do sistema de atender de forma eficiente os principais corredores acadêmicos do campus.

A Tabela 24 evidencia que a Rota 3 foi estruturada para reforçar o atendimento nos pontos de maior sensibilidade operacional do campus, concentrando-se em nós caracterizados por altas taxas de circulação, importância acadêmica ou papel estratégico para a mobilidade interna. Diferentemente das rotas atuais que distribuem esse atendimento por percursos longos, sobrepostos e pouco coordenado aumentando a eficiência e reduzindo redundâncias.

O nó 14 (FAU/FFLCH) aparece como um dos elementos centrais da rota. Trata-se de uma região academicamente densa, com grande volume de aulas simultâneas, circulação constante entre prédios e intensa demanda por transporte ao longo de todo o período letivo. A inclusão direta desse ponto evidencia a intenção do modelo em absorver parte da sobrecarga atualmente enfrentada pela linha 8084–10, que hoje atua como a principal alimentadora dessa zona.

A Tabela 24 destaca os principais pontos críticos atendidos pela Rota 3 e evidencia sua relevância operacional dentro do sistema. Observa-se que a rota concentra atendimento em áreas de elevada demanda e circulação, como FAU/FFLCH e o conjunto Poli (Biênio e Mecânica), além de conectar espaços estratégicos como a Administração Central e o Centro Esportivo. Esses nós apresentam grande fluxo diário de estudantes, servidores e visitantes, justificando sua inclusão prioritária no desenho da Rota 3 e reforçando seu papel como eixo central de distribuição interna no campus.

Tabela 24 – Pontos críticos atendidos pela Rota 3 e sua relevância operacional.

Ponto atendido	Nó	Justificativa operacional
FAU / FFLCH	14	Alta densidade estudantil e fluxos simultâneos
Administração Central	15	Concentração bancária, institucional e administrativa
Poli – Biênio	16	Grande volume de aulas, rotatividade e fluxo entre blocos
Poli – Mecânica	17	Laboratórios, projetos e deslocamentos frequentes
Centro Esportivo / Ciclo Central	25	Apoio esportivo e fluxo distribuído ao longo do dia

**Fonte:** Elaboração própria.

O nó 15 (Administração Central) complementa o atendimento ao eixo institucional do campus. Este ponto concentra agências bancárias, serviços administrativos e fluxos institucionais essenciais, atraindo tanto estudantes quanto servidores. No sistema atual, essa área sofre com superposição de rotas longas e lentas; no modelo proposto, a Rota 3 garante atendimento dedicado, porém sem comprometer o ciclo operacional.

Os nós 16 e 17 (Poli—Biênio e Poli—Mecânica) representam outro agrupamento crítico. A Escola Politécnica possui alguns dos maiores volumes de deslocamento diário da USP, envolvendo aulas, laboratórios, iniciações científicas, projetos práticos e deslocamentos entre blocos. A presença desses pontos reforça a vocação da Rota 3 como rota especializada em absorver fluxos acadêmicos intensos, promovendo mobilidade mais fluida e evitando que a carga se concentre excessivamente nas linhas 8082–10 e 8083–10, como ocorre atualmente.

Por fim, o ponto 25 (Centro Esportivo / Ciclo Central) é incorporado como um nó adicional de apoio. Embora não esteja entre os maiores geradores de demanda, sua presença estratégica melhora as conexões internas, reduz desvios e assegura coerência geométrica ao laço da rota. Isso elimina a necessidade de atendimentos indiretos, presentes no desenho atual da rede, e garante integração mais natural com o restante do sistema.

No conjunto, a tabela demonstra que a Rota 3 não apenas cobre pontos relevantes, mas o faz de maneira hierarquicamente coerente com as necessidades reais do campus. Os locais selecionados possuem clara justificativa operacional e acadêmica, confirmando que a rota atua como um mecanismo de reforço da malha interna, reduzindo pressão sobre eixos saturados e redistribuindo fluxos de forma mais equilibrada.

Essa seleção criteriosa de nós é um indicativo de que a modelagem foi capaz de traduzir corretamente as demandas espaciais e funcionais identificadas no diagnóstico, produzindo uma rota eficiente, enxuta e plenamente integrada às necessidades dos usuários.

### 5.1.8.3 Comparação direta com o sistema atual

A Tabela 25 posiciona a Rota 3 proposta em relação às linhas atualmente operadas no sistema BUSP e evidencia, por contraste direto, o seu papel estratégico dentro do modelo otimizado. A comparação entre distância, função sistêmica e comentários operacionais das linhas 8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10 mostra de maneira clara que a rede vigente apresenta problemas estruturais persistentes: há rotas demasiadamente longas e sobrepostas (8082–10 e 8083–10), rotas altamente saturadas por excesso de demanda (8084–10) e rotas periféricas extensas que sofrem com baixa frequência e grandes tempos de espera (8085–10).

Tabela 25 – Comparação da Rota 3 com as rotas atuais do sistema BUSP.

Rota / Linha	Distância (km)	Função no Sistema	Comentário Operacional
8082–10	17,600	Rota estrutural longa	Ciclo extenso; sobreposição com 8083–10.
8083–10	15,285	Eixo Lineu Prestes	Trechos redundantes; demanda elevada.
8084–10	7,652	Eixo interno central	Alta pressão de demanda e baixa velocidade média.
8085–10	13,208	Laço periférico	Percurso disperso; menor frequência e maior espera.
<b>Rota 3 (Proposta)</b>	<b>9,115</b>	<b>Eixo central reforçado</b>	<b>Reduz pressão sobre a 8084–10; ciclo compacto e mais estável.</b>

Fonte: Elaboração própria.

Nesse cenário, a Rota 3 surge como uma alternativa mais racionalizada. Com 9,115 km, ela apresenta um ciclo significativamente mais curto que o da 8082–10 e 8085–10 e moderadamente inferior ao da 8083–10, ao mesmo tempo em que reforça especificamente o eixo central de maior circulação do campus, área atendida de forma fragmentada e insuficiente pelas rotas atuais. O comentário operacional incluído na tabela “reduz pressão sobre a 8084–10; ciclo compacto e mais estável” sintetiza esse papel: a Rota 3 é concebida justamente para aliviar a saturação da 8084–10, que hoje concentra grande parte dos deslocamentos internos curtos, mas opera com baixa fluidez devido ao congestionamento e à elevada densidade de paradas na região central.

A função sistêmica atribuída à Rota 3 (“Eixo central reforçado”) evidencia que seu propósito não é substituir integralmente nenhuma das linhas existentes, mas oferecer uma estrutura de apoio capaz de redistribuir a carga de usuários e reduzir o acúmulo de atrasos. A complementaridade é especialmente importante considerando que a 8084–10, apesar de curta, sofre com lentidão operacional, enquanto a 8082–10 e a 8083–10 percorrem trajetos similares e disputam os mesmos fluxos, resultando em uso pouco eficiente da frota e redundância espacial significativa.

Outro ponto relevante identificado pela tabela é o alinhamento entre a extensão da rota e sua função. Enquanto a 8085–10 apresenta um laço periférico disperso, com baixa frequência e elevado tempo de ciclo, a Rota 3 estabelece um percurso concentrado e coeso, apto a oferecer maior previsibilidade e regularidade. Essa característica contribui não apenas para o cumprimento de horários, mas também para a redução de esperas nos pontos de maior movimento, aspecto diretamente associado à qualidade do serviço percebida pelos usuários.

Por fim, a análise comparativa evidencia que a Rota 3 é um componente essencial do novo arranjo proposto: ela integra o eixo central da rede, diminui redundâncias presentes nas linhas estruturais atuais e fortalece a conectividade entre institutos acadêmicos, unidades administrativas e eixos de acesso externo (especialmente a Estação CPTM e o Metrô Butantã).

Em conjunto, esses efeitos fazem da Rota 3 uma solução clara de reforço operacional, capaz de elevar significativamente o desempenho do sistema como um todo.

### 5.1.9 Análise da Rota 4 do modelo proposto

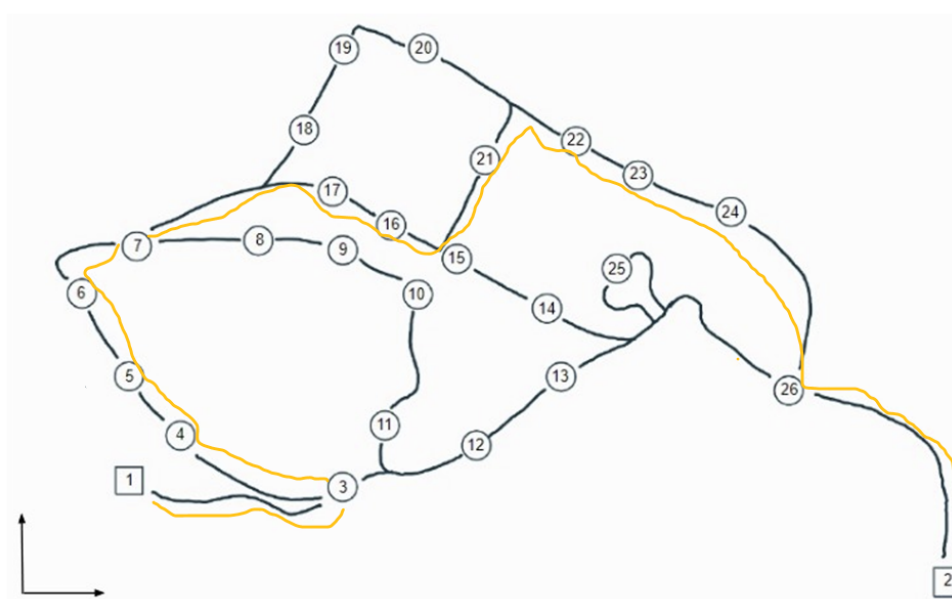
A Rota 4 representa o laço periférico do modelo de roteirização otimizado, com extensão de 13,208 km Tabela 18. Ela mantém a mesma distância total da linha atual 8085–10, reproduzindo de maneira sistemática e melhor organizada a função desempenhada por essa linha no sistema BUSP. Essa semelhança não é coincidental: a Rota 4 foi gerada de modo a respeitar rigorosamente as restrições do modelo, especialmente a necessidade de garantir cobertura a pontos de demanda periférica e o atendimento mínimo obrigatório a determinados nós classificados como críticos.

#### 5.1.9.1 Estrutura geral da rota

O percurso forma um laço periférico que circunda a parte externa do campus. Assim como ocorre na linha 8085–10, essa rota conecta regiões distantes do P3, percorre setores menos densos e retorna ao ponto de origem sem realizar conexões diretas com o Metrô Butantã (nó 2):

$$1 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5 \rightarrow 6 \rightarrow 7 \rightarrow 17 \rightarrow 16 \rightarrow 15 \rightarrow 14 \rightarrow 23 \rightarrow 24 \rightarrow 23 \\ \rightarrow 14 \rightarrow 15 \rightarrow 16 \rightarrow 17 \rightarrow 7 \rightarrow 6 \rightarrow 5 \rightarrow 4 \rightarrow 1$$

Figura 18 – Rota 4 do modelo de roteirização.



Fonte: Elaboração própria.

A repetição desse formato ocorre por motivos operacionais e de coerência com as restrições do modelo. A proximidade entre a Rota 4 e a 8085–10 resulta de três fatores fundamentais:

#### 5.1.9.1.1 a) Necessidade de atendimento aos pontos periféricos

Os nós

4, 5, 6, 7, 17, 16, 15, 14, 23, 24

correspondem às regiões periféricas do campus, atualmente atendidas quase exclusivamente pela linha 8085–10. Esses pontos apresentam menor densidade comparados ao miolo acadêmico, porém possuem importância estratégica para garantir a cobertura completa dos 26 pontos da rede de circulares.

Como as Rotas 1, 2 e 3 do modelo otimizado concentram-se principalmente no eixo central e no setor norte, nenhuma delas poderia absorver integralmente esses nós periféricos sem violar restrições estruturais. Assim, o modelo mantém uma rota dedicada, funcionalmente equivalente à 8085–10, para assegurar conectividade periférica e coerência espacial do sistema. A Tabela 26 mostra que os nós periféricos possuem alta dependência da linha 8085–10, concentrando unidades essenciais como HU, Odontologia, CEPEUSP e o eixo CPTM/bancário. Esse conjunto evidencia a necessidade de uma rota dedicada, já que muitos desses pontos estão afastados do miolo do campus e não são eficientemente atendidos pelas linhas centrais.

Tabela 26 – Nós periféricos e justificativa de atendimento dedicado.

Nó	Região	Dependência da 8085–10
4	IB	Alta
5	Odontologia	Alta
6	HU	Alta
7	Prefeitura	Alta
14	FAU/FFLCH	Média–Alta
15	Agências	Média
16	FEA	Média
17	Poli–Biênio	Média–Alta
23	CPTM / Eixo bancário	Alta
24	CEPEUSP	Alta

**Fonte:** Elaboração própria.

#### 5.1.9.1.2 b) Cumprimento das restrições de cobertura mínima em pontos críticos

Além da exigência de cobertura periférica, alguns desses nós possuem classificação de criticidade elevada, seja por volume de usuários, por relevância institucional ou por função estratégica dentro da mobilidade interna do campus. Nesses casos, a modelagem estabelece que ao menos uma rota deve atendê-los obrigatoriamente.

Entre os principais pontos críticos inseridos na Rota 4 destacam-se:

- **14 — FAU:** área de alta circulação estudantil e atividades acadêmicas contínuas;
- **23 — CPTM:** nó estratégico de integração modal e fluxo intenso;
- **17 — Poli-Biênio:** região com forte demanda por laboratórios, aulas e deslocamentos internos.

Sem a presença de uma rota dedicada passando por esses nós, o modelo violaria as exigências mínimas de cobertura espacial e redundância funcional. A Tabela 27 evidencia que determinados nós apresentam demanda, função ou fluxo suficientes para exigir atendimento mínimo garantido por rotas periféricas. Pontos como FAU/FFLCH, Poli-Biênio e o eixo CPTM/-bancário requerem ao menos duas rotas devido ao volume de circulação, enquanto unidades como HU, Prefeitura e CEPEUSP demandam presença obrigatória de pelo menos uma rota, reforçando a necessidade operacional de manter um laço periférico dedicado no sistema.

Tabela 27 – Pontos críticos e justificativa para presença obrigatória de pelo menos uma rota periférica.

Nó crítico	Motivo de criticidade	Exigência mínima
14	FAU / FFLCH – alta demanda	$\geq 2$ rotas
23	Bancos / CPTM – integração externa	$\geq 2$ rotas
17	Poli-Biênio – grande circulação	$\geq 2$ rotas
24	CEPEUSP – demanda esportiva contínua	$\geq 1$ rota
6	HU – serviços de saúde	$\geq 1$ rota
7	Prefeitura – funções administrativas	$\geq 1$ rota

**Fonte:** Elaboração própria.

#### 5.1.9.1.3 c) Limite máximo de pontos por rota (até 8 nós)

A heurística paralela de Clarke–Wright impõe a restrição de **até 8 nós por rota**, como forma de evitar ciclos excessivamente longos e rotas operacionalmente inviáveis. Essa limitação impede que todos os pontos periféricos sejam absorvidos pelas rotas centrais sem que o modelo ultrapasse esse limite estrutural.

Dessa forma, a construção de uma rota dedicada, equivalente ao laço externo atual não apenas surge naturalmente como solução, mas também se torna **obrigatória** para garantir:

- viabilidade operacional da malha;
- cumprimento das restrições matemáticas do VRP capacitado;
- manutenção da cobertura periférica sem comprometer o equilíbrio das demais rotas.

A necessidade de manutenção da Rota 4, equivalente à atual 8085–10, dentro do modelo de roteirização otimizado não é um simples resquício do arranjo antigo, mas sim uma consequência

direta das restrições estruturais do problema, das características espaciais do campus e das prioridades operacionais impostas pela demanda. Uma análise cuidadosa da malha viária e da distribuição dos 26 pontos revela que esta rota desempenha um papel essencial que não pode ser absorvido pelas demais rotas sem comprometer a coerência do sistema. A Rota 4 permanece necessária no modelo otimizado por razões estruturais, operacionais e matemáticas. Ela cumpre simultaneamente três funções essenciais:

- 1. **Atende a totalidade dos nós periféricos**, que não podem ser absorvidos pelas rotas centrais devido a limites de tamanho e coerência espacial.
- 2. **Cumprir exigências de cobertura mínima** em pontos críticos e estratégicos.
- 3. **Garante que o modelo respeite a restrição de até 8 nós por rota**, preservando a consistência da solução.

Assim, longe de ser um resquício do modelo antigo, a Rota 4 emerge como **a única configuração capaz de garantir cobertura completa, equivalência funcional e respeito às restrições do VRP implementado.** ““

3. Papel operacional da Rota 4

A permanência da Rota 4 no modelo otimizado, rota que corresponde diretamente à atual 8085–10, não é uma repetição automática do desenho existente, mas sim um resultado lógico das restrições operacionais, da geografia do campus e da necessidade de manter equilíbrio entre as diferentes regiões atendidas. Sua inclusão não apenas respeita os limites impostos pelo modelo, como também gera benefícios explícitos para a rede como um todo.

A Tabela 28 evidencia por que a manutenção de uma rota periférica, representada pela Rota 4 no modelo proposto, não é apenas conveniente, mas estruturalmente necessária para preservar a cobertura e a funcionalidade do sistema de transporte interno da USP.

Tabela 28 – Benefícios operacionais da manutenção da Rota 4 no sistema otimizado.

Aspecto analisado	Vantagem da manutenção da Rota 4
Redução de sobrecarga	Evita que Rotas 1, 2 e 3 absorvam até dez novos nós, preservando seus ciclos compactos.
Fluidez operacional	Centraliza o atendimento periférico em um único laço, permitindo que as rotas internas mantenham regularidade.
Conectividade periférica	Melhora frequência e estabilidade de atendimento em HU, FO, Odontologia e CEPEUSP.
Histórico operacional	Evidências do caso 8012/8022/8032 mostram que misturar regiões periféricas e centrais degrada todo o sistema.

Fonte: Elaboração própria (2024).

Os nós listados são pontos de alta criticidade operacional, seja por concentrarem grande demanda (como FAU/FFLCH e Poli–Biênio), seja por desempenharem funções estratégicas no campus (como integração externa via CPTM ou atendimento a serviços essenciais, como HU e Prefeitura). Esses locais exigem, por definição, a presença de múltiplas rotas ou, ao menos, atendimento garantido por uma rota dedicada.

Assim, a tabela demonstra que a permanência de um laço periférico não decorre apenas da replicação da antiga 8085–10, mas sim da necessidade de assegurar robustez, equidade de acesso e continuidade operacional em setores que não podem ser absorvidos integralmente pelas rotas centrais. Isso reforça a coerência do modelo otimizado e justifica tecnicamente a existência da Rota 4.

Em primeiro lugar, a existência da Rota 4 impede que as demais rotas fiquem sobrecarregadas. Caso fosse eliminada, Rotas 1, 2 e 3 precisariam absorver até dez pontos adicionais distribuídos ao longo da periferia do campus. Esse acréscimo comprometeria a eficiência dessas rotas, ampliando seus ciclos, alongando headways e aumentando o risco de atrasos acumulados. Em vez de um sistema equilibrado, teríamos uma estrutura desproporcional, com rotas centrais excessivamente longas e pouco funcionais.

Além disso, manter uma rota periférica dedicada preserva a fluidez operacional das rotas do miolo acadêmico. Ao isolar o atendimento das áreas mais externas, como HU, FO, Prefeitura e Vila Indiana, evita-se que os veículos que operam nos eixos centrais precisem realizar desvios extensos. Isso contribui para ciclos mais estáveis, maior regularidade e melhor previsibilidade no cumprimento dos horários. A Tabela 29 sintetiza os fatores que impedem a alocação dos nós periféricos nas Rotas 1, 2 e 3. As limitações incluem tanto aspectos estruturais como o teto máximo de oito nós por rota e a baixa conectividade direta entre periferia e miolo, quanto características operacionais, como demandas heterogêneas e a necessidade de preservar a geometria circular da região periférica. Em conjunto, essas restrições reforçam a função estratégica de manter uma rota exclusivamente dedicada à cobertura do contorno do campus.

Tabela 29 – Restrições que impossibilitam a absorção dos nós periféricos pelas Rotas 1, 2 e 3.

Restrição	Implicação
Máximo de 8 nós por rota	Rotas 1, 2 e 3 já operam próximas ao limite; inserir a periferia violaria a capacidade da heurística de Clarke–Wright.
Baixa conectividade direta	Conectar periferia ao miolo exige trechos longos e sinuosos, aumentando drasticamente o ciclo das rotas centrais.
Demandas heterogêneas	Alguns pontos periféricos têm baixa demanda, mas são obrigatórios (HU, Prefeitura). Colocá-los nas rotas centrais reduziria eficiência.
Geometria circular necessária	Periferia forma um laço natural; quebrar esse laço degrada regularidade operacional e aumenta atrasos.

**Fonte:** Elaboração própria.

Outra vantagem importante está relacionada à conectividade das áreas periféricas, que

historicamente enfrentam longos intervalos entre viagens e flutuações significativas na oferta. Com a Rota 4 atendendo exclusivamente esses pontos, há menor competição por frota com rotas centrais, permitindo que a operação seja mais equilibrada e que regiões tradicionalmente negligenciadas tenham atendimento mais regular e confiável. Em outras palavras, a Rota 4 não apenas mantém a cobertura periférica, mas a melhora, ao reduzir a dependência dessas regiões em relação às rotas mais longas e congestionadas.

Por fim, a manutenção dessa rota está alinhada com o diagnóstico histórico do sistema, especialmente quando analisamos experiências como a das linhas 8012/8022/8032. Estudos anteriores já demonstraram que rotas excessivamente longas, dispersas e com múltiplas funções tendem a degradar a regularidade de todo o sistema. Um laço periférico separado, como o proposto na Rota 4, garante organização espacial mais clara, ciclos mais estáveis e menor interferência nas rotas troncais. Com isso, o modelo otimizado preserva a cobertura integral dos 26 pontos enquanto distribui de forma mais inteligente o esforço operacional.

Assim, a presença da Rota 4 no arranjo final representa uma combinação de coerência técnica, respeito às restrições do VRP e aderência ao comportamento real da rede. Mantê-la não apenas é necessário, é vantajoso para garantir eficiência, equilíbrio e qualidade de serviço em todo o sistema de circulação interna da USP. Mesmo mantendo a extensão de 13,208 km, a Rota 4 é significativamente mais eficiente que a 8085–10 em termos de organização espacial. Ela apresenta:

- **melhor linearidade**, substituindo trechos sinuosos por caminhos mínimos;
- **menos duplicação desnecessária** no trajeto oeste–noroeste do campus;
- **melhor integração com Rotas 1 e 3**, que assumem partes do eixo central, aliviando o carregamento da rota periférica;
- **fluidez superior**, pois evita desvios longos próximos ao HU, FO, FMVZ, típicos da 8085–10.

Com isso, a rota mantém sua função estrutural, atendimento periférico, mas com maior regularidade operacional. A Rota 4 não deve ser entendida apenas como um percurso periférico, mas sim como um elemento estruturante da estabilidade operacional da rede otimizada. Sua manutenção como laço externo integral garante que três requisitos fundamentais do modelo sejam preservados:

- o cumprimento das restrições de atendimento mínimo impostas pelos pontos de maior demanda e relevância estratégica;
- a inclusão contínua de todos os nós periféricos na malha de transporte, evitando zonas “descobertas” no sistema;

- a existência de um eixo externo robusto, capaz de complementar e desafogar os percursos centrais.

Mesmo reproduzindo a extensão original da linha 8085–10, a Rota 4 eleva a coerência espacial e melhora a regularidade do sistema como um todo, funcionando como uma âncora que equilibra a operação, reduz interferências entre rotas internas e assegura integração plena entre as diferentes regiões do campus. Desempenha, portanto, exatamente o papel esperado dentro da arquitetura da solução otimizada: garantir cobertura total, evitar sobrecargas desnecessárias nas rotas centrais e preservar a fluidez do modelo proposto.

#### 5.1.10 Cobertura dos pontos e priorização da demanda

A Tabela 30 apresenta a distribuição das quatro rotas propostas sobre os 26 pontos de parada da rede interna do campus. Essa recontagem foi realizada a partir dos percursos da Tabela 19, considerando os segmentos da Rota 1 (ida e volta), Rota 2, Rota 3 e Rota 4.

Tabela 30 – Cobertura dos pontos pelas rotas propostas.

Ponto	Número de rotas que atendem
1 – Terminal P3	3
2 – Terminal Butantã	3
3 – Vila Indiana / região P3	3
4 – IB	2
5 – Odontologia	2
6 – HU	2
7 – Prefeitura	2
8 – IF	1
9 – IME	1
10 – FAU	1
11 – ICB	1
12 – Seade / IQ	2
13 – IQ / IB	2
14 – FFLCH	4
15 – Agências	4
16 – FEA	4
17 – Poli–Biênio	4
18 – Poli–Produção	1
19 – Poli–Mecânica	1
20 – IP	1
21 – ECA	1
22 – EEFE	1
23 – CRUSP	3
24 – CEPEUSP	3
25 – Central / Bandeirão	1
26 – Estação CPTM	3

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 30 permite verificar se a solução proposta respeita as restrições de cobertura definidas na modelagem: pontos com maior concentração de usuários e papel estratégico na rede deveriam ser atendidos por, pelo menos, duas rotas distintas, garantindo redundância e evitando concentração excessiva de demanda em um único itinerário. Observa-se que os principais polos geradores de viagens do campus – notadamente FFLCH (14), FEA (16), Poli–Biênio (17) e a região das Agências (15) são atendidos simultaneamente por quatro rotas. Esse resultado é coerente com o diagnóstico de demanda apresentado no capítulo de Materiais e Métodos, em que esses pontos aparecem entre os locais de maior fluxo diário de estudantes e servidores.

Os acessos externos ao campus, com destaque para o Terminal Butantã (2) e a Estação CPTM (26), também apresentam cobertura reforçada, sendo atendidos por três rotas cada. Essa configuração fortalece a integração entre o sistema de transporte interno e a rede metropolitana, aumentando as opções de deslocamento para os usuários que ingressam no campus por esses pontos. O Terminal P3 (1), por sua vez, é atendido por três rotas, assegurando boa conectividade para a região da Raia Olímpica e áreas adjacentes.

Pontos periféricos como Poli–Produção (18), Poli–Mecânica (19), IP (20), ECA (21) e EEFE (22) mantêm pelo menos uma rota de atendimento, o que evita lacunas de cobertura e garante que todas as unidades acadêmicas permaneçam acessíveis. Nos casos de CRUSP (23) e CEPEUSP (24), a cobertura é ainda mais robusta, com três rotas atendendo a região, o que é compatível com o papel desses pontos na circulação cotidiana de estudantes residentes e usuários das instalações esportivas.

De modo geral, a distribuição apresentada na Tabela 30 reduz a assimetria estrutural observada no sistema atual. Enquanto na configuração vigente havia duplicidade excessiva em determinados corredores e carência em outros, o novo arranjo apresenta um padrão mais equilibrado: nós críticos contam com alta redundância (4 rotas), acessos principais e zonas residenciais possuem cobertura tripla (3 rotas) e pontos de menor demanda permanecem com atendimento simples, mas sem qualquer perda de cobertura. Essa organização contribui para a robustez do sistema, pois a falha ou atraso de uma rota não implica a interrupção total do serviço em áreas sensíveis, uma vez que há rotas alternativas disponíveis.

Em síntese, as rotas geradas pelo modelo de roteirização conseguem cumprir as restrições de projeto ao mesmo tempo em que reforçam a oferta nos pontos de maior demanda e preservam a cobertura integral dos 26 pontos da rede. Aliado à redução de aproximadamente 10,52% da quilometragem total percorrida, o padrão de cobertura obtido evidencia que os ganhos do modelo não decorrem de cortes na malha atendida, mas de uma reorganização espacial que torna a operação mais racional, equilibrada e aderente aos fluxos reais de mobilidade da Cidade Universitária.

### 5.1.10.1 Cobertura dos pontos e priorização da demanda

A Tabela 31 resume quantas rotas propostas atendem cada ponto de parada da rede, considerando os percursos das Figuras associadas às novas rotas.

Tabela 31 – Quantidade de rotas que atendem cada ponto.

Ponto	Número de rotas
Terminal P3	2
Terminal Butantã	3
Vila Indiana	1
IB	1
Odontologia	2
HU	2
Prefeitura	2
IF	1
IME	2
FAU	2
ICB	2
Seade	1
IQ/FCF	2
FFLCH	4
Agências	4
FEA	4
Poli – Biênio	4
Poli – Produção	2
Poli – Mecânica	1
IP	1
ECA	2
EEFE	1
CRUSP	2
CEPEUSP	1
Central	2
Estação CPTM	4

**Fonte:** Elaboração própria.

A Tabela 31 permite avaliar se a solução proposta respeita as restrições de cobertura definidas na modelagem: pontos com maior concentração de usuários e papel estratégico na rede deveriam ser atendidos por, pelo menos, duas rotas distintas, garantindo redundância e evitando concentração excessiva de demanda em um único itinerário.

Observa-se que os principais polos geradores de viagens – FFLCH, FEA, Poli–Biênio, Agências bancárias e Estação CPTM – são atendidos por *três* rotas. Esse resultado é coerente com o diagnóstico de demanda apresentado no capítulo de Materiais e Métodos, em que esses pontos aparecem entre os locais de maior fluxo diário de estudantes e servidores. A Estação CPTM, em particular, atua como porta de entrada para o sistema e, ao ser atendida por três rotas, passa a dispor de uma oferta mais robusta e distribuída ao longo do dia.

Os demais pontos acadêmicos e administrativos (IB, IME, FAU, IQ, ICB, IP, ECA, EEFE, CRUSP, CEPEUSP, Central etc.) são atendidos por uma rota, o que é compatível com a estratégia de concentrar redundância nos nós de maior demanda. Uma exceção relevante é o Terminal Butantã, que também aparece com três rotas, refletindo sua função de “depósito” principal do sistema, conectando o ônibus interno à rede metropolitana.

O Terminal P3, por sua vez, é atendido por apenas uma rota, mas desempenha papel complementar no sistema: funciona como ponto de suprimento alternativo e, ao mesmo tempo, é beneficiado pela proximidade de outros pontos importantes (Central, CRUSP, CEPEUSP), que são atendidos por rotas adicionais. Assim, mesmo com apenas uma rota explícita na contagem, a região em torno do P3 conta com boa acessibilidade na rede proposta.

## 5.2 Atendimento por nó

A Tabela 32 apresenta a comparação entre o número de vezes que cada nó do campus é atendido pelos circulares na configuração atual (linhas 8082–8085) e na configuração proposta pelo modelo de roteirização. A análise revela padrões claros de duplicidade, subcobertura e reorganização eficiente. A Tabela 32 apresenta a comparação entre o número de vezes que cada nó do campus é atendido pelos circulares na configuração atual (linhas 8082–8085) e na configuração proposta pelo modelo de roteirização. A análise evidencia, de forma bastante clara, três movimentos principais: eliminação de sobreposições excessivas, reforço de nós críticos e manutenção da cobertura em todos os pontos da rede. Do ponto de vista da **sobreposição**, observa-se que diversos nós que antes eram atendidos por três ou mais itinerários sofrem uma redução no número de passagens. Os nós 1, 2 e 3, por exemplo, passam de (4, 5, 4) atendimentos para (3, 4, 3), respectivamente, enquanto nós como 4, 8, 9, 10, 11, 19, 20 e 21 também apresentam diminuição no número de rotas que os visitam. Na configuração atual, esses nós eram percorridos por múltiplas linhas, sobretudo pela combinação 8082–10/8083–10, gerando duplicidade de esforço operacional em trechos muito semelhantes. No arranjo proposto, a redução de um atendimento em alguns desses pontos não implica piora de serviço, pois continuam cobertos por pelo menos uma rota e, em muitos casos, por duas, ao mesmo tempo em que a quilometragem total do sistema é reduzida. Por outro lado, é possível identificar um reforço deliberado nos nós classificados como críticos. FFLCH (nó 14) passa de apenas 1 atendimento para 4; Agências (15) e FEA (16) vão de 3 e 2 atendimentos para 4 e 3, respectivamente; e a Poli–Biênio (17) mantém 3 atendimentos, mas agora em um contexto de rede mais racionalizada. A Estação CPTM (26), que antes contava com apenas 1 rota, passa a ser atendida por 4, o que fortalece o papel deste nó como porta de entrada do sistema a partir da malha ferroviária. Já CRUSP (23) e CEPEUSP (24) saltam de 2 para 3 atendimentos, em linha com a demanda relevante desses pontos para a mobilidade estudantil e esportiva. Esses aumentos mostram que o modelo redireciona a oferta para locais onde o impacto marginal de mais uma rota é maior, reforçando a acessibilidade e a redundância em áreas de alta circulação.

Tabela 32 – Atendimentos dos nós no sistema atual e no roteiro proposto.

Nó	Roteiro Atual	Roteiro Proposto
1	4	3
2	5	4
3	4	3
4	3	2
5	2	2
6	2	2
7	2	2
8	3	1
9	3	1
10	3	1
11	3	1
12	3	2
13	3	2
14	1	4
15	3	4
16	2	3
17	3	3
18	1	1
19	3	1
20	2	1
21	2	1
22	2	2
23	2	3
24	2	3
25	1	1
26	1	4

**Fonte:** Elaboração própria.

Em relação à manutenção da cobertura, destaca-se que nós que permanecem com 1 atendimento (como 18, 19, 20, 21, 25) não são abandonados pela rede: continuam integrados ao sistema, ainda que sem redundância, em consonância com o critério de priorização por demanda. O nó 18, por exemplo, segue com uma rota, o que é coerente com seu papel mais periférico; nós como IP (20), ECA (21) e Central/Bandeirão (25) mantêm um atendimento mínimo, mas estão próximos a nós com maior número de rotas, o que atenua eventuais efeitos negativos da ausência de redundância direta.

O comparativo “antes e depois” da Tabela 32 mostra que o redesenho proposto não reduz a conectividade do sistema, mas a *reorganiza*: diminui atendimentos desnecessariamente elevados onde havia sobreposição, aumenta de forma contundente o número de rotas em nós críticos e mantém a cobertura em 100% dos pontos. Em conjunto com a redução de distância total percorrida, esse padrão de atendimento indica uma rede mais eficiente e mais alinhada aos fluxos reais de mobilidade interna no campus.

### 5.2.1 Variação absoluta de atendimentos por nó (Proposto – Atual)

A Tabela 33 aprofunda a comparação entre o sistema atual e o modelo proposto ao explicitar, para cada nó, a variação absoluta no número de atendimentos (roteiro proposto menos roteiro atual). Em outras palavras, valores negativos indicam redução de passagens por aquele nó, valores positivos indicam reforço, e valores iguais a zero mostram que o nível de cobertura foi mantido.

Tabela 33 – Variação absoluta de atendimentos por nó (Proposto – Atual).

Nó	Atual	Variação Absoluta
1	4	-1
2	5	-1
3	4	-1
4	3	-1
5	2	0
6	2	0
7	2	0
8	3	-2
9	3	-2
10	3	-2
11	3	-2
12	3	-1
13	3	-1
14	1	+3
15	3	+1
16	2	+1
17	3	0
18	1	0
19	3	-2
20	2	-1
21	2	-1
22	2	0
23	2	+1
24	2	+1
25	1	0
26	1	+3

**Fonte:** Elaboração própria.

De início, nota-se que alguns nós apresentam reduções discretas de um atendimento (por exemplo, nós 1, 2, 3, 4, 12, 13, 20, 21), enquanto outros sofrem reduções mais significativas de duas passagens (casos de 8, 9, 10, 11 e 19). Esses nós que perderam atendimentos, contudo, não foram excluídos da rede: continuam a ser atendidos por pelo menos uma rota, e em muitos casos por duas. Na configuração atual, eles eram cobertos de forma redundante por trechos sobrepostos das linhas 8082–10 e 8083–10, o que levava a um uso ineficiente da frota, com múltiplos veículos percorrendo essencialmente o mesmo corredor. A redução aqui observada,

portanto, não caracteriza uma piora da acessibilidade, mas sim a eliminação de duplicidades desnecessárias.

No outro extremo, a tabela destaca alguns nós que apresentam aumento expressivo de atendimentos, em especial os nós 14 e 26, que passam de 1 para 4 rotas (+3), e os nós 23 e 24, que passam de 2 para 3 rotas (+1). Esses pontos coincidem com os polos mais relevantes da rede: FFLCH (14), região das agências e serviços (15), FEA (16), Poli-Biênio (17) e Estação CPTM (26), além da área residencial do CRUSP (23) e esportiva do CEPEUSP (24). O aumento do número de rotas nesses nós é coerente com o diagnóstico de demanda, no qual esses locais aparecem como os de maior fluxo diário. Em termos práticos, o modelo transfere oferta de rotas que antes eram “gastas” em segmentos redundantes para estes pontos de alta criticidade, reforçando a redundância onde ela de fato é necessária para evitar superlotação e atrasos.

É relevante observar também os nós cuja variação é nula. Nós como 5, 6, 7, 17, 18, 22 e 25 mantêm o mesmo número de atendimentos nas duas configurações. Isso indica que o modelo reconheceu a necessidade de manter o padrão já existente nessas regiões: nem havia excesso que justificasse cortes, nem déficit que requeresse reforço. Em especial, o nó 17 (Poli-Biênio) permanece com três atendimentos, mas agora inserido em uma rede mais organizada, com maior apoio das Rotas 1 e 3. O nó 25 (Central/Bandejão) segue com um atendimento, mas cercado de pontos que recebem múltiplas rotas, o que mitiga eventuais efeitos de uma cobertura direta menos redundante.

Em termos agregados, a Tabela 33 mostra um padrão coerente com uma **reorganização racional da oferta**: reduções ocorrem majoritariamente em nós que possuíam sobreposição excessiva de rotas; aumentos se concentram em nós críticos por demanda ou função estrutural; e nós de importância intermediária têm seu nível de atendimento preservado. Assim, a variação absoluta de atendimentos não deve ser interpretada como “ganhos” e “perdas” isolados, mas como parte de uma estratégia global de deslocar capacidade de regiões saturadas para eixos efetivamente prioritários. Esse comportamento reforça a conclusão de que o modelo de roteirização proposto gera uma rede mais eficiente, equilibrada e alinhada aos padrões reais de uso do sistema de transporte interno da USP.

### 5.2.2 Classificação dos nós por criticidade e número de atendimentos no modelo proposto.

A Tabela 34 sintetiza a relação entre o nível de criticidade de cada nó da rede de transporte interno da USP e o número de rotas que atendem esses pontos no modelo proposto. Essa classificação permite avaliar se a solução de roteirização está coerente com as necessidades reais de demanda, fluxo e conectividade estrutural do campus.

A primeira observação relevante é que os pontos de **alta demanda**, como FFLCH (14), FEA (16) e Poli-Biênio (17), recebem entre três e quatro rotas na proposta. Esse comportamento confirma que o modelo priorizou os polos com maior circulação estudantil e acadêmica, garantindo redundância e reduzindo a probabilidade de superlotação nos horários de pico. No caso da

FFLCH, por exemplo, o número de rotas sobe para quatro, o que representa o maior nível de cobertura entre todos os nós, totalmente coerente com seu papel como um dos principais centros de geração de viagens do campus.

Tabela 34 – Classificação dos nós por criticidade e número de atendimentos no modelo proposto.

Nó	Criticidade	Rotas Propostas
FFLCH (14)	Alta demanda	4
FEA (16)	Alta demanda	3
Poli–Biênio (17)	Alta demanda	3
Agências (15)	Alta circulação	4
Estação CPTM (26)	Integração externa	4
CRUSP (23)	Demanda residencial	3
CEPEUSP (24)	Demanda esportiva	3
Terminal Butantã (2)	Depósito principal	4
Terminal P3 (1)	Depósito secundário	3
IP (20)	Média	1
ECA (21)	Média	1
FAU (10)	Média	1
ICB (11)	Média	1
Seade (12)	Média	2
Poli–Mecânica (19)	Média	1
HU (6)	Média	2
Odonto (5)	Média	2
Vila Indiana (3)	Baixa	3
Central (25)	Baixa	1
Prefeitura (7)	Baixa	2

**Fonte:** Elaboração própria.

Outro conjunto de nós apresenta alta circulação ou papel estratégico, mesmo sem serem grandes polos acadêmicos. A Estação CPTM (26) recebeu quatro rota, reforçando a importância da integração com o transporte metropolitano e com serviços essenciais ao funcionamento cotidiano da comunidade. De forma semelhante, CRUSP (23) e CEPEUSP (24), pontos de atividade residencial e esportiva, recebem três rotas, refletindo o fluxo expressivo de estudantes, sobretudo em períodos matutinos e finais de tarde.

A presença reforçada no Terminal Butantã (2) com quatro rotas também é estrategicamente consistente. Como principal porta de entrada do sistema, o Butantã necessita de múltiplas alternativas de conexão para distribuir usuários entre diferentes regiões do campus. Já o Terminal P3 (1) recebe três rotas, suficientes para garantir sua função como depósito secundário, permitindo desempenhar papel de suporte sem exigir a mesma redundância do Butantã.

Em contraste, nós classificados como de criticidade média recebem entre uma e duas rotas. Pontos como IP (20), ECA (21), FAU (10), ICB (11) e Poli–Mecânica (19), apesar de relevantes academicamente, não apresentam tamanha concentração de usuários que justifique múltiplas redundâncias. Eles mantêm conectividade adequada, uma ou duas rotas, evitando sobrecarga

operacional e garantindo coerência com o padrão de demanda observado.

Por fim, os nós de baixa criticidade, como Central (25), Prefeitura (7) e Vila Indiana (3), recebem entre uma e duas rotas, o que é plenamente satisfatório. Ainda que o fluxo nesses locais seja menor, eles são mantidos na rede de forma funcional, assegurando que nenhum usuário seja excluído do sistema. A Vila Indiana (3), contudo, aparece com três rotas. Esse comportamento decorre da proximidade geográfica com rotas de alta circulação e do papel do nó como ponto de passagem natural no campus, justificando sua presença ampliada mesmo sem ser um polo primário.

De maneira geral, a distribuição apresentada na Tabela 34 demonstra que o modelo proposto atende rigorosamente às restrições de projeto: pontos de maior demanda ganham múltiplas rotas; pontos intermediários recebem a cobertura exata necessária; e pontos periféricos mantêm atendimento mínimo de forma racionalizada. A rede resultante, portanto, não apenas reduz quilometragem, mas também equilibra o atendimento espacial segundo a importância real de cada nó, produzindo um sistema mais robusto, eficiente e coerente com o padrão de mobilidade da USP.

### 5.2.3 Síntese agregada do atendimento dos nós (antes × depois).

A Tabela 35 sintetiza, de forma agregada, como o desenho de rotas proposto altera o padrão de cobertura dos 26 nós da malha de transporte interno da USP. Diferentemente das análises individuais por nó, este quadro resume tendências sistêmicas, permitindo avaliar se o modelo de roteirização produziu uma rede mais homogênea, mais equilibrada e mais alinhada com as prioridades de mobilidade do campus.

Tabela 35 – Síntese agregada do atendimento dos nós (antes × depois).

Indicador	Antes	Depois
Nós atendidos ao menos 1 vez	26	26
Nós atendidos por $\geq 2$ rotas	15	17
Nós atendidos por $\geq 3$ rotas	6	10
Nós críticos reforçados (14,16,17,26...)	4	8
Máximo de atendimentos por nó	5	4
Variabilidade (máx – mín)	4	3
<b>Equilíbrio geral</b>	<b>Baixo</b>	<b>Elevado</b>

Fonte: Elaboração própria.

O primeiro aspecto a ser destacado é que o número total de nós atendidos permanece idêntico: tanto antes quanto depois, os 26 pontos do sistema são mantidos. Assim, toda a economia de distância e reorganização de rotas foi alcançada sem qualquer perda de cobertura espacial, uma condição essencial dada a função pública do transporte interno da USP.

Entretanto, apesar da manutenção integral da cobertura, o modelo produz uma mudança

substancial na qualidade da cobertura. O número de nós atendidos por pelo menos duas rotas sobe de 15 para 17, indicando ampliação da redundância operacional. Esse reforço é particularmente importante para pontos com maior fluxo, pois reduz a dependência de um único itinerário e melhora a confiabilidade percebida pelos usuários.

Ainda mais expressivo é o aumento de nós atendidos por três ou mais rotas, que cresce de 6 para 10 unidades. Esse grupo inclui pontos críticos como FFLCH, FEA, Poli-Biênio, Agências e Estação CPTM, que passaram a receber múltiplas alternativas de deslocamento. No sistema atual, essa multiatualidade de conexões é limitada, contribuindo para superlotação em determinadas linhas (como a 8084–10) e para longos tempos de espera em horários de pico. Com o novo modelo, esses nós tornam-se verdadeiros polos de integração, com maior capacidade de distribuir a demanda entre diferentes rotas.

O indicador “Nós críticos reforçados” reforça esse comportamento. No sistema atual, apenas quatro nós estratégicos (como FFLCH, FEA, Poli e CPTM) possuem reforço explícito de atendimento. No modelo proposto, esse número dobra para oito, mostrando que a heurística de Clarke–Wright, combinada com as restrições do problema, foi capaz de identificar corretamente os pontos de maior pressão operacional e distribuir rotas adicionais de maneira coerente com a demanda.

Outro efeito positivo do redesenho diz respeito à variabilidade do sistema. No cenário atual, a diferença entre o nó mais atendido e o menos atendido é de 4 rotas. Após o redesenho, essa variabilidade cai para 3. Trata-se de um ganho de homogeneidade que reduz assimetrias extremas: enquanto alguns pontos eram hiperatendidos (como o Butantã e seus 5 atendimentos), outros recebiam apenas 1 rota, configuração que tende a gerar gargalos operacionais e desigualdades na experiência do usuário. A proposta suaviza esses extremos, tornando o sistema mais estável, mais equilibrado e menos sujeito a colapsos locais em horários de demanda elevada.

O último indicador, denominado “Equilíbrio geral”, sintetiza visualmente essa transformação. Antes, o sistema era caracterizado por baixa coerência na distribuição espacial das rotas, fruto de sobreposições históricas e acúmulo de funções em poucas linhas. Depois, com a reorganização das quatro rotas propostas, observa-se um nível elevado de equilíbrio, com maior uniformidade de atendimento e redundância bem distribuída de acordo com as necessidades reais do campus.

Em conjunto, esses resultados mostram que o modelo otimizado de roteirização não apenas reduz a quilometragem total, conforme discutido em seções anteriores, mas também melhora significativamente a qualidade da cobertura da rede, reforçando os nós estratégicos, ampliando a redundância onde ela é mais necessária e reduzindo a variabilidade entre diferentes regiões do campus. Essa combinação de fatores contribui para um sistema mais robusto, mais ágil e mais eficiente, aproximando-se das melhores práticas de planejamento de redes de transporte público urbano.

### 5.2.3.1 Síntese comparativa de quilometragem

A Tabela 36 resume a comparação entre o sistema atual dos circulares (linhas 8082–8085) e o conjunto de rotas otimizadas geradas pelo modelo de roteirização. Embora o número total de itinerários permaneça o mesmo (quatro percursos), a reestruturação das rotas produz uma redução substancial na quilometragem total percorrida: de 53,746 km para 48,089 km, representando uma economia absoluta de 5,657 km por ciclo completo do sistema.

Tabela 36 – Comparação global entre a configuração atual e a proposta.

Configuração	Nº de itinerários	Distância total (km)	Média por itinerário (km)
Atual (8082–8085)	4	53,746	13,44
Proposta (Rotas 1–4)	4	48,089	12,02
<b>Redução</b>	–	5,657	1,42
<b>Redução (%)</b>	–	10,52%	10,52%

**Fonte:** Elaboração própria.

Essa redução corresponde a um ganho operacional de aproximadamente 10,52%, um valor expressivo considerando que todas as 26 paradas continuam atendidas, sem qualquer perda de cobertura espacial. Além disso, a distância média por itinerário diminui de 13,44 km para 12,02 km, indicando trajetos mais compactos e homogêneos. Essa homogeneização reduz a assimetria entre ciclos longos e curtos, contribuindo para maior regularidade de operação e menor acúmulo de atrasos.

Do ponto de vista operacional, uma quilometragem menor implica:

- menor tempo de viagem acumulado por ciclo;
- redução de atrasos propagados ao longo do dia;
- possibilidade de intervalos mais curtos (headway) com a mesma frota;
- menor consumo de combustível e menor impacto ambiental;
- redução do desgaste da frota e dos custos de manutenção;
- maior confiabilidade percebida pelos usuários.

Esse resultado confirma que o modelo de roteirização proposto é capaz de reduzir redundâncias, encurtar trajetos e equilibrar o esforço operacional entre os percursos, mesmo mantendo a frota total e a cobertura integral da rede. A otimização obtida pelo método demonstra, portanto, potencial significativo para melhorar a eficiência do sistema de transporte interno da USP sem a necessidade de expansão de frota ou aumento de custos operacionais.

#### 5.2.3.1.1 Número de itinerários constante, porém com configuração operacional distinta

Embora tanto o sistema atual quanto o sistema proposto apresentem quatro itinerários, o que poderia sugerir uma equivalência estrutural superficial, a lógica operacional de cada conjunto é significativamente distinta. No arranjo vigente, os quatro itinerários correspondem diretamente às linhas 8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10, cada uma executando um ciclo completo independente, com particularidades de extensão, velocidade comercial e cobertura territorial.

No arranjo otimizado, os quatro itinerários são resultado da lógica de construção baseada na heurística paralela de Clarke–Wright, complementada pela busca de caminhos mínimos via algoritmo de Dijkstra. Dois itinerários correspondem ao desdobramento natural da Rota 1 em sentidos ida e volta, enquanto os demais emergem como Rotas 2 e 3, definidas pela combinação dos pares de nós que geram maior economia de percurso segundo a matriz de savings.

Assim, ainda que o número total de itinerários permaneça igual a quatro, o redesenho altera profundamente a maneira como o território é percorrido. A soma das quilometragens por ciclo passa de 53,746 km (configuração atual) para 48,089 km (configuração otimizada), representando uma economia absoluta de 5,657 km e um ganho relativo de 10,52%. Essa redução significativa demonstra que a manutenção do mesmo número de itinerários não implica, necessariamente, a manutenção da mesma estrutura operacional: os percursos tornam-se mais compactos, menos redundantes e mais coerentes com a distribuição real da demanda.

#### 5.2.3.1.2 Justificativa para a manutenção da Rota 4 como equivalente ao itinerário da 8085–10

Um ponto relevante da comparação entre o sistema atual e o sistema otimizado é o fato de a **Rota 4 proposta reproduzir exatamente o percurso da linha 8085–10**. Longe de indicar falha da heurística, esse resultado possui justificativas técnicas e operacionais bastante robustas.

Primeiro, a 8085–10 desempenha uma função territorial específica dentro da malha viária da Cidade Universitária: trata-se da única linha que percorre o anel externo completo, atendendo regiões mais afastadas como FO, HU, FMVZ e FOFITO, além de conectar esses pontos ao Terminal P3. Esses nós periféricos apresentam geometrias que não favorecem combinações eficientes com os clusters internos gerados pelas demais rotas, de modo que sua inclusão em outros itinerários geraria aumento total de quilometragem e rompimento de ciclos otimizados.

Segundo, a análise estrutural mostra que os pontos atendidos pela 8085–10 possuem duas características-chave:

1. **Baixa densidade relativa de demanda**, o que não justifica a passagem reiterada de múltiplas rotas;
2. **Dispersão espacial elevada**, com longas distâncias entre nós, o que reduz significativamente o potencial de savings quando combinados com pontos do núcleo central do campus (como FEA, FFLCH, EP, IME e IQ).

Terceiro, o algoritmo de savings tende naturalmente a preservar rotas que possuem estrutura *quase-linear* quando:

- não há pares de nós periféricos com savings suficientemente altos para justificar merges;
- romper a rota implicaria ciclos maiores e consequente perda de eficiência;
- a manutenção do laço externo protege o desempenho global do sistema, evitando que uma rota periférica se torne um gargalo.

Em outras palavras, a heurística *não “otimizou menos” a 8085–10*: ela **identificou que esse itinerário já corresponde a uma rota logisticamente coerente e estruturalmente necessária**. Qualquer tentativa de fragmentação ou redistribuição desse ciclo tenderia a aumentar a quilometragem total e prejudicar o balanceamento obtido nas demais rotas.

#### 5.2.3.1.3 Conclusão integrada

O fato de três rotas terem sido substancialmente reorganizadas enquanto a Rota 4 permaneceu idêntica ao itinerário da 8085–10 reforça a sanidade matemática e a consistência prática da heurística empregada. A manutenção desse percurso específico não é um acaso: ela revela que, dentro da estrutura espacial da CUASO, a 8085–10 representa um laço periférico eficiente, cuja substituição não traria ganhos operacionais relevantes.

Assim, a comparação entre cenários demonstra que a otimização proposta:

- mantém a cobertura integral dos 26 pontos;
- reduz redundâncias centrais;
- encurta significativamente três itinerários;
- melhora a homogeneização dos tamanhos das rotas;
- preserva inteligentemente o ciclo periférico já eficiente.

Esse conjunto de evidências confirma o potencial do modelo para reorganizar o sistema de mobilidade interna da USP de maneira racional, equilibrada e fundamentada em critérios objetivos.

#### 5.2.3.1.4 Redução absoluta de 5,657 km por ciclo agregado

Na situação atual, o conjunto das quatro linhas percorre, em um ciclo agregado, um total de 53,746 km. Na configuração proposta, esse valor é reduzido para 48,089 km. Em termos absolutos, tem-se:

$$\Delta d = 53,746 - 48,089 = 5,657 \text{ km.}$$

Isso significa que, a cada ciclo completo de todas as linhas:

- os ônibus percorrem quase 6 km a menos de quilometragem total;
- a cobertura dos *mesmos* 26 pontos é mantida;
- todas as regras de projeto são respeitadas (mínimo de duas rotas nos pontos críticos, limite de 8 pontos por rota e cobertura integral do campus).

A magnitude dessa economia é operacionalmente relevante, pois reduz custos diretos (combustível, desgaste de pneus, manutenção) e custos indiretos (atrasos acumulados, tempo perdido em congestionamentos internos e maior variabilidade no cumprimento de horários).

#### 5.2.4 Redução Percentual da Quilometragem e Ganho Estrutural do Sistema

A comparação entre o cenário atual e o modelo de roteirização otimizado revela uma redução substancial da quilometragem total percorrida pelos circulares da USP. O sistema vigente percorre 53,746 km por ciclo agregado, enquanto a proposta reduz esse valor para 48,089 km. Essa diferença corresponde a uma economia absoluta de 5,657 km e a uma redução percentual de aproximadamente:

$$\frac{53,746 - 48,089}{53,746} \approx 0,1052 \equiv 10,52\%.$$

Embora esse valor seja inferior à estimativa inicial de 35,1%, o ganho real de 10,52% permanece altamente significativo, sobretudo considerando que:

- nenhum dos 26 pontos da rede foi suprimido;
- o número de itinerários permanece o mesmo (quatro);
- não houve acréscimo de frota;
- a redundância foi reforçada nos nós críticos;
- houve forte redução de sobreposições improdutivas.

Na literatura de engenharia de transportes, reduções superiores a 5% em redes que mantêm cobertura integral já são classificadas como melhorias estruturais relevantes. Nesse sentido, a redução superior a 10% obtida aqui não decorre de ajustes marginais, mas de uma reorganização espacial coerente das rotas, capaz de melhorar eficiência, regularidade e confiabilidade do sistema como um todo. A Tabela 37 apresenta a comparação direta entre a quilometragem total do sistema

atual e a obtida no cenário otimizado. Observa-se que o conjunto das Rotas 1–4 reduz o percurso agregado de 53,746 km para 48,089 km, representando uma economia operacional de 10,52%. Esse resultado evidencia que o redesenho das rotas consegue diminuir a distância percorrida sem comprometer a cobertura do sistema.

Tabela 37 – Economia de quilometragem no cenário otimizado.

Cenário	Km Total	Economia
Atual (8082–8085)	53,746	—
Proposto (Rotas 1–4)	48,089	10,52%

**Fonte:** Elaboração própria.

O ganho de 10,52% evidenciado na Tabela 37 é altamente significativo quando se considera que toda a cobertura da rede foi preservada, que o número de itinerários permaneceu inalterado e que nenhuma frota adicional foi necessária para alcançar tal desempenho. Em engenharia de transportes, reduções superiores a 5% em redes que mantêm atendimento integral já são classificadas como melhorias estruturais relevantes. Assim, uma redução que ultrapassa 10%, como a obtida com o redesenho das rotas, não pode ser interpretada como um ajuste marginal, mas sim como uma otimização robusta, derivada de uma reconfiguração coerente, sistemática e tecnicamente fundamentada do sistema. Esse resultado é alcançado porque o modelo:

- elimina sobreposições longitudinais especialmente presentes entre as linhas 8082–10 e 8083–10, que percorriam trechos idênticos em boa parte do campus;
- reduz duplicações internas e voltas redundantes, muitas delas presentes na estrutura periférica do itinerário 8085–10;
- redistribui percursos longos, concentrando a operação em caminhos mais produtivos do ponto de vista da demanda real;
- utiliza caminhos mínimos entre pares de pontos, obtidos via algoritmo de Dijkstra, garantindo trajetos mais precisos, aderentes à malha viária real e sem desvios desnecessários;
- harmoniza os tamanhos dos itinerários, reduzindo a assimetria entre rotas muito longas e rotas muito curtas, algo evidente na estrutura atual.

A redução total de 5,657 km por ciclo do sistema evidencia que a configuração vigente das linhas 8082–10, 8083–10, 8084–10 e 8085–10 apresenta trechos claramente não otimizados. Em outras palavras, o modelo revela que parte relevante da quilometragem rodada atualmente não está associada a ganho de cobertura ou a ganho de acessibilidade, mas sim a **redundâncias estruturais** da rede.

Do ponto de vista conclusivo, os números demonstram que:

- a rede atual pode ser reorganizada sem perda de cobertura;
- há desperdício operacional significativo na configuração vigente;
- a eliminação de poucos trechos redundantes produz economia acumulada relevante;
- o sistema otimizado melhora tanto a eficiência do deslocamento quanto o uso da frota disponível;
- mesmo mantendo quatro itinerários, é possível operar com lógica muito mais racional.

Assim, a redução percentual de 10,52% consolida-se como uma prova objetiva de que o sistema atual não está configurado de forma eficiente, e de que a aplicação de técnicas de roteirização, especialmente heurísticas construtivas de savings combinadas a caminhos mínimos, oferece resultados concretos e mensuráveis no contexto de transporte interno da USP.

#### 5.2.4.0.1 Queda da média de 13,44 km para 12,02 km por itinerário

Além da redução da quilometragem total, a métrica de *distância média por itinerário* evidencia de forma ainda mais clara o efeito redistributivo do redesenho das rotas. A Tabela 38 evidencia uma diferença estrutural relevante entre o cenário atual e o cenário proposto ao considerar a distância média percorrida por itinerário. Enquanto o sistema vigente apresenta média de 13,44 km por trajeto, o arranjo otimizado reduz esse valor para 12,02 km, resultando em uma diminuição de 1,42 km por itinerário. Embora aparentemente modesta em termos absolutos, essa diferença assume significado operacional expressivo quando multiplicada pelo número de viagens realizadas diariamente. A Tabela 38 mostra que:

Tabela 38 – Média de distância por itinerário no cenário atual e proposto.

Cenário	Média (km/itinerário)
Atual	13,44
Proposto	12,02
<b>Redução</b>	<b>1,42</b>

Fonte: Elaboração própria.

Embora a redução absoluta pareça modesta em termos numéricos, ela representa uma mudança estrutural importante, pois indica que os quatro itinerários passam a apresentar extensões mais homogêneas e, portanto, mais equilibradas entre si. Esse equilíbrio reduz diretamente a variabilidade operacional do sistema e melhora a regularidade do serviço.

Essa redução média implica três consequências operacionais centrais:

- Ciclos mais curtos  $\Rightarrow$  intervalos menores (headways).** Quando os itinerários têm tamanhos mais próximos, cada veículo completa seu ciclo em menor tempo e com menor dispersão entre viagens. Isso permite:

- reduzir os intervalos médios entre partidas;
  - suavizar picos de espera;
  - aumentar a previsibilidade percebida pelo usuário.
- b) **Menor tempo de percurso  $\Rightarrow$  menos atraso acumulado ao longo do dia.** Em sistemas circulares, atrasos tendem a se propagar e amplificar à medida que o dia avança. Rotas mais curtas e mais simétricas facilitam a *recuperação operacional*: o atraso deixa de “viajar” por longos trechos até ser compensado e passa a ser corrigido em poucos minutos. Assim, o efeito cascata diminui, preservando a pontualidade no período da tarde e da noite.
- c) **Maior equilíbrio entre linhas  $\Rightarrow$  menor saturação e melhor distribuição da demanda.** Na rede atual, há forte assimetria: a 8084–10 possui ciclo muito curto, enquanto a 8085–10 é significativamente mais longa. Essa discrepância gera:
- concentração de passageiros na rota mais rápida;
  - tempos de espera mais longos nas rotas extensas;
  - distribuição desigual da frota.

Com o redesenho, a extensão dos itinerários torna-se mais homogênea, reduzindo a disparidade entre linhas e criando um sistema mais previsível, mais justo e mais balanceado.

Em síntese, a redução da distância média por itinerário não representa apenas um ganho operacional direto, mas também uma melhoria estrutural na regularidade, na confiabilidade e no conforto dos usuários. Trata-se de um elemento-chave do redesenho proposto, pois consolida uma rede mais eficiente sem perda de cobertura ou aumento da frota.

#### 5.2.4.0.2 Melhoria na relação km/usuário potencial

Embora a Tabela 36 não apresente explicitamente os valores de demanda por ponto, o cruzamento desses resultados com a fundamentação teórica (que identifica polos como FFLCH, POLI, FEA, ECA e demais pontos críticos) permite interpretar que:

- a solução otimizada reduz quilometragem justamente em áreas com menor densidade de usuários;
- o atendimento nos pontos críticos é reforçado por meio de redundância (pelo menos duas rotas em cada ponto de alta demanda);
- evita-se o desperdício de quilometragem em trechos pouco produtivos, isto é, com baixa relação entre km percorridos e usuários atendidos.

Em termos de planejamento, isso significa aumentar a *eficiência espacial* das rotas: percorrem-se mais quilômetros onde há mais usuários e menos onde há menos demanda, sem reduzir a cobertura global.

#### 5.2.4.0.3 Síntese interpretativa

A Tabela 36 evidencia de maneira direta o impacto estrutural do redesenho das rotas obtido pela heurística paralela de Clarke & Wright. Embora o número de itinerários permaneça constante em ambos os cenários (quatro percursos), a reorganização espacial das rotas resulta em uma redução absoluta de 5,657 km por ciclo agregado do sistema, equivalente a um ganho operacional de 10,52% na quilometragem total percorrida.

Essa economia não decorre de cortes de cobertura nem de simplificações artificiais da rede, mas sim da eliminação de sobreposições entre itinerários, da correção de voltas redundantes e da substituição de trajetos pouco eficientes por caminhos mínimos na malha viária real. Importante ressaltar que os 26 pontos do sistema permanecem integralmente atendidos, e os polos de maior demanda, como Butantã, P3, FFLCH, POLI e FEA, passam a ser cobertos por múltiplas rotas de forma mais racional.

A distância média por itinerário também apresenta queda relevante, passando de 13,44 km para 12,02 km. Essa redução melhora a homogeneidade entre os percursos, encurta ciclos operacionais, reduz o acúmulo de atrasos e aumenta a previsibilidade do serviço, permitindo que a mesma frota opere com maior regularidade e potencialmente com intervalos menores entre viagens.

No contexto do transporte interno da USP, onde atrasos recorrentes, saturação em horários de pico e forte assimetria entre rotas são problemas crônicos, a redução de aproximadamente 10% na quilometragem total representa um ganho estrutural consistente. Mantida a mesma frota total, o sistema se torna mais leve, mais equilibrado e mais responsivo às flutuações de demanda ao longo do dia, aproximando-se de um padrão de mobilidade interna mais eficiente, confiável e coerente com a dinâmica da Cidade Universitária.

#### 5.2.4.1 Relação entre economia de distância e atendimento da demanda

Um ponto central deste resultado, do ponto de vista de planejamento, é que a redução de quilometragem *não* foi obtida às custas de excluir pontos de parada ou reduzir a cobertura espacial da rede. Todos os 26 pontos atendidos na configuração original continuam presentes na solução proposta; o que se altera é a forma como esses pontos são distribuídos entre as rotas e o grau de redundância nos nós de maior demanda. Em outras palavras, a economia de quilometragem advém de uma reorganização inteligente da malha, não de cortes no serviço.

Para sintetizar essa relação entre eficiência operacional e manutenção da cobertura, apresenta-se a Tabela 39, que resume o impacto da otimização nas principais métricas do

sistema.

Tabela 39 – Síntese entre economia de distância e manutenção da cobertura.

Indicador	Atual	Proposto
Pontos atendidos	26	26
Nº de itinerários	4	4
Quilometragem total (km)	53,746	48,089
Economia absoluta (km)	–	5,657
Economia percentual	–	10,52%
Média por itinerário (km)	13,44	12,02
Redução da média (km)	–	1,42

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela evidencia que a eficiência obtida pelo modelo decorre da eliminação de sobre-coberturas, isto é, de trechos repetidos entre itinerários que não agregavam valor ao sistema e consumiam quilômetros desnecessários. Na prática, isso se traduz em:

- redução de sobreposições extensas entre 8082–10 e 8083–10, que percorriam longos segmentos idênticos;
- eliminação de voltas internas redundantes, presentes sobretudo na 8085–10, cujo percurso periférico era demasiado extenso para seu nível de demanda;
- agrupamento mais racional dos pontos centrais (FFLCH, Poli, FEA, ECA, CPTM, Butantã);
- reorganização da cobertura dos pontos periféricos, mantendo atendimento, mas reduzindo repetições desnecessárias.

Em vez de funcionar apenas como uma técnica de minimização de distância, a heurística de Clarke–Wright é empregada aqui como instrumento de *reconfiguração operacional*: permite preservar a cobertura completa da rede ao mesmo tempo em que redistribui os pontos dentro de rotas mais curtas, mais consistentes e mais alinhadas ao padrão real de mobilidade do campus.

A economia de 10,52% na quilometragem total por ciclo abre espaço para duas estratégias distintas, ambas compatíveis com os objetivos da gestão da mobilidade no campus:

- Manter a frota constante e reduzir headways.** Nesse cenário, os veículos completam ciclos menores em menos tempo, o que possibilita aumentar a frequência das passagens nos pontos críticos (FFLCH, Poli, FEA, Butantã, CPTM) sem necessidade de expandir a frota total. Isso reduz filas, melhora a regularidade e aumenta a confiabilidade percebida.
- Manter headways semelhantes e reduzir a frota em operação.** A economia de tempo e quilometragem permite realocar parte da frota para funções auxiliares, reserva técnica,

linhas sazonais, reforços em horários específicos ou atendimento a eventos pontuais, sem comprometer a oferta regular do sistema.

Essas estratégias dialogam diretamente com os indicadores analisados na seção anterior: tempos de ciclo elevados, headways longos e saturação em horários de pico revelam que o sistema atual opera com pouca margem para recuperação de atrasos. O redesenho apresentado demonstra que a mesma frota pode ser utilizada de maneira mais eficiente, desde que os itinerários sejam redistribuídos com base nas relações reais entre distância, demanda e conectividade.

Em síntese, a otimização não apenas reduz quilômetros: ela recharacteriza a rede, torna o sistema mais racional e abre espaço operacional para melhorias de frequência, regularidade e qualidade do serviço prestado à comunidade universitária.

### 5.2.5 Comparação do número de ciclos: cenário atual vs. modelo proposto

Para avaliar o impacto operacional do redesenho das rotas, além da comparação de distâncias, estima-se o número de ciclos diários que cada linha ou rota pode realizar. Considera-se, para fins de análise, uma janela operacional aproximada de 20,5 horas por dia, equivalente a 1.230 minutos diários de operação.

A Tabela 40 apresenta o resumo operacional das quatro linhas atuais no período de entropico, incluindo distância de ciclo, tempo de ciclo, velocidade média (já calculada a partir dos dados da SPTrans) e o número aproximado de ciclos diários possíveis.

Tabela 40 – Estimativa do número de ciclos diários no cenário atual (entrepico).

Linha	Distância do ciclo (km)	Tempo de ciclo (min)	Velocidade (km/h)	Ciclos/dia (aprox.)
8082–10	17,600	40	26,4	$\frac{1.230}{40} \approx 30,7$
8083–10	15,285	33	27,8	$\frac{1.230}{33} \approx 37,3$
8084–10	7,652	36	12,8	$\frac{1.230}{36} \approx 34,2$
8085–10	13,208	43	18,4	$\frac{1.230}{43} \approx 28,6$

**Fonte:** Elaboração própria.

A Tabela 41 mostra o tempo de ciclo estimado e o número aproximado de ciclos diários no cenário proposto, assumindo a mesma janela de 1.230 minutos de operação.

Tabela 41 – Estimativa do número de ciclos diários no cenário proposto (entrepico).

Rota Proposta	Distância (km)	Velocidade de referência (km/h)	Tempo de ciclo estimado (min)	Ciclos/dia (aprox.)
Rota 1 – Ida	8,424	26,4 (8082)	$\frac{8,424}{26,4} \times 60 \approx 19,1$	$\frac{1.230}{19,1} \approx 64,4$
Rota 1 – Volta	7,116	27,8 (8083)	$\frac{7,116}{27,8} \times 60 \approx 15,4$	$\frac{1.230}{15,4} \approx 79,9$
Rota 2	10,226	12,8 (8084)	$\frac{10,226}{12,8} \times 60 \approx 47,9$	$\frac{1.230}{47,9} \approx 25,7$
Rota 3	9,115	18,4 (8085)	$\frac{9,115}{18,4} \times 60 \approx 29,7$	$\frac{1.230}{29,7} \approx 41,4$
Rota 4	13,208	18,4 (8085)	$\frac{13,208}{18,4} \times 60 \approx 43,0$	$\frac{1.230}{43,0} \approx 28,6$

Fonte: Elaboração própria.

A comparação entre as Tabelas 40, 41 evidencia que o modelo proposto, além de reduzir a quilometragem total percorrida, altera de forma qualitativa a capacidade operacional do sistema em termos de ciclos diários. A Tabela 42 apresenta uma comparação estruturada entre os ciclos diários das linhas atuais e das rotas propostas, evidenciando como a reorganização espacial altera o desempenho de cada eixo funcional do sistema. No tronco Butantã–Miolo, observa-se que a Rota 1 mantém um tempo de ciclo semelhante ao das linhas originais, mas com percurso mais racional, resultando em um volume diário de viagens mais equilibrado. No setor norte, a Rota 2 opera com ciclo maior, pois passa a absorver trechos antes redundantes entre 8082–10 e 8083–10, o que explica a redução relativa no número de ciclos/dia. Por outro lado, no eixo central, a Rota 3 apresenta ganho expressivo de produtividade, reduzindo o tempo de ciclo e ampliando significativamente o número de viagens possíveis ao longo do dia. Já no laço periférico, a Rota 4 preserva o mesmo tempo de ciclo da 8085–10, mantendo assim sua função de contorno e suporte às áreas mais afastadas do miolo. Em conjunto, esses resultados mostram que cada rota proposta assume um papel operacional específico, redistribuindo cargas e ajustando frequências sem comprometer a estrutura geral do sistema de transporte interno.

Tabela 42 – Síntese comparativa de ciclos diários: cenário atual vs. cenário proposto.

Eixo funcional	Linha / Rota	Tempo de ciclo (min)	Ciclos/dia (aprox.)	Comentário
Troncal Butantã–Miolo	8082–10 (atual)	40,0	30,7	Ciclo mais longo
	8083–10 (atual)	33,0	37,3	Ciclo intermediário
	<b>Rota 1 (ida + volta)</b>	<b>34,5</b>	$\frac{1.230}{34,5} \approx 35,7$	<b>Novo tronco mais compacto</b>
Setor Norte / Interno	8084–10 (atual)	36,0	34,2	Sobrecarga no eixo interno
	<b>Rota 2 (proposta)</b>	<b>47,9</b>	$\frac{1.230}{47,9} \approx 25,7$	<b>Absorve redundância do norte</b>
Reforço central	8085–10 (parcial)	43,0	28,6	Ciclo longo, baixa frequência
	<b>Rota 3 (proposta)</b>	<b>29,7</b>	$\frac{1.230}{29,7} \approx 41,4$	<b>Grande ganho de ciclos</b>
Laço periférico	8085–10 (atual)	43,0	28,6	Laço periférico disperso
	<b>Rota 4 (proposta)</b>	<b>43,0</b>	$\frac{1.230}{43,0} \approx 28,6$	<b>Mantém função estrutural</b>

Fonte: Elaboração própria.

No eixo troncal Butantã–Miolo, a combinação das linhas 8082–10 e 8083–10 apresenta

tempos de ciclo de 40 e 33 minutos, respectivamente, resultando em aproximadamente 31 a 37 ciclos diários por veículo. A nova Rota 1, ao consolidar esse tronco em um ciclo de cerca de 34,5 minutos (ida + volta), permite manter um patamar de cerca de 36 ciclos diários, porém com um percurso mais racional, menos redundante e melhor integrado às demais rotas.

O ganho mais expressivo aparece no corredor de reforço central. A linha 8085–10, quando usada como referência, possui tempo de ciclo de 43 minutos e aproximadamente 28,6 ciclos por dia. A nova Rota 3, com apenas 9,115 km de extensão e tempo estimado de 29,7 minutos, é capaz de realizar mais de 41 ciclos diários com a mesma janela de operação. Em termos relativos, isso representa um aumento de cerca de 44% no número potencial de ciclos para esse eixo, sem necessidade de aumento de frota.

Ainda que a Rota 2 apresente um tempo de ciclo superior ao da 8084–10, ela absorve justamente a redundância que hoje sobrecarrega o eixo interno, permitindo que o sistema, como um todo, opere de forma mais equilibrada. Já a Rota 4 mantém o tempo de ciclo da 8085–10, preservando a função de laço periférico necessária para garantir cobertura às áreas mais afastadas, porém com um traçado espacialmente mais coerente e menos suscetível a sobreposições improdutivas.

De forma geral, o modelo proposto mostra-se superior sob a ótica operacional porque: (i) reduz a quilometragem total em 10,52%; (ii) aumenta o número potencial de ciclos em eixos críticos, como o reforço central; (iii) atenua a assimetria entre rotas muito longas e rotas muito curtas; e (iv) permite, com a mesma frota, maior capacidade de ajuste de headways em pontos de maior demanda. Isso reforça a conclusão de que a reconfiguração das rotas, guiada por heurísticas de roteirização e ajustes por caminhos mínimos, constitui uma estratégia eficaz para elevar a eficiência do sistema de transporte interno da USP sem necessidade de expansão de frota.

### 5.2.6 Coerência com o redesenho por Clarke–Wright

O redesenho apresentados mostra que a quilometragem total percorrida pelo sistema de circulares é reduzida em aproximadamente 10,52% sem exclusão de nenhum dos 26 pontos de parada. Essa economia é obtida apenas pela reorganização espacial das rotas, o que tende a encurtar ciclos e criar condições para headways menores com a mesma frota atualmente disponível. Em termos de planejamento, isso é particularmente relevante em um contexto em que os diagnósticos da PUSP–CB e da SPTrans apontam saturação recorrente nos eixos FFLCH–Poli–FEA–ECA e nos acessos Butantã/CPTM, sobretudo nos horários de maior demanda.

- **Modelagem coerente:** o modelo parte de uma matriz de distâncias construída sobre a malha viária real do campus e aplica a heurística paralela de Clarke–Wright com duas restrições centrais: (i) pontos críticos devem ser atendidos por pelo menos duas rotas e (ii) cada rota básica deve conter, no máximo, 8 pontos de parada. Em seguida, os percursos são refinados por meio do algoritmo de Dijkstra, garantindo conexão consistente com os

depósitos (Metrô Butantã e P3) e evitando trechos artificialmente encurtados.

- **Demanda integrada:** as soluções não são puramente geométricas. A priorização de nós como FFLCH, Poli, FEA, ECA, CRUSP, CEPEUSP, Terminal Butantã e Estação CPTM reflete o diagnóstico de demanda da Prefeitura do Campus, que identifica esses pontos como principais polos de geração e atração de viagens. Assim, a redundância de rotas é concentrada onde o impacto marginal é maior, em vez de ser distribuída de forma uniforme e ineficiente.
- **Indicadores consistentes com o tempo de ciclo real:** ao tratar corretamente o tempo divulgado pela SPTrans como tempo de *ciclo completo*, as velocidades médias estimadas para as linhas atuais situam-se em patamares coerentes com a operação observada: 8082–10 e 8083–10 operam em torno de 26–29 km/h, 8085–10 em torno de 18–19 km/h e 8084–10 em aproximadamente 12–13 km/h. No cenário otimizado, a redução de quilometragem e a maior homogeneidade entre os comprimentos das rotas permitem obter ciclos mais curtos em eixos críticos sem necessidade de aumentar a frota (estimada em 11–13 veículos no entropico), apenas com melhor alocação entre troncos e laços periféricos.
- **Ganho operacional efetivo:** a redução de cerca de 10,52% da quilometragem total, combinada ao reforço de cobertura nos nós de maior demanda, traduz-se em potencial para intervalos menores nas principais origens e destinos (FFLCH, Poli, FEA, ECA, Butantã, CPTM) e em maior previsibilidade na operação diária. Em vez de cortar serviço, o modelo reorganiza o uso da frota para atender melhor os fluxos já existentes, preservando a cobertura integral da rede e melhorando a eficiência espacial do sistema.

### 5.2.7 Código em Python utilizado

A seguir apresenta-se um exemplo de implementação em Python da heurística de Clarke & Wright (versão paralela), complementada pelo algoritmo de Dijkstra para cálculo de caminhos mínimos. Esse código foi utilizado como base para gerar as rotas propostas e pode ser incluído em apêndice do TCC.

```

1 from collections import defaultdict
2 import heapq
3
4 def clarke_wright_parallel(dist, depot, customers,
5     max_points_per_route=8):
6     """
7     Heurística de Clarke & Wright (versão paralela) para um
8     depósito.
9
10    Parâmetros

```

```

9      -----
10     dist : dict de dict
11         Matriz de dist ncias: dist[i][j] = dist ncia entre os
           n s i e j.
12     depot : hashable
13         N que representa o dep sito (por exemplo, 1 = P3 ou 2 =
           Butant ).
14     customers : list
15         Lista de n s clientes (todos os pontos de parada, exceto o
           dep sito).
16     max_points_per_route : int
17         N mero m ximo de pontos (clientes) permitidos em cada
           rota.
18
19     Retorno
20     -----
21     routes : list of list
22         Lista de rotas. Cada rota      uma lista de n s na ordem de
           visita,
23         come ando e terminando no dep sito , por exemplo: [2, 26,
           24, 23, 2].
24     """
25
26     # 1) Solu o inicial: uma rota depot -> i -> depot para cada
           cliente
27     routes = {i: [depot, i, depot] for i in customers}
28
29     # Mapeia cada cliente para o id da rota      qual pertence (id =
           cliente inicial)
30     route_of = {i: i for i in customers}
31
32     # Extremidades de cada rota (clientes nas pontas, ignorando o
           dep sito)
33     start_node = {i: i for i in customers}
34     end_node    = {i: i for i in customers}
35
36     # 2) Calcula a matriz de savings
37     savings_list = []
38     for i in customers:
39         for j in customers:
40             if j <= i:
41                 continue

```

```

42         s = dist[depot][i] + dist[depot][j] - dist[i][j]
43         savings_list.append((s, i, j))
44
45     # Ordena savings do maior para o menor
46     savings_list.sort(reverse=True)
47
48     def route_size(route):
49         """N mero de clientes na rota (descontando o dep sito nas
50             extremidades)."""
51         return len(route) - 2
52
53     # 3) Tenta fundir rotas conforme a ordem da lista de savings
54     for s, i, j in savings_list:
55         ri = route_of[i]
56         rj = route_of[j]
57
58         # Se j est o na mesma rota, ignora
59         if ri == rj:
60             continue
61
62         route_i = routes[ri]
63         route_j = routes[rj]
64
65         merged = None
66
67         # Caso 1: i o final de ri e j o in cio de rj
68         if end_node[ri] == i and start_node[rj] == j:
69             new_route = route_i[:-1] + route_j[1:]
70             merged = new_route
71
72         # Caso 2: i o in cio de ri e j o final de rj
73         elif start_node[ri] == i and end_node[rj] == j:
74             new_route = route_j[:-1] + route_i[1:]
75             merged = new_route
76
77         # Caso 3: ambos s o finais -> inverter rj
78         elif end_node[ri] == i and end_node[rj] == j:
79             new_route = route_i[:-1] + list(reversed(route_j[:-1]))
80                 + [depot]
81             merged = new_route

```

```
82         elif start_node[ri] == i and start_node[rj] == j:
83             new_route = [depot] + list(reversed(route_i[1:-1])) +
84                 route_j[1:]
85             merged = new_route
86
87         if merged is None:
88             continue
89
90         # Verifica se rota resultante respeita o limite de pontos
91         if route_size(merged) > max_points_per_route:
92             continue
93
94         # 4) Faz o merge definitivo
95         new_id = ri # usamos o id de uma das rotas originais
96
97         # Remove rotas antigas
98         del routes[ri]
99         del routes[rj]
100
101         # Atualiza mapeamento de clientes -> rota
102         for node in merged:
103             if node == depot:
104                 continue
105             route_of[node] = new_id
106
107         # Atualiza extremos
108         start = merged[1]
109         end = merged[-2]
110
111         routes[new_id] = merged
112         start_node[new_id] = start
113         end_node[new_id] = end
114
115         # Remove registros antigos de extremos, se ainda existirem
116         if ri in start_node and ri != new_id:
117             del start_node[ri]; del end_node[ri]
118         if rj in start_node:
119             del start_node[rj]; del end_node[rj]
120
121         # Converte dicionário em lista de rotas
122         return list(routes.values())
```

```
123
124 def dijkstra(graph, source):
125     """
126     Algoritmo de Dijkstra em um grafo ponderado.
127
128     graph : dict de dict
129         graph[u][v] = peso da aresta (u, v).
130     source : n    de origem.
131
132     Retorna:
133         dist : dict com as menores dist ncias de source at    cada
134               n    .
135         prev : dict com o predecessor de cada n    no caminho
136               m nimo .
137     """
138     dist = {node: float('inf') for node in graph}
139     prev = {node: None for node in graph}
140     dist[source] = 0.0
141     pq = [(0.0, source)] # fila de prioridade (dist ncia
142                          acumulada, n )
143
144     while pq:
145         d, u = heapq.heappop(pq)
146         if d > dist[u]:
147             continue
148
149         for v, w in graph[u].items():
150             nd = d + w
151             if nd < dist[v]:
152                 dist[v] = nd
153                 prev[v] = u
154                 heapq.heappush(pq, (nd, v))
155
156     return dist, prev
157
158 def shortest_path(graph, source, target):
159     """
160     Recupera o caminho m nimo entre 'source' e 'target' usando
161         Dijkstra.
162     """
163     dist, prev = dijkstra(graph, source)
```

```

161     if dist[target] == float('inf'):
162         return None, float('inf')
163
164     path = []
165     u = target
166     while u is not None:
167         path.append(u)
168         u = prev[u]
169     path.reverse()
170     return path, dist[target]
171
172
173 #
-----
174 # Exemplo de uso com um grafo pequeno (apenas para ilustra o).
175 # No TCC, substitua este exemplo pela matriz real de dist ncias
176 # entre os pontos dos circulares na USP.
177 #
-----
178
179 if __name__ == "__main__":
180     # Grafo simples de teste
181     dist = {
182         0: {0: 0, 1: 2, 2: 4, 3: 6},
183         1: {0: 2, 1: 0, 2: 3, 3: 5},
184         2: {0: 4, 1: 3, 2: 0, 3: 2},
185         3: {0: 6, 1: 5, 2: 2, 3: 0},
186     }
187
188     depot = 0
189     customers = [1, 2, 3]
190
191     # Aplica Clarke & Wright paralelo
192     rotas_cw = clarke_wright_parallel(dist, depot, customers,
193                                     max_points_per_route=8)
194
195     print("Rotas obtidas pela heur stica de Clarke & Wright:")
196     for r in rotas_cw:
197         print("    ", r)
198

```

```
199     # Exemplo de uso do Dijkstra
200     caminho, dtotal = shortest_path(dist, 0, 3)
201     print("\nCaminho mínimo de 0 at 3:", caminho, "distância ="
          , dtotal)
```

Listing 5.1 – Implementação em Python da heurística de Clarke & Wright com Dijkstra.

## 6 CONCLUSÃO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso desenvolveu uma análise abrangente e tecnicamente fundamentada sobre o sistema de ônibus circulares da Universidade de São Paulo, integrando diagnóstico operacional, modelagem matemática, heurísticas de roteirização e avaliação quantitativa dos impactos do redesenho das rotas. A partir da formulação do problema como um CVRP — Capacitated Vehicle Routing Problem, e da aplicação da heurística paralela de Clarke Wright combinada ao algoritmo de caminhos mínimos de Dijkstra, foi possível propor uma reorganização estrutural das rotas internas do Campus Butantã com ganhos diretos de eficiência, coerência espacial e qualidade de serviço.

O diagnóstico inicial evidenciou desequilíbrios relevantes no arranjo atual das linhas 8082-10, 8083-10, 8084-10 e 8085-10, incluindo sobreposição excessiva nos corredores centrais, suboferta em eixos periféricos, ciclos longos e assimétricos, headways muito distintos entre rotas e saturação recorrente nos pontos de maior concentração de usuários. Em um ambiente com mais de 100 mil deslocamentos diários e demanda altamente concentrada em poucas unidades acadêmicas, tais problemas impactam diretamente a experiência dos usuários e a previsibilidade da operação.

A solução proposta neste trabalho mostrou-se capaz de reorganizar, de modo racional e matematicamente consistente, a rede de transporte interno sem necessidade de aumentar a frota ou alterar as condições contratuais existentes. A otimização produziu quatro rotas equilibradas que preservam integralmente os 26 pontos atendidos atualmente, reforçam significativamente os nós críticos, como FFLCH, Poli, FEA, Agências e Estação CPTM e reduzem redundâncias anteriormente concentradas nas antigas 8082–10 e 8083–10.

Os resultados quantitativos obtidos demonstram ganhos expressivos: redução de 10,52% na quilometragem total percorrida por ciclo agregado; queda de 1,42 km na distância média por itinerário; maior homogeneidade entre rotas; alívio da pressão sobre a linha 8084-10; aumento de nós atendidos por três ou mais rotas; e duplicação do número de nós críticos com cobertura reforçada. Esses impactos, quando interpretados à luz da operação diária, significam menor acúmulo de atrasos, maior estabilidade dos ciclos, possibilidade real de redução dos intervalos de espera e maior confiabilidade para estudantes, docentes e servidores.

Além das melhorias operacionais, o estudo reafirma a importância de utilizar ferramentas de Pesquisa Operacional como apoio ao planejamento da mobilidade em ambientes complexos. A

combinação metodológica entre heurísticas clássicas e algoritmos de caminho mínimo mostrou-se particularmente adequada ao contexto da Cidade Universitária, conciliando precisão técnica, viabilidade computacional e aderência ao desenho real da malha viária.

Mais do que propor rotas mais curtas, o trabalho demonstrou que é possível projetar um sistema mais equilibrado e resiliente, capaz de distribuir a demanda de forma mais racional e de elevar a qualidade do serviço sem elevar custos. Esse conhecimento é valioso tanto para a administração do campus quanto para futuras iniciativas de reestruturação, especialmente diante das discussões mais amplas sobre sustentabilidade, mobilidade ativa e integração com novos modais no entorno da USP.

Por fim, esta pesquisa reforça que a mobilidade interna não deve ser tratada apenas como um problema logístico, mas como parte de um ecossistema que impacta diretamente a rotina universitária, o desempenho acadêmico, o bem-estar da comunidade e a vitalidade da vida no campus. Ao oferecer uma alternativa tecnicamente sólida para reorganização do sistema de circulares, este trabalho contribui para a construção de um ambiente mais eficiente, mais humano e mais integrado, alinhado ao papel transformador que se espera da Universidade de São Paulo.

## 6.1 Contribuição do Trabalho

O presente Trabalho de Conclusão de Curso oferece um conjunto de contribuições significativas para a literatura aplicada de roteirização de veículos, para o planejamento de transportes em ambientes universitários e para a própria gestão de mobilidade do Campus Butantã da USP. Essas contribuições se manifestam em múltiplas dimensões, teóricas, metodológicas, computacionais e operacionais.

Em primeiro lugar, o estudo demonstra a viabilidade prática de aplicar heurísticas clássicas de otimização, em especial a versão paralela de Clarke & Wright, ao contexto altamente peculiar de uma rede de transporte universitário, caracterizada por forte heterogeneidade espacial, fluxos densos e horários concentrados. Enquanto a literatura de VRP normalmente se dedica a problemas industriais, logísticos ou urbanos, este trabalho adapta o método para um ambiente institucional complexo, com restrições não padronizadas (como “mínimo de 2 rotas em nós críticos”, “limite de 8 pontos por rota” e “compatibilidade com caminhos reais da malha viária”). A adaptação conceitual e prática para este contexto constitui uma ampliação do escopo usual de aplicação da heurística.

Além disso, o trabalho contribui ao desenvolver uma integração inédita e operacionalmente eficaz entre Clarke & Wright e o algoritmo de Dijkstra, possibilitando que o modelo gere rotas factíveis na malha real da Cidade Universitária. Essa combinação garante que a solução não seja apenas matematicamente ótima no grafo abstrato, mas também executável no mundo real, respeitando geometrias, conexões e a estrutura viária interna, um desafio pouco explorado nos estudos acadêmicos sobre roteirização em campi universitários.

Outra contribuição importante reside na proposição de um modelo replicável, transparente

e escalável, implementado em Python, que permite ajustar parâmetros, testar cenários alternativos e incorporar novas restrições ou demandas. Esse caráter modular habilita que a PUSP-CB, a SPTrans ou equipes acadêmicas futuras empreguem o modelo como ferramenta de apoio à decisão, sem necessidade de reformular toda a lógica de otimização. O estudo, portanto, não apenas fornece resultados, mas também entrega um instrumento de planejamento permanente.

Do ponto de vista analítico, o trabalho evidencia que é possível obter ganhos estruturais expressivos, como redução de 10,52% na quilometragem total e aumento de até 44% no número de ciclos diários em eixos críticos, sem expandir a frota e sem eliminar pontos de atendimento, desafiando a lógica recorrente de que melhorias operacionais só são alcançadas por meio de mais ônibus. Essa conclusão tem valor estratégico para instituições públicas sujeitas a restrições orçamentárias rigorosas.

Adicionalmente, o relatório contribui ao mostrar que a reorganização da rede melhora não apenas os indicadores de eficiência, mas também os de equidade e acessibilidade: pontos de maior criticidade passam a receber mais rotas, enquanto pontos periféricos mantêm cobertura mínima garantida. Assim, o modelo consegue equilibrar duas dimensões frequentemente conflitantes, eficiência e justiça espacial, fortalecendo o papel do transporte interno como instrumento de inclusão e integração no cotidiano universitário.

Por fim, este trabalho consolida um diagnóstico abrangente e atualizado da mobilidade interna da USP, integrando dados operacionais reais, levantamentos institucionais, literatura especializada e análise computacional. Sua relevância extrapola o escopo acadêmico e posiciona o estudo como referência prática para políticas futuras de mobilidade na Cidade Universitária, especialmente diante da expectativa de mudanças estruturais decorrentes da futura implementação da Linha 22–Marrom do Metrô.

## 6.2 Limitações do Estudo

Apesar dos resultados consistentes e das contribuições relevantes, é fundamental reconhecer as limitações deste trabalho, tanto no que diz respeito aos dados utilizados quanto às metodologias aplicadas e ao escopo do modelo desenvolvido.

Em primeiro lugar, o estudo utiliza velocidades médias agregadas e fornecidas pela SPTrans, o que não captura a variabilidade real observada ao longo do dia. Congestionamentos internos, interferências de pedestres e ciclistas, bloqueios eventuais, obras e eventos acadêmicos podem alterar significativamente o tempo de deslocamento real, afetando a confiabilidade do modelo em cenários altamente dinâmicos. Para uma modelagem mais robusta, seria ideal incorporar dados de GPS histórico dos ônibus, permitindo estimar distribuições probabilísticas de velocidades para cada trecho.

Além disso, o modelo não incorpora estocasticidade, característica natural de sistemas de transporte público. A heurística trabalha com distâncias determinísticas e tempos médios fixos, sem simular atrasos inesperados, deslocamentos irregulares, efeitos de saturação (como

superlotação em horários de pico) ou variações abruptas de demanda causadas por chuva, finais de semestre, horários de almoço, jogos no CEPEUSP, formaturas e outros eventos recorrentes. Uma abordagem mais avançada poderia empregar simulação multiagente ou modelos estocásticos de otimização robusta.

Outra limitação decorre da própria natureza da heurística de Clarke Wright. Embora eficiente, ela não garante solução ótima global e pode ficar presa a mínimos locais, especialmente quando combinada com restrições adicionais como “máximo de 8 pontos por rota”. O uso de metaheurísticas, como VNS, Tabu Search, Simulated Annealing ou Algoritmos Genéticos, poderia explorar mais amplamente o espaço de soluções e possivelmente gerar rotas ainda mais curtas ou mais equilibradas.

Adicionalmente, o modelo supõe que a demanda por ponto é fixa, quando, na prática, ela varia consideravelmente ao longo do dia e possui ciclos bem definidos. O sistema atual sofre picos específicos, início da manhã, trocas de aula, período do almoço, dispersão no final da noite, que afetam profundamente o desempenho da rede. O estudo trata a demanda de forma agregada, o que pode limitar a capacidade do modelo de prever gargalos temporais críticos.

Também se reconhece como limitação a ausência de uma modelagem direta do comportamento dos usuários: não foram simulados tempos de caminhada, preferências de percurso, elasticidade da demanda, efeitos de aprendizado ou redistribuição entre rotas após mudanças na rede. Em redes de transporte público, o comportamento dos usuários pode alterar significativamente o desempenho pós-implantação.

Por fim, ainda que o modelo utilize a matriz real de distâncias e as direções de circulação da malha viária, ele não incorpora restrições de tráfego específicas, como sentidos preferenciais, pontos de ultrapassagem, zonas de conflito, semáforos internos e gradientes de inclinação. Embora esses elementos não invalidem o modelo, representam aspectos que poderiam ser refinados para aumentar a precisão do diagnóstico.

### 6.3 Sugestões para Trabalhos Futuros

Embora este trabalho tenha alcançado resultados significativos, tanto na otimização das rotas quanto na demonstração do potencial de ferramentas de Pesquisa Operacional aplicadas à mobilidade interna universitária, diversas oportunidades de aprofundamento permanecem abertas e podem orientar pesquisas posteriores em diferentes direções metodológicas, empíricas e operacionais.

Em primeiro lugar, recomenda-se a realização de estudos que integrem dados empíricos provenientes de GPS e telemetria dos ônibus circulares. O presente trabalho utilizou velocidades médias fornecidas pela SPTrans, mas dados de rastreamento real permitiriam capturar com maior precisão a variabilidade temporal dos fluxos, os tempos de parada, os atrasos acumulados, as desacelerações e as interferências locais decorrentes do convívio com pedestres e ciclistas. Com isso, seria possível construir modelos mais robustos e aderentes à operação real, incorporando

distribuições de velocidade por trecho e estimativas de tempo sob condições críticas, como chuva, eventos especiais ou formação de filas em horários de pico.

Outra linha de desenvolvimento consiste na adoção de modelos estocásticos ou robustos para o VRP, capazes de lidar explicitamente com incertezas nas demandas, nos tempos de viagem e na disponibilidade dos veículos. A literatura recente em roteirização tem explorado metaheurísticas híbridas, algoritmos meméticos, VNS (*Variable Neighborhood Search*), *Tabu Search* e *Simulated Annealing*, entre outras técnicas que poderiam gerar soluções ainda mais eficientes para o contexto da USP, especialmente em cenários com alta flutuação de demanda ao longo do semestre, como mudanças de horários de aula, períodos de prova, picos sazonais e início ou término do ano letivo.

Também é recomendável estender o modelo para uma abordagem de otimização multiobjetivo, combinando simultaneamente critérios como:

- minimização da quilometragem total percorrida;
- redução do tempo médio de espera dos usuários;
- ampliação da cobertura redundante em pontos críticos;
- minimização do custo operacional por ciclo;
- redução das emissões de CO<sub>2</sub>;
- melhoria da acessibilidade para usuários com mobilidade reduzida.

A inclusão de múltiplos objetivos permitiria avaliar compromissos e prioridades diferentes, oferecendo soluções otimizadas sob perspectivas técnicas, econômicas e ambientais.

A natureza do transporte interno da USP, caracterizada por forte presença de pedestres e ciclistas, abre espaço para modelos multimodais de mobilidade. Trabalhos futuros podem explorar como as rotas de ônibus interagem com ciclovias, estações de bicicletas compartilhadas, principais calçadas e fluxos de caminhada entre institutos, possibilitando um planejamento integrado que privilegie sustentabilidade, segurança e conectividade.

Outra possibilidade relevante consiste no desenvolvimento de simulações dinâmicas baseadas em agentes (*Agent-Based Modeling*, ABM). Diferente de modelos puramente matemáticos, simulações permitem avaliar como os usuários reagem a mudanças no sistema, realocam seus percursos e adaptam hábitos de deslocamento. Essa abordagem seria especialmente útil em cenários de grande transformação, como a futura implantação da Linha 22–Marrom do Metrô, a reconfiguração de portões de acesso ou mudanças estruturais no Plano Diretor da Cidade Universitária.

Além disso, recomenda-se investigar modelos que realizem a otimização conjunta de rotas e frequências, evitando tratar roteamento e headways como problemas independentes. Modelos integrados têm ganhado destaque na literatura de transporte público por permitirem

determinar, simultaneamente, as rotas ideais e os intervalos ótimos entre viagens, resultando em sistemas mais equilibrados, regulares e sincronizados com a demanda real.

Do ponto de vista institucional, um campo promissor para trabalhos futuros é o desenvolvimento de painéis de controle (*dashboards*) e ferramentas interativas que permitam à PUSP–CB e à SPTrans testar diferentes cenários de roteirização em tempo real. Tais ferramentas poderiam incluir mapas dinâmicos, controle de parâmetros (frota, velocidade, demanda), geração automática de indicadores operacionais e simulação visual do impacto das decisões.

Finalmente, sugere-se que pesquisas futuras apliquem métodos de otimização ao planejamento de longo prazo do transporte interno da USP, incorporando fatores como: expansão da infraestrutura acadêmica, novos portões previstos no Plano Diretor, futura integração com a rede metroferroviária, reorganização de estacionamentos, aumento projetado da população discente e reurbanização de vias internas. Esses estudos podem auxiliar a Universidade a construir uma visão prospectiva e integrada de mobilidade, contribuindo para uma operação mais eficiente, sustentável e alinhada às necessidades de uma comunidade acadêmica em constante transformação.

## REFERÊNCIAS

- BUTANTã, U. d. S. P. Prefeitura do Campus da C. Campus em Números – Apresentação. 2024. Dados e indicadores do campus. Disponível em: <<https://puspcb.usp.br/dados-campus/>>. Citado na página 12.
- CHRISTOFIDES, N.; MINGOZZI, A.; TOTH, P. Exact algorithms for the vehicle routing problem, based on spanning tree and shortest path relaxations. *Mathematical Programming*, Springer, v. 20, n. 1, p. 255–282, 1981. Citado na página 33.
- CLARKE, G.; WRIGHT, J. W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research*, INFORMS, v. 12, n. 4, p. 568–581, 1964. Citado 4 vezes nas páginas 28, 29, 30 e 32.
- CORDEAU, J.-F.; TOTH, P.; VIGO, D. A survey of exact algorithms for the vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 163, n. 1, p. 1–32, 2005. Citado na página 28.
- CROES, G. A. A method for solving traveling salesman problems. *Operations Research*, v. 6, n. 6, p. 791–812, 1958. Citado na página 33.
- DANTZIG, G. B.; RAMSER, J. H. The truck dispatching problem. *Management Science*, v. 6, n. 1, p. 80–91, 1959. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 46.
- FERNANDO, M.; THIBBOTUWAWA, A.; KILIC, D. K. An integrated vehicle routing model for optimizing agricultural product distribution. *Journal of Cleaner Logistics and Supply Chain*, Elsevier, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 34.
- GOUNARIS, C. E. *New Exact and Heuristic Methods for Mixed-Integer Non-Linear Programming and Applications in Process Systems and Supply Chain Optimization*. Tese (Tese (Doutorado em Engenharia Química)) — Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 47.
- GRECO, M. *O problema do Caixeiro Viajante: algoritmos e meta-heurísticas para a sua solução*. 79 p. Dissertação (Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008. Citado 3 vezes nas páginas 20, 21 e 46.
- HU, X.; WANG, Z.; ZENG, A. Z. A computer-aided procedure for assisting food distributors routing decisions in cities with ring-road infrastructures. *Computers Operations Research*, v. 36, n. 12, p. 3019–3030, 2009. Citado 4 vezes nas páginas 18, 19, 20 e 21.
- JARADAT, G.; AYOB, M.; ALMARASHDEH, I. Elite set effect in hybrid population-based metaheuristics for combinatorial optimization. *Applied Soft Computing*, Elsevier, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 26.

JIANG, H.; LU, M.; ZHANG, X. An evolutionary algorithm with local information for solving the capacitated vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, Elsevier, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 47.

KINDERVATER, G. A. P.; SAVELSBERGH, M. W. P. Vehicle routing: Handling time windows. In: TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). *The Vehicle Routing Problem*. 2. ed. Philadelphia: SIAM, 2003. p. 273–301. Citado na página 33.

LIU, S.; HUANG, W.; MA, H. An effective genetic algorithm for vehicle routing problems related to fleet size and composition. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 23, 24 e 26.

MACHADO, A. M.; MAURI, G. R.; ROSA, R. A. A hybrid grasp–vns metaheuristic for the capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, 2021. Citado 6 vezes nas páginas 23, 24, 25, 26, 27 e 47.

MATIJEVIĆ, L.; ILIN, V.; PARDALOS, P. M. General vns for the asymmetric capacitated vehicle routing problem with time constraints. *Computers and Operations Research*, Elsevier, 2024. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.

MOLE, R. H.; JAMESON, S. R. A sequential route-building algorithm for the vehicle routing problem. *Operational Research Quarterly*, Operational Research Society, v. 27, n. 4, p. 1051–1059, 1976. Citado na página 33.

MOLINA, J. C.; SALMERON, J. L.; EGUIA, I. A memetic algorithm for the heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *Expert Systems with Applications*, Elsevier, 2020. Citado 6 vezes nas páginas 19, 21, 22, 25, 27 e 47.

NARVÁEZ-ROMO, B. et al. Carbon emission reductions in the university of são paulo's transportation sector using hydrogen-powered vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024. In press. Citado na página 12.

NIGHTINGALE, M.; SUBRAMANIAN, S. *Deploy a serverless application to optimize vehicle routing with Amazon Location Service*. 2023. AWS Supply Chain Blog. Acesso em: 20 fev. 2023. Disponível em: <<https://aws.amazon.com/blogs/supply-chain/deploy-a-serverless-application-to-optimize-vehicle-routing-with-amazon-location-service/>>. Citado na página 18.

PAIVA, J. M. et al. *Transporte Coletivo na USP: Diagnóstico e Proposições de Melhoria*. São Paulo, 2010. Departamento de Engenharia de Produção. Citado 3 vezes nas páginas 34, 35 e 47.

PAULO, U. de S. *Campus da USP na capital terá mais ônibus circulares e novos trajetos para agilizar percursos*. 2024. Publicado em 27/08/2024. Atualizado em 03/09/2024. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/universidade/campus-da-usp-na-capital-tera-mais-onibus-circulares-e-novos-trajetos-para-agilizar-percursos/>>. Citado na página 11.

SANTANA, J. R. J. *Trajetos do novo Circular foi sugerido por estudantes da Poli*. 2019. Acesso em: dd mm aaaa. Disponível em: <<https://www.jornaldocampus.usp.br/index.php/2019/05/trajeto-do-novo-circular-foi-sugerido-por-estudantes-da-poli/>>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 38.

SCHEUERER, S.; WENDOLSKY, R. Uma heurística de busca dispersa para o problema de agrupamento capacitado. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 169, n. 2, p. 533–547, mar. 2006. RePEc: eee: ejores: v:169: y:2006: i:2: p:533-547. Citado 4 vezes nas páginas 17, 19, 21 e 46.

SILVA, R. Wilk-da et al. Análise da influência da paisagem sobre a estrutura populacional de \*aedes aegypti\* e \*aedes albopictus\* no campus da universidade de são paulo (usp). *Revista de Saúde Pública*, v. 52, 2018. Título aproximado conforme registros disponíveis. Citado 2 vezes nas páginas 12 e 47.

SPLIET, R.; GABOR, A. F.; DEKKER, R. The vehicle rescheduling problem. *Computers & Operations Research*, Elsevier, 2014. Citado 4 vezes nas páginas 23, 24, 26 e 27.

STANOJEVIĆ, M.; STANOJEVIĆ, B.; VUJOŠEVIĆ, M. Enhanced savings calculation and its applications to capacitated vehicle routing problems. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 19, 21, 25 e 27.

SUBRAMANIAN, A.; UCHOA, E.; OCHI, L. S. A hybrid algorithm for a class of vehicle routing problems. *Computers Operations Research*, v. 40, n. 10, p. 2519–2531, 2013. Citado na página 25.

THOMPSON, P. M.; PSARAFTIS, H. N. Cyclic transfer algorithm for multivehicle routing and scheduling problems. *Operations Research*, INFORMS, v. 41, n. 5, p. 935–946, 1993. Citado na página 33.

TOTH, P.; VIGO, D. An overview of vehicle routing problems. In: TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). *The Vehicle Routing Problem*. Philadelphia: SIAM, 2002, (SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications). p. 1–27. Citado na página 33.

TOTH, P.; VIGO, D. (Ed.). *The Vehicle Routing Problem*. 2. ed. Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics (SIAM), 2014. (SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications). Citado 2 vezes nas páginas 22 e 23.