



OTIMIZAÇÃO DO DESENHO DE REDES CICLOVIÁRIAS: APLICAÇÃO NA CIDADE DO RIO DE JANEIRO

Luiara Vidal dos Santos Borges ¹

Orivalde Soares da Silva Júnior ²

Cintia Machado de Oliveira ³

¹ Instituto Militar de Engenharia

² Instituto Militar de Engenharia

³ Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca

RESUMO

A importância das redes cicloviárias como um fator atrativo para o uso de bicicletas como meio de transporte. Essas redes consistem em rotas para bicicletas, como ciclovias, ciclofaixas ou ciclorrotas, que podem ser segregadas do tráfego motorizado ou não. O objetivo da rede cicloviária é conectar os pontos de origem e destino dos ciclistas, oferecendo as rotas mais adequadas entre os pontos de interesse. O trabalho propõe um modelo matemático para otimizar o desenho dessas redes cicloviárias, aplicando-o nos bairros de Botafogo e Urca, no Rio de Janeiro. Foram identificados os polos geradores de viagens através de modelagens com SIG, utilizando o *software QGIS*. O *software AIMMS* foi empregado na aplicação do modelo matemático de otimização da rede cicloviária. Há também, argumentação a favor de uma abordagem sistêmica na seleção de projetos de infraestrutura, visando minimizar custos em relação a abordagens mais simples. O estudo recomenda aumentar a quantidade de bicicletários para tornar o sistema de transporte multimodal mais eficiente.

Palavras-chave: Bicicleta. Design de rede. Ciclovia

ABSTRACT

The importance of cycling networks as an attractive factor for the use of bicycles as a means of transportation. These networks consist of bike routes, such as bike lanes, bike paths, or bike routes, which can be separated from motorized traffic or not. The goal of the cycling network is to connect cyclists' points of origin and destination, offering the most suitable routes between points of interest. The work proposes a mathematical model to optimize the design of these cycling networks, applying it in the neighborhoods of Botafogo and Urca, in Rio de Janeiro. Travel-generating hubs were identified through GIS modeling using QGIS software. The AIMMS software was employed to apply the mathematical model for optimizing the cycling network. There is also an argument in favor of a systemic approach in selecting infrastructure projects, aiming to minimize costs compared to simpler approaches. The study recommends increasing the number of bike racks to make the multimodal transportation system more efficient.



Keywords: Bicycle. Network design. Bicycle lane.

1. INTRODUÇÃO

Em meio a tantas crises que aconteceram nos últimos anos, política, econômica, sanitária e ambiental, as cidades foram tomadas por tensões e isso refletiu na sua aparência e nas relações sociais. Segundo a Associação Nacional de Transporte Público (ANTP, 2020), o setor de transportes sofreu impactos significativos, provocados pela implantação de políticas de isolamento social, com o objetivo de conter a contaminação da população pelo vírus da Covid-19. Esse fato gerou queda na demanda do transporte público, em todos os sistemas, tanto os modais por ônibus, quanto os modais sobre trilhos, levando a impacto econômico e financeiro negativos para as empresas operadoras, a Confederação Nacional dos Transportes (CNT, 2020) diz que os prejuízos financeiros foram de 9,5 bilhões de reais.

Apesar de todos esses problemas, o isolamento social, favoreceu a utilização dos modos ativos e a bicicleta teve grande destaque. Segundo a Associação Brasileira do Setor de Bicletas (Aliança Bike, 2020) o número de bicicletas vendidas no Brasil cresceu 50% em 2020, se comparado com os dados de 2019, a expectativa do setor é que esse aumento seja mantido pelos próximos anos.

Existem alguns fatores, que podem influenciar na decisão do usuário entre escolher um modo de transporte ou outro, tais como: segurança, conforto, tempo de espera, tempo de viagem, distancia de casa até a parada/ponto de ônibus, e/ou estações de metrô/trem, infraestrutura viária, valor da tarifa.

Sendo assim, a implantação de redes cicloviárias pode ser um fator de atratividade para a utilização desse meio de transporte. As redes cicloviárias são rotas para bicicletas que podem ser definidas com ciclovias, ciclofaixas ou ciclorrotas. Esses trechos podem ser segregados do tráfego motorizado ou não. A finalidade dessas redes é conectar pontos de origem e destino dos ciclistas, oferecendo as rotas mais adequadas entre os pontos de interesse.

A finalidade desta pesquisa é sugerir um modelo matemático que otimize a configuração de redes cicloviárias. Este modelo será aplicado especificamente aos bairros de Botafogo e Urca, na cidade do Rio de Janeiro, com o intuito de integrar a rede proposta à rede já existente na cidade.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Incentivar o uso da bicicleta como modo de transporte, pode ser a forma mais econômica de facilitar o acesso da população a diversas atividades do cotidiano das cidades, como: trabalho, estudos, serviços, equipamentos públicos, lazer. Além de ser facilitador de acesso, os modos ativos fazem bem à saúde do indivíduo, pois promove a atividade física, prevenindo doenças causadas pelo sedentarismo e contribuindo para melhoria da qualidade de vida das pessoas. O uso da bicicleta também é importante para o meio ambiente, visto que é um meio de transporte, que não emite gases causadores do efeito estufa, o que pode ajudar a melhorar a qualidade do ar nas cidades.



Segundo o Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP- Brasil, 2017), entre os anos de 2002 e 2012, houve um crescimento de mais de 100% na utilização do modal de transporte individual por carros no mundo e o Brasil acompanhou essa tendência. Porém, é importante dizer que o país tem mais de 80% da população morando nas zonas urbanas, logo se faz necessária, a implementação de sistemas de transportes eficientes, integrados e que promovam sobretudo qualidade de vida para os seus habitantes.

Sendo assim, é muito importante desenvolver ferramentas, que auxiliem os gestores públicos e tomadores de decisão na escolha da melhor configuração para as redes cicloviárias. Essas ferramentas precisam ter parâmetros capazes de trazer possibilidades de maximizar a eficiência dos sistemas e minimizar os custos de implantação e manutenção.

Um estudo qualitativo realizado na região de Portland nos Estados Unidos, revelou que a principal barreira para o uso de bicicletas está relacionada às condições adversas, como altos volumes de tráfego e falta de segurança (Dill e Voros, 2007). Além disso, a falta de ciclovias ou ciclorrotas nas proximidades de suas residências e locais de trabalho é identificada como a segunda maior barreira enfrentada.

Na pesquisa realizada por (Pucher et al.,2010), sobre os impactos das intervenções para incentivar o transporte ativo por meio de bicicletas. Eles avaliaram 139 estudos e concluíram que cidades que adotaram pacotes contundentes com múltiplas intervenções experimentaram grandes aumentos no número de viagens e na proporção de usuários de bicicleta.

Li et al. (2020) propõem modelos matemáticos para otimizar sistemas de transporte multimodais que incluem bicicletas compartilhadas e transporte público em redes. Os modelos consideram diferentes grupos de demanda, opções de rota, capacidade do veículo, tempo de espera, tempo de viagem e penalidades de transbordo, com o objetivo de minimizar o custo total do sistema, incluindo o custo do passageiro e o custo do operador.

Duthie e Unnikrishnan (2014) propõem uma nova formulação para o problema de projeto de rede relacionado à adaptação da infraestrutura viária existente para bicicletas, enquanto em Oliveira et al. (2021), eles apresentam um modelo matemático para projetar redes de bicicletas que se integram aos serviços de transporte público por ônibus em áreas urbanas. O modelo maximiza 14 objetivos e 14 restrições relacionadas ao conforto do pavimento, segurança, objetividade do caminho, conectividade de rede, intermodalidade com serviço de ônibus e orçamentos.

Ambos os estudos visam otimizar o projeto de redes cicláveis por meio de modelagem matemática. Duthie e Unnikrishnan (2014) focam na adaptação da infraestrutura viária existente para bicicletas para conectar todos os pares origem-destino, enquanto Oliveira et al. (2021) visam projetar redes de bicicletas que se integrem aos serviços de transporte público por ônibus. As duas pesquisas consideram vários fatores, como custo, distância, conforto do pavimento, segurança e conectividade de rede, para otimizar o projeto de redes cicloviárias. Ao otimizar o projeto de redes cicloviárias, as cidades podem incentivar mais pessoas a escolher modos de transporte sustentáveis, levando a um sistema de transporte mais sustentável e eficiente.

Caggiani et al. (2019) propõe uma metodologia para projetar uma rede equitativa de ciclovias em áreas urbanas, levando em consideração os princípios de equidade e acessibilidade. Já Zhu et al. (2019) traz um problema de desenho de rede de ciclovias, que tem como objetivo maximizar a acessibilidade, minimizar o número de interseções, maximizar o nível de serviço de



bicicletas e minimizar o custo total de construção, sujeito a restrições de espaço-tempo e orçamento.

Na pesquisa de (Caggiani et al., 2019) a função objetivo visa minimizar as desigualdades existentes entre diferentes grupos populacionais em termos de acessibilidade às ciclovias. A metodologia proposta pode ajudar os gestores de transporte a selecionar áreas prioritárias para investimentos futuros relacionados à infraestrutura de ciclismo. É utilizado o coeficiente de Theil para avaliar a equidade na acessibilidade. Uma aplicação numérica a um estudo de caso de teste comprova as vantagens do modelo.

Caggiani et al. (2019) propõe uma abordagem de algoritmo genético para otimizar a alocação de caminhos de ciclovias em uma rede, com o objetivo de reduzir as disparidades de acessibilidade entre diferentes grupos sociais de indivíduos. Zhu et al. (2019) aborda o problema de desenho de rede de ciclovias usando um algoritmo de otimização multiobjetivo, que maximiza a acessibilidade e o nível de serviço de bicicletas, enquanto minimiza o número de interseções e o custo de construção. O estudo demonstra a viabilidade do modelo e do algoritmo de solução usando dois exemplos numéricos.

Pesshana g. et al. (2020) discutem o desenvolvimento de um índice de avaliação para ciclovias urbanas baseado em 14 critérios relacionados a aspectos sociais, técnicos e ambientais. O estudo traz a história das ciclovias no Rio de Janeiro e a necessidade de um método de avaliação mais realista adaptado às condições reais das ruas e ciclovias. O Índice de Ciclovias Viáveis (VBI), é dividido em três dimensões e seis temas e destina-se a ser usado como um instrumento prático por autoridades municipais, planejadores de transporte, engenheiros de tráfego e outros para determinar a qualidade das ciclovias. O VBI é simples e rápido de aplicar em uma ciclovia e destina-se a ser uma ferramenta útil para os órgãos gestores das ciclovias da cidade do Rio de Janeiro e seus arredores, podendo também ser utilizada em cidades com características semelhantes.

Existem diversos fatores, que podem interferir na escolha do usuário em utilizar ou não determinado modal de transporte. Na abordagem feita por (Tabib et al., 2017) é preciso levar em consideração variáveis relacionadas a conforto térmico. Na pesquisa eles analisam a viabilidade de usar uma função de demanda de calor-temperatura externa para prever a demanda de calor de longo prazo em um sistema de aquecimento urbano. Em outra etapa eles, discutem também o desenvolvimento de uma matriz de conforto para ciclistas baseada em dinâmica de fluidos computacional (CFD), para ajudar no planejamento de novas rotas de ciclismo e no desenvolvimento de projetos inteligentes de edifícios urbanos.

3. METODOLOGIA

Conforme evidenciado na literatura, a definição de uma rota otimizada considera a determinação da demanda, dos pontos de interesse e polos geradores de fluxo, caminhos mínimos e infraestruturas. Portanto, a escolha do método e do material empregados baseou-se nos estudos realizados por Duthie e Unnikrishnan (2014), onde o objetivo é conectar todos os pares origem-destino com caminhos que atendam ou excedam um limite inferior de nível de serviço de ciclismo.

Nesta etapa, o estudo exigiu a demarcação de um perímetro específico, onde foram designados dois bairros contíguos, Botafogo e Urca. A seleção desses bairros foi realizada de maneira aleatória, com o propósito de validar o modelo matemático proposto. No entanto, a



escolha das zonas de tráfego a serem analisadas dentro desses bairros foi feita levando em consideração a demanda dos usuários da região. Os dados essenciais para estabelecer essa delimitação foram obtidos do banco de dados de acesso público fornecido pela Prefeitura da cidade do Rio de Janeiro, conhecido como DataRio. Adicionalmente, foram extraídos dados georreferenciados da cidade, como o mapa com as zonas de tráfego e logradouros.

Em seguida, empregou-se o Sistema de Informações Geográficas (SIG) por meio do software QGIS, para a análise espacial. Nesse contexto, foi preciso identificar as intersecções entre os logradouros para obter os nós da rede e as conexões entre esses nós, que são os links. Após essa etapa, foi possível extrair a matriz de distâncias, que constitui a base dos dados para a obtenção das planilhas necessárias na fase de otimização da rede por meio de um software apropriado.

Nessa próxima fase, que pode ser considerada como a fase de tratamento de dados, onde é necessário construir planilhas, utilizando a matriz de distâncias obtida na fase anterior. A configuração dessas planilhas é determinada pelo software de otimização. O software utilizado nesse estudo foi o AIMMS (Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software). Nele é possível obter manual de orientação parametrização do modelo matemático e inserção dos dados através de planilhas do Microsoft Excel ou outro suporte lógico semelhante.

Após a etapa de tratamento de dados, inicia-se a fase de otimização da rede com o auxílio do software AIMMS. É imprescindível inserir todos os parâmetros descritos no modelo matemático dentro do sistema, conforme mencionado anteriormente. Para facilitar a construção, existem instruções fornecidas dentro do próprio software. Posteriormente, é necessário inserir as planilhas elaboradas na fase anterior e, em seguida, executar o modelo para obter a rede otimizada. Nesta fase, o software fornece todas as rotas possíveis dentro da rede e destaca a rota ótima de acordo com os parâmetros e restrições do modelo matemático.

A fase final consiste na análise dos resultados, na qual se identificam os arcos ou links selecionados após a otimização da rede. Dessa forma, foi possível estabelecer a rede proposta entre a origem escolhida e o destino sugerido. Isso permite a execução de análises adicionais, conforme descrito na seção de Resultados.

4. MODELO MATEMÁTICO

A configuração ótima de ciclovias, ciclofaixas ou ciclorrotas em uma determinada área urbana é um processo complexo que envolve a consideração de diversos critérios. Esses critérios incluem a minimização da distância percorrida pelos ciclistas, a maximização da conectividade entre diferentes pontos da cidade, a minimização dos conflitos com o tráfego de veículos motorizados, a maximização da segurança para os ciclistas e a otimização dos recursos disponíveis.

O modelo proposto para a configuração ótima da rede tem como premissas a minimização das distâncias e dos custos de implantação e manutenção da rede.

4.1. Conjuntos

i, j : Nós na rede

k, l : Nós

o : Nós de origem na rede

d : Nós de destino na rede

4.2 Parâmetros

lv_{ij} : Distância do arco (i, j)

LR^{od} : Distância máxima que um ciclista está disposto a pedalar de bicicleta para cobrir o par (o, d)

c_C : Custo unitário pela construção ou ampliação numa via

B_C : Orçamento para a construção das vias

c_M : Custo unitário pela manutenção numa via

B_M : Orçamento para a manutenção das vias por ano

4.3. Variáveis de decisão

$P_{ij}^{od} = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } (i, j) \text{ for selecionado para cobrir o par } (o, d) \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$

$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{se o arco } (i, j) \text{ for selecionado} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases}$

4.4. Função objetivo

$$\text{Min } Z_1 = \sum_i \sum_j lv_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

4.5. Restrições

$$\sum_i P_{oi}^{od} = 1 \quad \forall o, d \quad (2)$$

$$\sum_j P_{jd}^{od} = 1 \quad \forall o, d \quad (3)$$

$$\sum_j P_{kj}^{od} - \sum_i P_{ik}^{od} = 0 \quad \forall o, d, k \quad (4)$$

$$\sum_o \sum_d P_{ij}^{od} \leq MX_{ij} \quad \forall i, j \quad (5)$$

$$\sum_o \sum_d P_{ij}^{od} \geq X_{ij} \quad \forall i, j \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_j lv_{ij} P_{ij}^{od} \leq LR^{od} \quad \forall o, d \quad (7)$$

$$\sum_i \sum_j c_C lv_{ij} X_{ij} \leq B_C \quad (8)$$

$$\sum_i \sum_j c_M lv_{ij} X_{ij} \leq B_M \quad (9)$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \quad (10)$$

$$P_{ij}^{od} \in \{0,1\} \quad \forall o, d, i, j \quad (11)$$

A modelagem proposta visa determinar uma rede otimizada, considerando como parâmetros para decisão a menor distância entre os nós, associada ao menor custo de construção e manutenção, respeitando os limites orçamentários e a distância máxima que um ciclista está disposto a pedalar de bicicleta para sair de uma origem e chegar a um destino.

5. RESULTADOS

A cidade do Rio de Janeiro foi designada como o local para a execução de estudos experimentais. Dois bairros adjacentes, Botafogo e Urca, foram identificados como as zonas para a implementação do modelo e a execução das análises. As informações dos logradouros foram adquiridas a partir do repositório de dados abertos DataRio. Contudo, algumas vias tiveram que ser descartadas devido às suas peculiaridades topográficas. Todas as vias localizadas no Morro Dona Marta foram removidas devido à sua altimetria significativa. Conforme os dados obtidos da plataforma de mapas topográficos, a altitude mínima na área é de 3 metros, enquanto a altitude máxima atinge 565 metros. Além disso, algumas vias locais e de acesso limitado a não residentes também foram excluídas do conjunto de dados.

Para realizar a composição de custo de implantação e manutenção de ciclovias. Foi utilizando o caderno de encargos para a implementação de projetos cicloviários, versão 2014, fornecido pela entidade responsável pela gestão urbana, foi possível realizar a análise de custos



associados à construção de infraestruturas cicloviárias, incluindo ciclovias, ciclofaixas e ciclorrotas. Esta composição de custos permitiu a estimativa dos custos de manutenção, bem como a elaboração do orçamento necessário para a construção e a subsequente manutenção da rede cicloviária.

A seleção dos bairros foi conduzida com base em indicadores socioeconômicos e necessidades de transporte. O distrito da Urca, selecionado para o cenário 1, é marcado pela existência de instalações públicas que geram movimentações durante os dias úteis. Ademais, a área exibe uma demanda turística expressiva e uma diversidade de serviços proporcionados por estabelecimentos como bares e restaurantes.

Considerando tais atributos, a instalação de ciclovias emerge como uma proposta justificada, sobretudo levando em conta a oferta restrita de transporte público na região. Atualmente, o bairro é servido por somente três linhas de ônibus. A primeira linha, originária da Central do Brasil, opera com uma frequência de 15 minutos nos horários de maior movimento, entre as 7h e as 9h da manhã. A segunda linha, que tem início na estação de metrô de Botafogo, apresenta uma frequência de 30 minutos nos horários de pico entre as 7h e 9h da manhã. É interessante destacar que estas linhas não operam aos domingos. Existe também uma terceira linha, com origem em Copacana e com destino a Urca, essa tem frequência de 30 minutos nos horários citados acima para as outras linhas (TRANSPORTES, 2023).

A área em foco no segundo cenário é a Favela Santa Marta, uma comunidade estabelecida no bairro de Botafogo. Esta localidade é caracterizada pela proximidade de diversos equipamentos públicos, devido à sua localização em uma região de alta renda na cidade do Rio de Janeiro. A disponibilidade de transporte público é ampla, com o ponto de ônibus mais próximo situado a menos de um quilômetro do topo do morro. Este ponto de ônibus oferece acesso a cinco linhas de ônibus, proporcionando conexões com todas as regiões da cidade. Além disso, a estação de metrô mais próxima está a aproximadamente 5 quilômetros de distância. Devido à alta declividade da região, a Favela Santa Marta conta com um plano inclinado equipado com cinco estações.

Com base nos dados divulgados pela Fundação Getúlio Vargas, conforme apresentado no painel do FGV SOCIAL (2010), é possível analisar a renda per capita da população em geral, segmentada por bairros, bem como da população residente nas favelas. De acordo com o Censo Demográfico de 2010, a renda per capita da cidade do Rio de Janeiro era de R\$ 1.421,76. Em contraste, a renda per capita da população residente na Favela Santa Marta era de R\$ 459,00, representando aproximadamente 32% da renda média da população carioca. No entanto, na região da Urca, a renda per capita é de R\$ 3219,00, o que é 2,26 vezes maior do que a renda per capita da cidade. Diante desses cenários contrastantes, e sem desconsiderar as necessidades específicas de cada população em relação ao acesso às infraestruturas de transporte da cidade, torna-se justificável a necessidade de proporcionar acesso a esses equipamentos tanto para a população de alta renda quanto para a população de baixa renda, visando garantir a equidade de acesso a essas estruturas.

5.1. Cenário 1: Urca (Origem - Alameda Floriano Peixoto (Escola Superior de Guerra) /Destino – Ciclovia Avenida Pasteur)

A decisão pelo local específico foi tomada com base em uma análise metódica realizada in situ, levando em consideração dados relativos à disponibilidade de transporte

público (ônibus) e a proximidade de uma estação de transporte de alta capacidade (Estação Botafogo – Metrô), situada a uma distância de 3,6 km. Além disso, foram considerados dados socioeconômicos, conforme mencionado anteriormente.

A distância LR^{od} escolhida para abranger o par origem-destino (OD) foi estabelecida em 7 km, pressupondo que essa seja a distância máxima que um ciclista estaria disposto a percorrer. As vias na região são de sentido único e permitem estacionamento ao longo delas. Portanto, diante dos resultados obtidos, a configuração de via mais adequada para esse caso seriam as ciclorotas.



Figura 1: Área correspondente ao cenário 1. A origem está localizada no ponto vermelho (Escola Superior de Guerra) próximo ao nó 24. Os nós 148, 100 e 93 são os nós de destino, que é a ciclovias mais próxima existente, representada na figura pela linha azul.

Fonte: Autor

Após a inserção de todos os dados dos nós de origem-destino e nós intermediários, acompanhados das informações relativas às distâncias dos arcos lv_{ij} , custos de construção c_C , custo de manutenção c_M e estimativa de orçamento B_C e manutenção B_M , conforme Tabela 1. O resultado computacional obtido revelou a obtenção de uma rota ótima, cuja distância máxima alcançou 2252,221 metros. Nessa rota, foram selecionados nós e arcos de acordo com a Figura 2, tendo o nó 148 sido eleito como o destino ótimo.

Tabela 1: Parâmetros utilizados na otimização				
	Cc R\$/m	Cm R\$/m	Bc R\$	Bm R\$
Cenário 1	12.06	6.03	54323.57	27161.79
Cenário 2	12.06	6.03	31922.12	15961.06

Fonte: Autor



Figura 2: Rota ótima para implantação de rede cicloviária complementar. Fonte: Autor

5.2. Cenário 2: Botafogo (Origem – Favela Santa Marta /Destino – Ciclovia Rua Mena Barreto)

A escolha pelo ponto foi realizada baseada em dados de oferta de transporte público (ônibus) e com a distância aproximada de 2 km ao transporte de alta capacidade (Estação Botafogo – Metrô). E novamente, foram considerados dados socioeconômicos, conforme mencionado anteriormente.

A distância LR^{od} selecionada para abranger o par de origem-destino (OD) foi de 7 km, conforme adotado. No entanto, é importante ressaltar que na área correspondente ao Morro Dona Marta, encontra-se um aglomerado urbano denominado de favela Santa Marta. Conforme mencionado anteriormente, essa região é caracterizada por uma topografia acentuada, o que inviabiliza a implementação de uma ciclovia, sendo possível apenas a implantação a partir da parte mais baixa da comunidade.

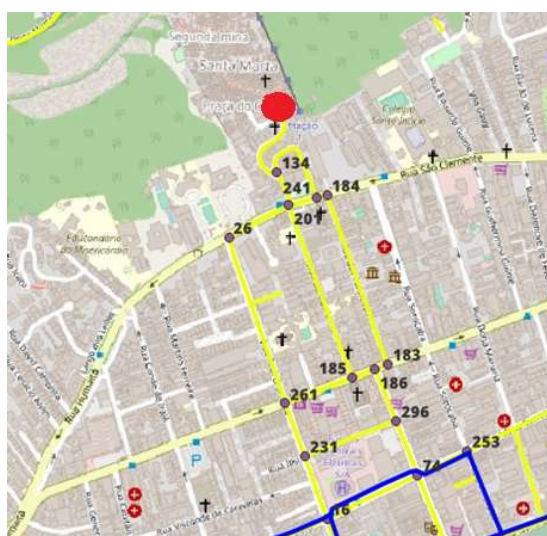


Figura 3: Área correspondente ao cenário 2. A origem está localizada no ponto vermelho próximo ao nó 134. Os nós 16, 74 e 253 são os nós de destino. A ciclovia existente está indicada em azul. Fonte: Autor

Definido todos os parâmetros de lv_{ij} , custos de construção c_C , custo de manutenção c_M e estimativa de orçamento B_C e manutenção B_M , conforme Tabela 1. Foi obtido um

resultado computacional que revelou uma rota ótima, com uma distância máxima de 1323,471 metros. Nesse trecho, foram selecionados nós e arcos conforme ilustrados na Figura 4, sendo o nó 74 eleito como o destino ótimo.



Figura 4: Rota ótima para implantação de rede cicloviária complementar.
Fonte: Autor

6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Este trabalho se propõe a investigar a concepção de uma rede cicloviária otimizada, com o objetivo de minimizar os custos envolvidos em sua implantação e manutenção. Para atingir tal fim, foi empregado um modelo matemático que visa identificar a rota mais eficiente entre as origens e destinos desejados, considerando os nós e arcos da rede. Importante ressaltar, no entanto, que as decisões referentes à implantação de uma rede cicloviária não se restringem apenas à análise matemática. Devem também incorporar outros fatores técnicos que podem ser integrados à modelagem matemática, mas que igualmente podem constituir ferramentas autônomas para a tomada de decisão, independentemente dos resultados obtidos na modelagem.

Analisando alguns resultados apresentados, pode-se observar que o modelo matemático proposto foi executado conforme o esperado. Várias interações foram realizadas desde a origem até atingir a distância máxima ótima. No segundo cenário, o software AIMMS realizou 18 interações para encontrar o caminho ótimo de implantação da rede cicloviária integrada a rede existente, seguindo os parâmetros e restrições propostos.

A distância máxima ótima do primeiro cenário, com início na Alameda Floriano Peixoto na Urca, ligando com a rua João Luiz Alves, depois passando pela Alameda Gomes Pereira e reconectando com a rua João Luiz Alves, seguindo em frente entrando no Mal. Rua Cantuária e chegando na Avenida Pasteur via Avenida Portugal, foi determinado através do modelo matemático proposto. No entanto, existem fatores técnicos que podem dificultar a implementação dessa rota otimizada. Um fator que pode ter importância, na tomada de decisão, é o sentido da via, principalmente para ciclorrotas, onde é recomendado que o ciclista trafegue no mesmo sentido da via. Em alguns casos, a malha cicloviária proposta pode conflitar com o sentido do fluxo do tráfego, dificultando a implantação do percurso sugerido.



O modelo sugerido fornece suporte econômico e financeiro com a finalidade de reunir informações para a construção da rede cicloviária mais eficiente possível. É importante ressaltar que é possível incorporar mais parâmetros para a análise da rede ideal, incluindo aspectos relacionados à segurança viária, ao conforto do ciclista e à localização de facilidades, como estações de compartilhamento de bicicletas e bicicletários.

É aconselhável a elaboração de novos cenários de análise, em particular cenários mais descentralizados, que abranjam outras áreas dos bairros sugeridos e outras zonas da cidade, com o objetivo de integrar toda a rede cicloviária do Rio de Janeiro. Isso pode ser alcançado através da análise e proposta de pontos de integração com outros modais de transporte da cidade, utilizando as demandas de uso do transporte público e privado.

Referências Bibliográficas

ANTP, NTU E FÓRUM NACIONAL DE SECRETÁRIOS DE TRANSPORTES (2020) **Medidas emergenciais no transporte público: Estado de calamidade pública (Covid-19)**. São Paulo, SP, Brasil, 28 mar. 2020. <<http://files.antp.org.br/slideshow/medidas-gov-federal-transporte-publico--corona-virus.pdf>> Acesso em: 11/04/2023

CAGGIANI, Leonardo *et al.* An urban bikeway network design model for inclusive and equitable transport policies. **Transportation Research Procedia**, v. 37, p. 59-66, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.trpro.2018.12.166>.

DILL, Jennifer; VOROS, Kim. Factors Affecting Bicycling Demand. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, [S.L.], v. 2031, n. 1, p. 9-17, jan. 2007. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.3141/2031-02>.

DUTHIE, Jennifer; UNNIKISHNAN, Avinash. Optimization Framework for Bicycle Network Design. **Journal Of Transportation Engineering**, v. 140, n. 7, jul. 2014. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)te.1943-5436.0000690](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)te.1943-5436.0000690).

INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO (ITDP-Brasil). **Guia de Planejamento Cicloinclusivo**. 2017. Disponível em: <https://itdpbrasil.org/guia-cicloinclusivo/>. Acesso em: 12 abr. 2023.

OLIVEIRA, Stefano P. de *et al.* Design of a Bike-Bus Network for a City of Half a Million Citizens. **Journal Of Urban Planning And Development**, 2021. American Society of Civil Engineers (ASCE). [http://dx.doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000709](http://dx.doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000709).

PESSHANA, G; ROMANEL, C; NOVO, J. An Index for Evaluation for Urban Bicycle Lanes. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, Rio de Janeiro, v. 503, n. 1, p. 012001, maio 2020. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/503/1/012001>.

PUCHER, John; DILL, Jennifer; HANDY, Susan. Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: an international review. **Preventive Medicine**, [S.L.], v. 50, p. 106-125, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ypmed.2009.07.028>.

TABIB, Mandar V.; RASHEED, Adil; UTENG, Tanu Priya. Methodology for assessing cycling comfort during a smart city development. **Energy Procedia**, [S.L.], v. 122, p. 361-366, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.286>.



TRANSPORTE RIO. **Subsidio**. 2023. Disponível em: <https://transportes.prefeitura.rio/subsidio/>. Acesso em: 9 nov. 2023.

XIN LI, YUE LUO, TIANQI WANG, PENG JIA, HAIBO KUANG. An integrated approach for optimizing bi-modal transit networks fed by shared bikes. **Journal of the Transportation research, 2020**.

ZHU, Siying *et al*. Multi-objective bike-way network design problem with space–time accessibility constraint. **Springer Science+Business Media, Llc, Part Of Springer Nature**, Singapore, jun. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11116-019-10025-7>