



Campus São Mateus  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO



## PLANEJAMENTO URBANO E MOBILIDADE: AVALIAÇÃO DE UMA PROPOSTA DE INFRAESTRUTURA VIÁRIA EM JUAZEIRO DO NORTE

URBAN PLANNING AND MOBILITY: EVALUATION OF A ROAD INFRASTRUCTURE PROPOSAL IN JUAZEIRO DO NORTE

PLANIFICACIÓN URBANA Y MOVILIDAD: EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA DE INFRAESTRUTURA VIAL EN JUAZEIRO DO NORTE

João Evangelista Dantas dos Santos<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia de Transportes

<sup>1\*</sup> [joaovangelista@det.ufc.br](mailto:joaovangelista@det.ufc.br)

### ARTIGO INFO.

Recebido: 25.05.2024

Aprovado: 15.07.2024

Disponibilizado: 15.07.2024

**PALAVRAS-CHAVE:** Simulação de Tráfego; Gestão Pública; Tempo de Viagem; Velocidade Média; Planejamento Urbano.

**KEYWORDS:** Traffic Simulation; Public Management; Time of travel; Average speed; Urban planning.

**PALABRAS CLAVE:** Simulación de tráfico; Gestión pública; Tiempo de viaje; Velocidad de promedio; Planificación urbana.

\*Autor Correspondente: Santos, J. E. D. dos.

### RESUMO

O estudo focou na análise da substituição de determinadas infraestruturas viárias em Juazeiro do Norte, Ceará, conforme proposta do Plano Diretor Municipal, visando melhorar o fluxo e a segurança viária. A pesquisa teve como objetivo verificar a proposta do poder público de substituir um plano semafórico por uma rotatória, com simulações realizadas no software AIMSUN. O método utilizado combinou análises quantitativas e qualitativas para avaliar os efeitos dessa mudança além de coletar dados sobre emissão de CO<sub>2</sub>, velocidade média e tempo de viagem. A análise qualitativa incluiu observações detalhadas do comportamento do tráfego sob diferentes cenários de implementação, enquanto os resultados quantitativos mostraram que a substituição de semáforos por rotatórias pode melhorar o fluxo de tráfego e reduzir congestionamentos, além de aumentar a segurança viária. No entanto, a implementação de certas medidas sem um planejamento adequado pode não alcançar os benefícios esperados, exigindo adaptações contínuas durante os testes. Conclui-se que um planejamento urbano integrado e sustentável, baseado em dados empíricos e análises técnicas detalhadas, é crucial. Isso requer investimentos contínuos em infraestrutura viária, modernização das facilidades e oferta de transporte público, entre outras medidas essenciais para promover uma mobilidade urbana eficiente, segura e sustentável.

### ABSTRACT

The study focused on the analysis of the replacement of certain road infrastructures in Juazeiro do Norte, Ceará, as proposed by the PDM, aiming to improve flow and road

safety. The research aimed to validate the proposal of the public power to replace a semaphore plan with a roundabout, with simulations made in Aimsun software. The method used combined quantitative and qualitative analyzes to evaluate the effects of this change in addition to collected data on CO<sub>2</sub> emission, average speed and travel time. Qualitative analysis included detailed observations of traffic behavior under different implementation scenarios, while quantitative results showed that the replacement of traffic lights with roundabouts can improve traffic flow and reduce congestion, and increase road safety. However, implementing certain measures without proper planning may not achieve the expected benefits, requiring continuous adaptations during tests. It was concluded that an integrated and sustainable urban planning, based on empirical data and detailed technical data, which should force continuous investments in road infrastructure and modernization of facilities for the supply of public transportation and other measures that are essential to promote mobility, which are crucial that should force continuous investments that are essential to promote mobility. Efficient, safe and sustainable urban.

### RESUMEN

El estudio se enfocó en analizar la sustitución de infraestructuras viales en Juazeiro do Norte, Ceará, según propuesto por el PDM, con el fin de mejorar el flujo y la seguridad vial. Validó la propuesta de reemplazar un semáforo por una rotonda utilizando simulaciones en AIMSUN. Utilizando análisis cuantitativos y cualitativos combinados, se evaluaron los efectos del cambio, considerando datos sobre emisión de CO<sub>2</sub>, velocidad promedio y tiempo de viaje. El análisis cualitativo observó el comportamiento del tráfico en diferentes escenarios de implementación, mientras que el cuantitativo indicó que las rotondas pueden mejorar el flujo, reducir la congestión y aumentar la seguridad vial. Sin embargo, implementar medidas sin planificación adecuada puede no alcanzar los beneficios esperados, requiriendo ajustes continuos durante las pruebas. Se concluyó que una planificación urbana integrada y sostenible, basada en datos empíricos y técnicos, es crucial para promover la movilidad y requiere inversiones continuas en la infraestructura vial y la modernización del transporte público.

## INTRODUÇÃO

A qualidade das malhas viárias municipais desempenha um papel crucial na fluidez do tráfego e no bem-estar dos cidadãos. No entanto, muitos municípios enfrentam desafios significativos em relação à deficiência de suas infraestruturas viárias, resultando em dificuldades diárias no trânsito. Esta deficiência pode se manifestar de diversas formas, incluindo estradas deterioradas, vias congestionadas, falta de sinalização adequada, e planejamento urbano inadequado (Carvalho, 2000).

De acordo com o Plano Diretor Municipal (PDM) de Juazeiro do Norte, em muitas cidades, como é o caso de Juazeiro do Norte, CE, as condições das rodovias e vias urbanas frequentemente não conseguem acompanhar o ritmo do crescimento populacional e do aumento do número de veículos. Como resultado, os moradores enfrentam congestionamentos frequentes, atrasos nas viagens, aumento do tempo de deslocamento e, em alguns casos, condições perigosas de tráfego (PDM, 2023). Além disso, a falta de investimentos adequados em infraestrutura viária pode impactar negativamente a economia local, reduzindo a eficiência do transporte de mercadorias e serviços, e limitando o acesso a áreas comerciais e industriais. Essas deficiências na malha viária também podem afetar a qualidade de vida dos residentes, aumentando o estresse relacionado ao trânsito, a poluição do ar e os acidentes rodoviários (Santos, 2013).

Diante desse cenário, torna-se imperativo que sejam desenvolvidas propostas e iniciativas para melhorar as condições de tráfego e a infraestrutura viária dos municípios, visando promover uma mobilidade urbana mais eficiente, segura e sustentável (Santos & Oliveira, 2020). Neste contexto, este estudo se propõe a analisar, em específico, um trecho da malha viária de Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil, que é alvo de proposta de melhoria por parte do poder público da cidade com o objetivo de modificar sua infraestrutura, substituindo um plano semaforico por uma rotatória, conforme descrito no PDM (2023), medida que vem sendo amplamente adotada na cidade em diversos locais definidos como gargalos, como solução mitigadora dos problemas de tráfego enfrentados cotidianamente pelos cidadãos usuários do sistema de transporte particular, coletivo e de bens.

Deste modo, este trabalho tem como objetivo analisar a substituição de infraestruturas em um determinado trecho específico a fim de validar a proposta mencionada no referido documento elaborado pelos tomadores de decisão do município. Com essa análise, espera-se identificar as principais lacunas da proposta inicial com o intuito de promover um olhar mais científico sobre as decisões tomadas pelos gestores, buscando alertar sobre a necessidade de um estudo mais profundo da mobilidade urbana tornando-a mais eficiente, segura e sustentável na região.

## REVISÃO DA LITERATURA

### UM BREVE CENÁRIO DO TRÂNSITO BRASILEIRO

O trânsito no Brasil enfrenta uma série de desafios que afetam diretamente a mobilidade urbana, a segurança viária e a qualidade de vida dos cidadãos. São muitos os problemas enfrentados, como: congestionamentos, acidentes de trânsito, falta de infraestrutura adequada e deficiências no transporte público (Silva, 2019). Além disso, discute-se o papel das políticas públicas e das medidas de planejamento urbano na busca por soluções para esses desafios, bem como as perspectivas futuras para a melhoria da mobilidade e da segurança viária no país (Almeida, 2020).

O trânsito é uma questão central para as cidades brasileiras, influenciando diretamente a qualidade de vida de seus habitantes e o desenvolvimento socioeconômico do país como um todo (Carvalho, 2018).

No entanto, o cenário do trânsito no Brasil é marcado por uma série de desafios que impactam negativamente a mobilidade urbana e a segurança viária (Gomes, 2021). As grandes cidades brasileiras enfrentam congestionamentos crônicos, resultantes do aumento do número de veículos nas ruas, da falta de investimentos em infraestrutura viária e do planejamento urbano inadequado (Pereira, 2017). Os congestionamentos não apenas aumentam o tempo de deslocamento dos cidadãos, mas também contribuem para o aumento da poluição do ar e do estresse no trânsito (Santos, 2022).

O Brasil figura entre os países com altas taxas de acidentes de trânsito, causando milhares de mortes e ferimentos a cada ano (Oliveira, 2020). As principais causas desses acidentes incluem o desrespeito às leis de trânsito, a imprudência dos condutores, a falta de infraestrutura segura e a má conservação das vias (Martins, 2019). Muitas cidades brasileiras enfrentam uma deficiência de infraestrutura viária, com ruas e estradas mal conservadas, falta de sinalização adequada, ausência de faixas exclusivas para transporte público e ciclovias insuficientes (Ferreira, 2021). Isso dificulta a fluidez do tráfego e aumenta o risco de acidentes (Costa, 2018). O transporte público no Brasil enfrenta uma série de problemas, incluindo superlotação, frota obsoleta, má qualidade dos serviços e falta de integração entre os diferentes modais (Rodrigues, 2020). Isso resulta em viagens desconfortáveis e pouco atrativas para os usuários, incentivando o uso do transporte individual e contribuindo para os congestionamentos (Lima, 2022).

#### PERSPECTIVAS E POSSÍVEIS SOLUÇÕES

Para Banister (2008), enfrentar esses desafios, é necessário um conjunto de medidas integradas que abordem tanto a infraestrutura viária quanto o transporte público. Isso inclui o investimento em infraestrutura, a melhoria do transporte público, a educação no trânsito, e o planejamento urbano sustentável. Segundo o autor, um sistema de transporte sustentável deve integrar esses diferentes aspectos para alcançar uma mobilidade urbana eficiente e ambientalmente amigável.

Segundo Litman (2013), é fundamental investir na expansão e melhoria da infraestrutura viária, com a construção de novas vias, melhorias na sinalização e na segurança das estradas, e a implementação de faixas exclusivas para transporte público e ciclovias. De acordo com o autor, investimentos em infraestrutura viária são essenciais para melhorar a eficiência do transporte e reduzir os congestionamentos, ao mesmo tempo em que promovem a segurança dos usuários das vias. Se faz necessário investir na modernização e ampliação do transporte público, com a renovação da frota, a implantação de sistemas de bilhetagem eletrônica e a integração entre os diferentes modais, visando tornar o transporte público mais eficiente, confortável e acessível para a população. Glaeser (2011) argumenta que a modernização do transporte público é crucial para reduzir a dependência do automóvel e promover a inclusão social, proporcionando um meio de transporte acessível a todos.

Para Peden et al. (2004), a promoção da educação no trânsito é fundamental para conscientizar os cidadãos sobre a importância do respeito às leis de trânsito, da prudência ao volante e do compartilhamento responsável das vias. De acordo com os autores, a educação no trânsito é uma ferramenta essencial para reduzir acidentes e fatalidades, promovendo uma cultura de segurança entre os usuários das vias. O planejamento urbano deve priorizar o desenvolvimento de cidades mais sustentáveis e humanas, com o incentivo ao transporte coletivo, ao uso da bicicleta e à mobilidade ativa, além da redução da dependência do transporte individual motorizado. Jacobs (1961) defende que o planejamento urbano focado em sustentabilidade e qualidade de vida melhora não apenas a mobilidade, mas também a coesão social e a saúde pública, criando ambientes urbanos mais agradáveis e habitáveis.

## METODOLOGIA

Este capítulo descreve os procedimentos metodológicos adotados para a realização da pesquisa, que combina análise quantitativa e qualitativa para avaliar os efeitos da futura implementação de propostas em um trecho específico do trânsito de Juazeiro do Norte, utilizando simulações realizadas no software AIMSUN. A presente pesquisa se baseia em um estudo exploratório de caso, conforme proposto por Pereira et al. (2018). O estudo foi desenvolvido com o intuito de identificar melhorias nos processos de tráfego por meio da implementação de propostas específicas em um trecho determinado da cidade.

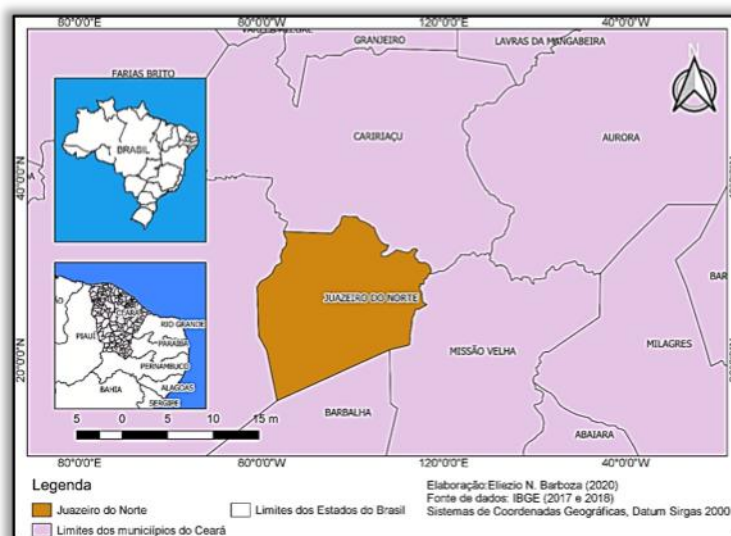
Para a coleta de dados quantitativos, foram utilizadas métricas emissão de CO<sub>2</sub>, velocidade média e tempo de viagem. Esses dados foram obtidos diretamente das simulações realizadas no AIMSUN, e a sua análise quantitativa dos dados foi feita por meio de estatística descritiva como, por exemplo, média e desvios padrão, visando fornecer uma compreensão clara e objetiva dos resultados numéricos. Além disso, a análise qualitativa foi realizada por meio de observações detalhadas das simulações e do comportamento do tráfego sob diferentes cenários de implementação das propostas. Esta abordagem qualitativa foi complementada por uma análise visual dos mapas gerados pelas simulações no AIMSUN, permitindo uma avaliação profunda das melhorias no processo de tráfego e das vantagens da implementação das propostas estudadas.

As propostas foram implementadas em diferentes fases da simulação, permitindo uma avaliação comparativa de seus impactos no sistema de tráfego. Cada fase da implementação foi cuidadosamente monitorada e os resultados foram analisados de forma a identificar as melhorias alcançadas e os desafios enfrentados durante o processo.

## LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi conduzido em Juazeiro do Norte, Ceará, região metropolitana do Cariri, Sul do estado do Ceará (7°12'47"S e 39°18'55"W), utilizando simulações de tráfego como método de avaliação. A escolha deste método permitiu a combinação de análise quantitativa e qualitativa, essencial para uma abordagem abrangente dos efeitos das propostas implementadas. A simulação de tráfego foi realizada utilizando o software AIMSUN, ferramenta reconhecida por sua capacidade de modelar e simular sistemas de transporte de forma detalhada e precisa.

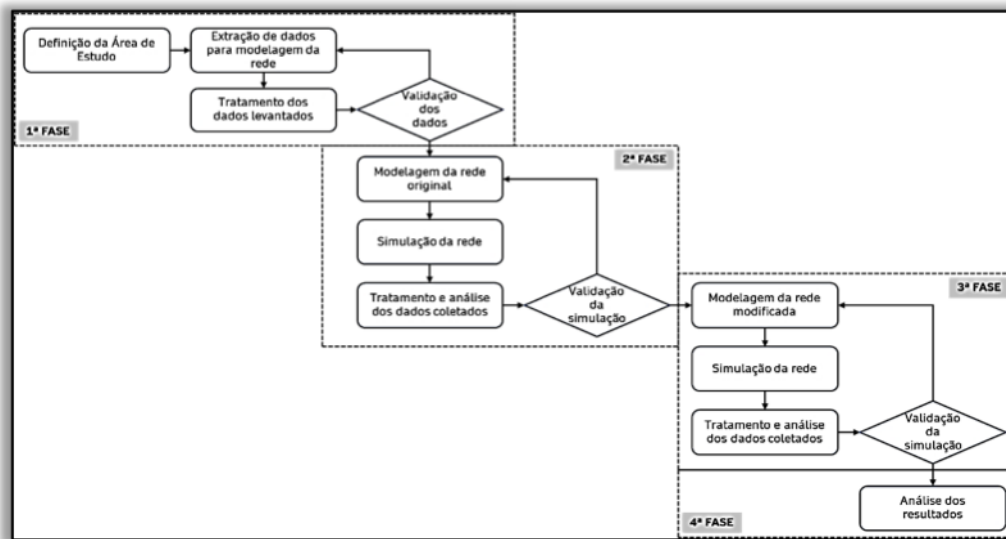
**Figura 05.** Mapa do município estudado, Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil



Fonte: Moraes et al., (2020).



Figura 07. Fluxograma da proposta metodológica adotada para este estudo



Fonte: Autor (2024).

Inicialmente realizou-se uma avaliação subjetiva para identificar a área mais relevante e que demandava intervenção no tráfego, considerando aspectos como congestionamento, segurança viária e fluxo de veículos. Após a seleção da área de estudo, utilizou-se o Open Street Map, uma plataforma especializada em dados geoespaciais e informações de trânsito, para obter dados detalhados da região selecionada. Essa plataforma fornece mapas interativos e dados de alta qualidade essenciais para análises de tráfego. Os dados obtidos no Open Street Map foram importados para o software AIMSUN Next, versão 24.0.0, sendo este amplamente reconhecido por sua capacidade de simulação de tráfego e análise de redes viárias, possibilitando a delimitação da rede viária da área de estudo e a realização de simulações detalhadas de diferentes cenários de tráfego.

Em seguida, foram realizadas simulações computacionais para avaliar o desempenho do tráfego na área de estudo, quantificando parâmetros como emissão de CO<sub>2</sub>, velocidade média e tempo de viagem (Muñuzuri & Gonzalez-Feliu, 2013; Chen et al., 2018; XU et al., 2022; Yilmaz et al., 2022). Esses dados foram fundamentais para compreender a situação atual do trânsito e identificar possíveis melhorias, assim, foram coletados os dados referentes à situação atual do trânsito na área de estudo, gerando novas planilhas com base nas mudanças propostas a fim de comparar os resultados obtidos com as simulações de diferentes cenários de intervenção no tráfego. Além disso, por não possuir informações suficientes sobre o comportamento dos motoristas, os parâmetros de calibração mantiveram-se em configuração *default*, os dados de viagem na rede foram obtidos através do acesso ao PDM de Juazeiro do Norte, Ceará, Brasil.

Para o processo de simulação, como existem poucas informações disponíveis sobre a distribuição dos fluxos na rede pela incompleta disponibilidade de dados sobre as viagens e definição das zonas produtoras e atratoras dessas viagens, foi proposto que o software trabalhasse com a alocação dinâmica do tráfego aplicando o algoritmo A\* (A-Star) para roteirização. A formulação desse algoritmo de decisão de rota no Aimsun Next compreende de realizar a simulação  $N$  vezes e registrar os custos dos links para cada link  $j$  em cada intervalo de tempo  $t, t+1, \dots, L$ . Aqui,  $L$  é calculado como  $T/t$ , onde  $T$  é o horizonte de simulação e  $t$  é o intervalo de tempo definido pelo usuário para atualizar caminhos e fluxos de tráfego, definido neste trabalho a cada 15 minutos.

Em cada iteração  $n$ , os custos dos links registrados na iteração anterior ( $n-1$ ) são utilizados para estimar os custos esperados dos links na iteração atual. Considerou-se  $S_a^{jl}(v)$  como o custo atual do link  $a$  com fluxo  $v$  na iteração  $l$  da replicação  $j$ . Desse modo, foram determinadas cinco replicações da rede variando suas sementes, isto é, definido a aleatoriedade das variáveis de alimentação do tráfego na rede. Dessa forma, os custos médios dos links para os futuros intervalos de tempo ( $L-l$ ), baseados nos custos dos links observados nas replicações anteriores ( $j-1$ ), são calculados da seguinte maneira:

$$\bar{S}_a^{j,l+i}(v) = \left(\frac{1}{j-l}\right) \sum_{m=1}^{j-l} S_a^{m,l+i}(v); i = 1, \dots, L - 1 \quad (1)$$

O "custo estimado" do link pode então ser calculado da seguinte forma:

$$\tilde{S}_a^{j,l+i}(v) = \sum_{i=0}^{L-1} \alpha_i \bar{S}_a^{j,l+i}(v); \text{ onde } \sum_{m=1}^{j-l} \alpha_i = 1; \alpha_i > 0; \forall i \quad (2)$$

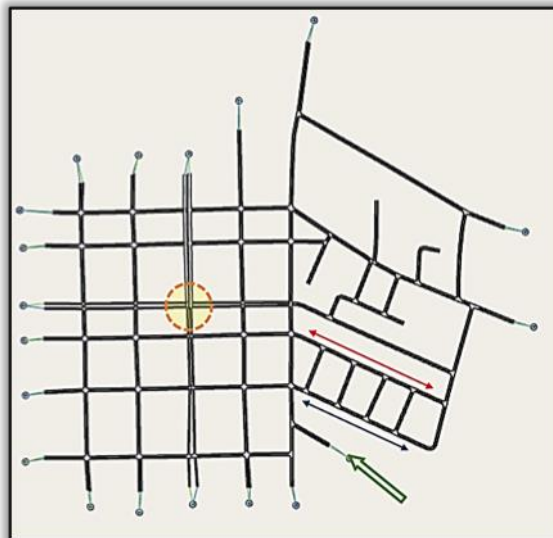
O custo associado ao caminho  $k$  para o  $i$ -ésimo par de origem-destino (OD) é determinado por:

$$\tilde{S}_k(h^{l+1}) = \sum_{a \in A} \tilde{S}_a^{j,l+1}(v) \delta_{ak} \quad (3)$$

onde,  $\delta_{ak} = 1$ , isso se o link  $a$  for pertencente ao caminho  $k$ , caso contrário será igual a 0.

Em resumo, a simulação baseada nas equações fornecidas permite uma análise detalhada e precisa das condições de tráfego, considerando a variabilidade e adaptando-se dinamicamente às mudanças. Isso é essencial para avaliar e implementar propostas de melhorias de maneira informada e eficaz, garantindo uma gestão de tráfego mais eficiente e a melhoria contínua da rede viária. Desse modo, ainda que não se tenha dados reais sobre a alocação do tráfego nessa região, a aplicação do referido algoritmo estabelece certa aleatoriedade na distribuição dos veículos na rede a partir da percepção dos custos como citados acima. A Figura 08 apresenta a rede sem alteração, após a importação do OpenStreetMap, aberta no AIMSUN Next.

**Figura 08.** Rede viária da área de interesse modelada no Software AIMSUN em sua condição original

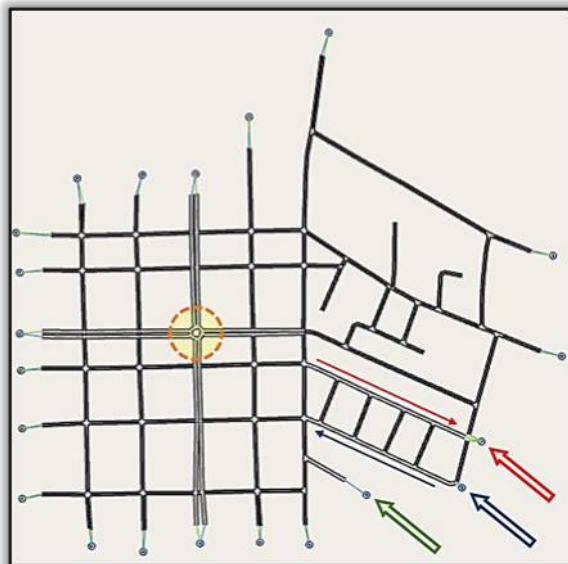


Fonte: Autor (2024)

Os centroides identificados na rede representam os pares Origem-Destino que promovem a geração e a atração de viagens dentro da rede. As marcações em cores dentro da rede indicam as áreas de observação deste estudo. Na indicação do círculo em amarelo, próximo ao centro do mapa, representa onde a rotatória proposta será instalada e onde atualmente está instalado o semáforo de quatro tempos, as linhas bidirecionais na cor azul e vermelho indicam as ruas que terão sentido único ao sul e norte, respectivamente, e a seta em verde, indica a rua que terá sentido único ao norte.

Posteriormente, com a modificação sendo realizada na rede, foram acrescentados dois centroides com fluxo inferior à capacidade das vias apenas a fim de dar volume à rede especificamente nestes locais e observar o comportamento do tráfego com o objetivo de validar a mudança proposta, uma vez que, com já informado, não dados que possam fundamentar com precisão o estudo em questão. A Figura 09 a seguir ilustra essa alteração.

**Figura 09.** Rede viária da área de interesse modelada no Software AIMSUN após a alteração conforme proposta em PDM



Fonte: Autor (2024)

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na cidade objeto de estudo deste artigo, percebe-se que a implementação de medidas paliativas tem se tornado comum e sem qualquer percepção de melhoria frente aos problemas e desafios aos quais tais melhorias são tidas como soluções mitigadoras. Um exemplo disso, são as contantes modificações de infraestrutura quem vêm acontecendo em determinadas interseções semaforizadas, em que são substituídas por rotatórias sem qualquer estudo prévio aparente. O que comumente tem sido feito é a demarcação da área com sinalizações utilizando cones, marcações no asfalto, desligamento total dos semáforos e a permissão do fluxo livre de veículos e demais usuários a fim de se observar o comportamento dos motoristas frente à nova possibilidade de infraestrutura.

Relata-se que no decorrer desses “testes”, percebe-se a alteração dessas sinalizações e marcações na pista a conforme é observado o comportamento dos motoristas quanto a realização das conversões e manobras para desvias desses obstáculos montados na via, quanto dos demais veículos uma vez que os semáforos foram desligados e agora o fluxo está permitido de forma contínua. Isso remonta a reprodução de tentativas e erros até que se observe a melhor configuração para a rotatória e assim dimensiona-la para, em seguida, ser implementada.

Inicialmente esse procedimento foi adotado em três cruzamento semaforizados em uma avenida que possui um fluxo intenso de veículos de pequeno e grande porte, ciclistas e pedestres, já que nas imediações estão localizadas duas escolas públicas, a delegacia da Polícia Federal, as instalações da Receita Federal, duas igrejas, e o estádio Arena Romeirão. A Figura 10 a seguir ilustra exatamente os locais que já receberam a nova infraestrutura conforme projetado e planejado no PDM.





**Figura 12.** Implementação da rotatória após diagnóstico realizado pelo departamento municipal de trânsito



Fonte: Adaptado de Google Maps (2024).

Com esse registro é possível observar os conflitos que são gerados pelos usuários, motorizados ou não, quanto ao uso e compartilhamento do espaço viário. Feita essa implementação, é possível notar hoje que determinados veículos como ônibus e caminhões, por exemplo, possuem dificuldade para realizar certas conversões à direita ou esquerda sem que toquem a praça central da rotatória, como pode ser visto no compilado de registros realizados apresentados na Figura 13.

**Figura 13.** Registro do contato dos veículos de grande porte na praça central da rotatória como consequência a realização de conversões à direita ou à esquerda



Fonte: Adaptado do Google Maps (2024).

O mal planejamento e elaboração do projeto dessas infraestruturas pode acabar acarretando em novos problemas ou acentuando, contribuindo, para que problemas existentes se tornem ainda mais difíceis de resolver sem um a realização de um estudo prévio adequado a necessidade da região ou do local de implementação. Esse trecho em questão é amplamente acessado por usuários de diversas zonas e macrozonas do município, além do tráfego fluente proveniente de outros municípios vizinhos que acessam Juazeiro do Norte em busca de serviços variados, produtos e/ou passeio. Este trabalho visualiza como uma das principais contribuições a realização de uma das etapas que a autarquia municipal de trânsito não efetuou durante o processo de estudo de implementação dessas infraestruturas, que é a de simulação e validação da medida mitigadora projetada.

Não se pensou inicialmente na realização de uma etapa de diagnóstico do problema antes da implementação das rotatórias, uma vez que demandaria recursos financeiros e de pessoal, além de tempo para coleta e análise dos dados. Devido a limitação orçamentária e de pessoal do grupo de pesquisa, todo o esforço foi direcionado à simulação quanto à implementação de uma nova rotatória prevista para um ponto diferente da cidade, mas que possui as mesmas características desses relatados

anteriormente. A finalidade desse esforço em questão é a de validar se a mesma medida a ser adotada pela autarquia municipal de trânsito, e que está prevista para ser implementada ainda nesse ano de 2024, poderá surtir um bom efeito ou não.

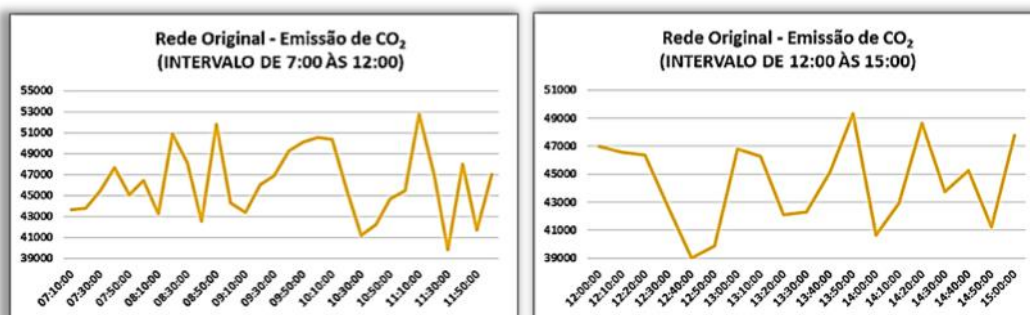
Os resultados forneceram uma análise comparativa entre a avaliação do trecho antes e após a implementação de medidas que incluem a criação de uma rotatória, a reversão de sentido em duas vias e o alargamento da Avenida Castelo Branco. Os parâmetros examinados compreendem da emissão de CO<sub>2</sub>, velocidade média e tempo de viagem.

### EMIÇÃO DE CO<sub>2</sub>

Para a emissão de CO<sub>2</sub>, o AIMSUN possui três modelos ambientais: um de consumo de combustível e dois de emissão de poluentes. Um desses modelos calcula as emissões de CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, PM<sub>10</sub> e VOC com base na velocidade e aceleração dos veículos, usando uma fórmula de Panis et al. (2006). Os parâmetros de calibração são definidos pelo usuário para cada tipo de veículo e poluente, e a emissão total é obtida integrando as emissões instantâneas ao longo das viagens dos veículos.

O Gráfico 01 apresenta que, no intervalo de tempo das 7:00 às 15:00, o pico máximo de emissão de carbono ocorre aproximadamente entre 11:00 e 11:10, atingindo um valor de 52.788,03 ppm. Isso indica que, em um milhão de partes de ar, 52.788,03 partes são de CO<sub>2</sub>. Em ambientes de trânsito, é mais comum a monitoração e controle de outros poluentes atmosféricos, como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO) e material particulado (PM). Contudo, concentrações elevadas de CO<sub>2</sub> podem servir como um indicador indireto de poluição do ar e de qualidade do ar insatisfatória, uma vez que altos níveis de CO<sub>2</sub> estão frequentemente associados a má ventilação e à acumulação de poluentes.

**Gráfico 01.** Comparativos dos resultados das emissões de CO<sub>2</sub>: Rede sem modificação – Período manhã (a) e tarde (b)



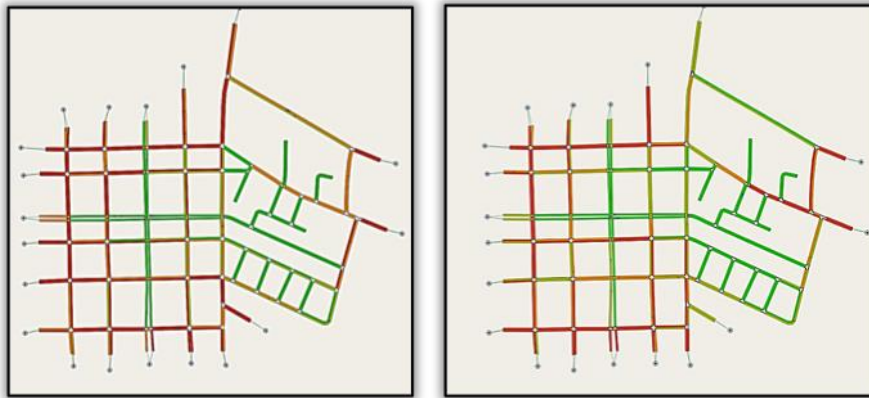
Fonte: Autor (2024).

Uma análise visual de uma média global do fluxo na rede, revelou que o semáforo identificado desempenha um papel importante na regulação do fluxo de tráfego na rede viária. As vias próximas ao semáforo apresentam um fluxo mais equilibrado, o que sugere que a sinalização semafórica está contribuindo para distribuir o tráfego de forma eficiente. Desta forma, a Figura 06 ilustra esse resultado visualmente da simulação tanto período da manhã (à direita) e tarde (esquerda). Além disso, percebe-se uma diferença sutil nas intensidades do fluxo nesta comparação que também é refletida no Gráfico 01, onde no período da manhã é possível notar uma maior presença de valores máximos atingindo valores superiores aos dos registrados no período da tarde.

Os picos de emissão de poluentes se dão pelo intenso fluxo de veículos nas vias (Figura 14), no local onde o semáforo está localizado o impacto das emissões pode não ser significativo, mas ele pode ser a

justificativa para o impacto nas imediações ao ser percebido como uma impedância para os veículos simulados, entendendo que esse elemento da via. Com relação à imagem, as vias na cor vermelha indicam que o fluxo do tráfego é intenso ultrapassando o seu ponto de saturação, isto é, nessas vias o nível de congestionamento é acentuado indicando perda do seu desempenho. As cores em tons mais claros como verde ou amarelo, indicam que a via apresenta um fluxo livre, sem congestionamento, ou com início de saturação, reduzindo sua capacidade gradativamente.

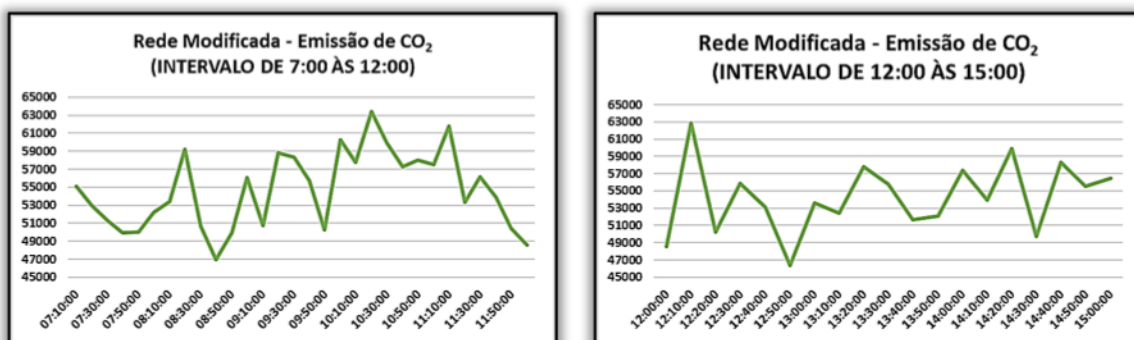
**Figura 14.** Comparativos entre as análises visuais de distribuição do fluxo ao longo da rede antes da implementação da modificação, período manhã e tarde



Fonte: Autor (2024).

No entanto, as vias mais afastadas do semáforo tendem a apresentar um fluxo mais congestionado, isso se deve a diversos fatores, como a falta de sinalização semaforica, a menor capacidade das vias ou a presença de outros pontos de congestionamento, como cruzamentos ou obras na pista, ou simplesmente os veículos entendem o semáforo como um obstáculo e tendem a evita-lo. Com a modificação implementada, conforme proposta em documento, uma nova medição desse parâmetro foi realizada a fim de comparar se a proposta da rotatória como previsto no PDM pode realmente satisfazer o princípio da eficiência operacional e sustentabilidade do sistema viário.

**Gráfico 02.** Comparativo do resultado das emissões de CO<sub>2</sub>: Rede com modificação – Período manhã (a) e tarde (b)

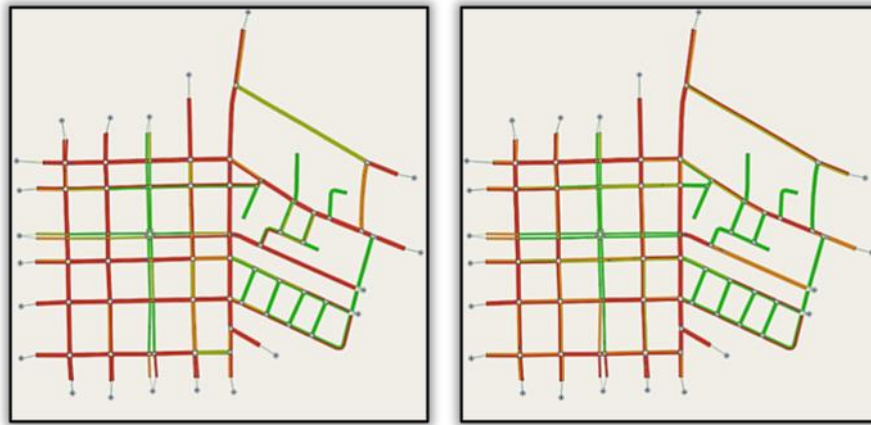


Fonte: Autor (2024).

A análise revela um aumento substancial nas emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) após a implementação da rotatória e modificações nas vias, principalmente nos horários finais do período da manhã. Esse fenômeno pode ser atribuído ao aumento do fluxo de veículos, contudo, os horários de pico permanecem os mesmos que antes das alterações, concentrando-se entre 11:00 e 11:20, com uma concentração máxima de CO<sub>2</sub> registrada em 63429,74 partes por milhão (PPM). Esses resultados sugerem uma correlação direta entre os padrões de tráfego e as variações nas concentrações de CO<sub>2</sub>. A

Figura 15 reproduz visualmente a média global do fluxo após a medida citada ter sido implementada, com medições realizadas no período da manhã e tarde, respectivamente.

**Figura 15.** Comparativos entre as análises visuais de distribuição do fluxo ao longo da rede após a implementação da modificação, período manhã e tarde



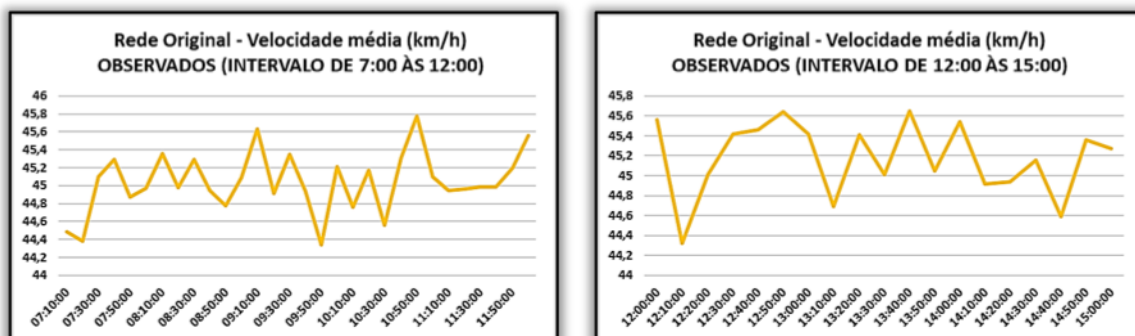
Fonte: Autor (2024).

Com as novas medições, percebe-se que vias antes não congestionadas agora apresentam um fluxo intenso o que caracteriza apenas a transferência de problema, isto é, com a possível implementação da modificação na rede os usuários percebem alterações nas oportunidades de custos quando comparadas as rotas principais e alternativas tanto no primeiro cenário quanto no segundo. Isso significa dizer que os usuários passam a enxergar novos custos no novo cenário ao definir um roteiro entre suas origens e destinos, possivelmente compensando um custo pelo outro, por exemplo, menor tempo de viagem e maior distância em troca de uma maior velocidade média no trajeto. Por isso, viu-se a necessidade de se avaliar outros parâmetros de desempenho dos usuários na rede para que se observe a influência dessa modificação no processo de escolha de rotas dos usuários, conforme é discutido a seguir.

### VELOCIDADE MÉDIA

A velocidade é também referenciada como um parâmetro para a medição de desempenho do tráfego e amplamente empregado em estudos de simulação para inferir sobre o potencial que novas medidas mitigadoras possuem ao serem sugeridas por tomadores de decisão. O Gráfico 03 reproduz os resultados sobre velocidade média coletada na rede antes das propostas implementadas, em que é possível observar a variação na medição do parâmetro em questão indicando comportamentos distintos no período da manhã em relação ao da tarde.

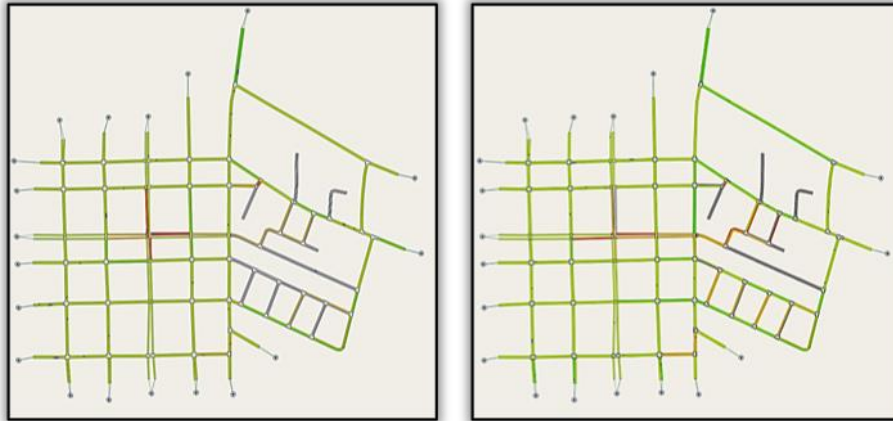
**Gráfico 03.** Comparação dos resultados de velocidade média: Rede sem modificação - Período manhã (a) e tarde (b).



Fonte: Autor (2024).

Como visto, em ambos os períodos, a velocidade média dos carros diminui ao longo do tempo, em que é possível medir que a queda na velocidade média é mais acentuada no período da manhã, com desvio padrão de 2 km/h e no período da tarde, a queda na velocidade média é de 1,8 km/h. Com relação às medições no período da manhã, a tendência geral do parâmetro apresenta uma ligeira queda ao longo do período da manhã, sendo notória a ocorrência de flutuações com maior frequência do que no período da tarde, em que a tendência, ainda que se perceba variabilidade, mantém relativamente estável ao longo da simulação. Como discutido, a Figura 16 ilustra o comportamento desse parâmetro em toda a rede.

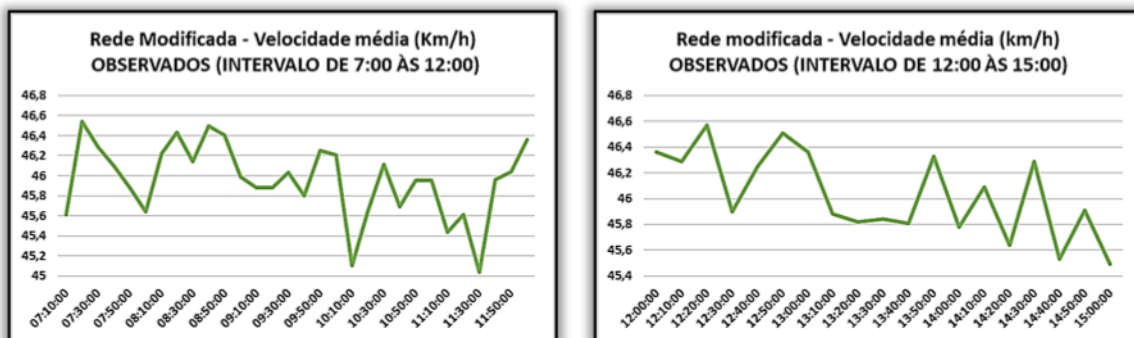
**Figura 16.** Comparativos entre as análises visuais de velocidade média ao longo da rede, período manhã e tarde



Fonte: Autor (2024).

Como exibido na figura acima, nas proximidades da interseção semaforizada é possível notar que há queda na velocidade (cor vermelha das vias), contudo por existir uma impedância que naturalmente força aos usuários uma redução de velocidade no ciclo do vermelho, é claro que nas adjacências a esse ponto na rede, a velocidade média está em equilíbrio, ainda que indiquem estar ligeiramente abaixo da velocidade de projeto das vias. Após a implementação da rotatória proposta o comportamento muda indicando que há uma interferência direta da infraestrutura nesse parâmetro (Gráfico 04).

**Gráfico 04.** Comparativo do resultado de velocidade média na rede com modificação. Período manhã e tarde

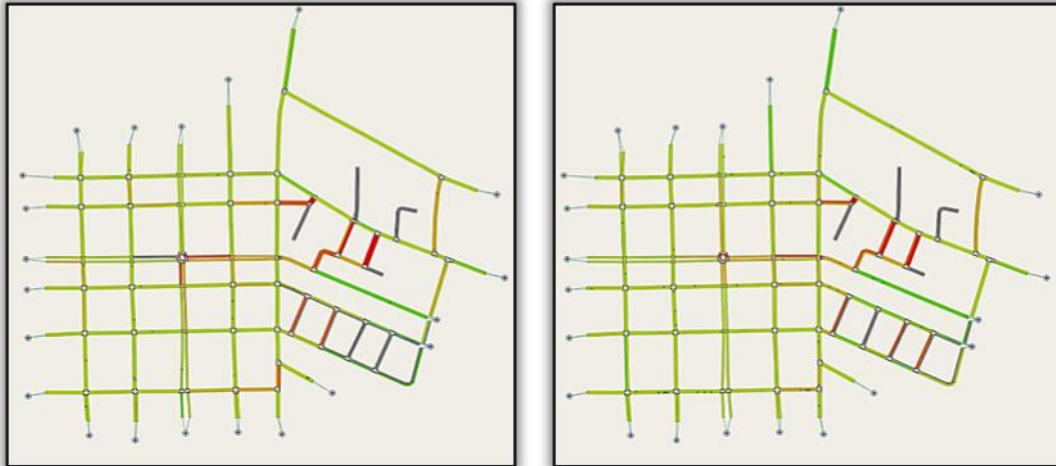


Fonte: Autor (2024).

Após a implementação da modificação na rede, vê-se que a velocidade média atinge maiores picos tanto no período da manhã quanto da tarde se comparado à rede inicial, sem modificações. Isso pode ser um reflexo de duas ocorrências, uma se dá pela ausência do semáforo que provoca forçadamente a redução da velocidade na via, principalmente se em ciclos de vermelho, e segundo, alguns veículos tomam a rotatória como uma impedância, aumentam seu trajeto tornando mais distantes os pares OD, mas assumindo velocidades maiores em determinados trechos da via. Contudo, vê-se também que em

ambos períodos do dia a velocidade média apresenta uma tendência de queda, sendo mais acentuada no período da tarde, isso pode ser um reflexo da forma como o fluxo está sendo distribuído na rede conforme apresentado na Figura 15, anteriormente. A Figura 17 ilustra o comportamento dos veículos na rede em relação a esse parâmetro, apresentando visualmente esse comportamento sobre velocidade nos períodos manhã e tarde, comparando o antes e o depois da modificação implementada.

**Figura 17.** Comparativos entre as análises visuais de velocidade média ao longo da rede após a modificação implementada, período manhã e tarde



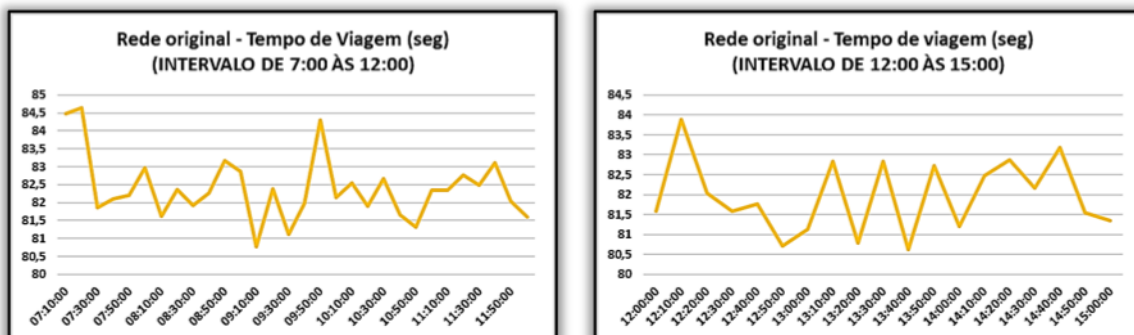
Fonte: Autor (2024).

É possível notar que no período da manhã, tanto antes como depois da modificação ter sido realizada, algumas vias apresentaram o mesmo comportamento quanto à medição da velocidade média, na interseção onde o semáforo e a rotatória estão localizados. No período da tarde, é possível notar pontos de gargalo na via, mas de forma isoladas se comparados com o cenário antes da modificação, inferindo que na rede houve um equilíbrio maior desse parâmetro no segundo momento da simulação.

### TEMPO DE VIAGEM

De forma semelhante ao comportamento de outros parâmetros como a velocidade e o fluxo já medidos anteriormente, utilizando o cálculo médio dos resultados obtidos com a simulação dos cenários, o tempo de viagem apresenta uma maior oscilação no período da manhã do que da tarde, contudo, essa oscilação no período diurno não apresenta a mesma frequência de amplitude que no período da tarde, indicando que pode haver um maior equilíbrio da rede. O Gráfico 05 ilustra as medições que foram realizadas nos dois períodos para esse parâmetro.

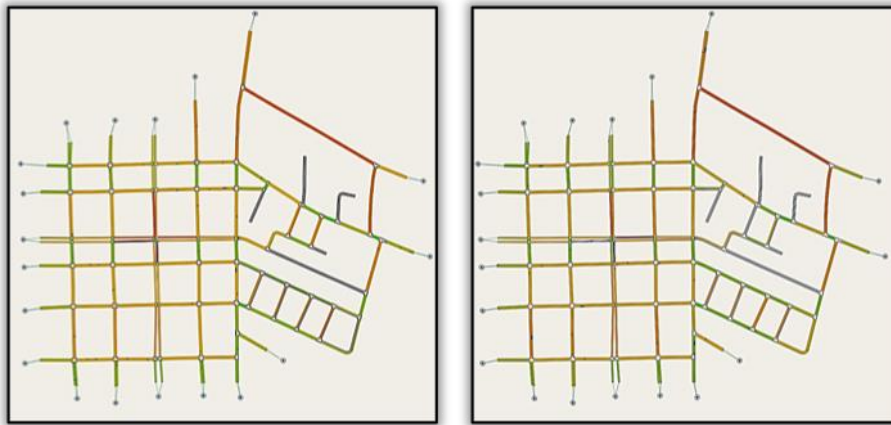
**Gráfico 05.** Comparativo do resultado de velocidade média na rede antes da modificação. Período manhã e tarde



Fonte: Autor (2024).

A presença de uma interseção semaforizada pode ter provocado junto com a redução da velocidade uma perda no desempenho do parâmetro tempo de viagem, ou forçado os veículos a buscarem caminhos alternativos, desviando dessa impedância, assumindo trechos mais longos e com maior tempo de viagem, mas com maior velocidade. Na Figura 18, é possível ver no mapa onde o tempo de viagem assume valores máximos e mínimos em ambos períodos. Com isso é possível perceber que nas periferias da rede, o tempo de viagem assume valores maiores sendo notado pela cor vermelha, além disso próximo ao centro da rede, onde a mudança será implementada, percebe-se uma queda no tempo de viagem indicando que essa região apresenta um mau desempenho do tráfego devido à presença do semáforo. Nas demais vias da rede, nas adjacências do local onde será implementada a mudança, percebe-se que o tempo de viagem não alcança valores maiores que indiquem um congestionamento, por exemplo, e nem menores que possam ilustrar um fluxo livre, mas apresenta-se constante ao longo da rede sinalizando que o tráfego pode estar em equilíbrio.

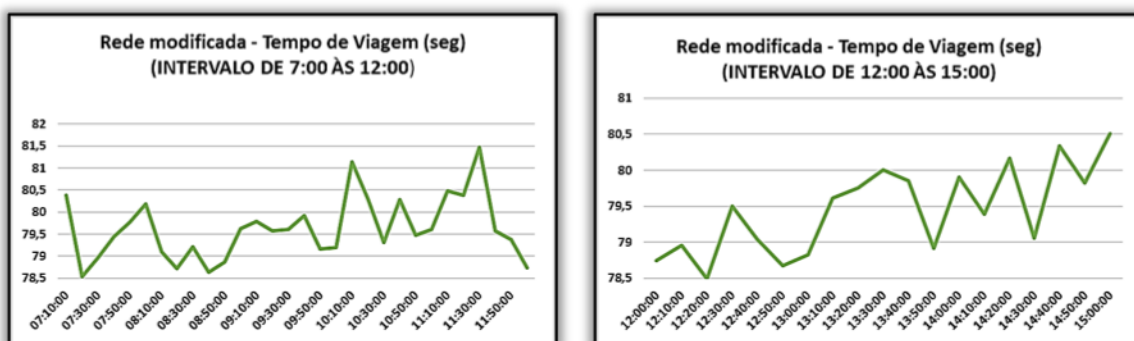
**Figura 18.** Comparativos entre as análises visuais do tempo de viagem ao longo da rede antes da modificação implementada, período manhã e tarde



Fonte: Autor (2024).

Ainda que os Gráfico 05 apresentem pequenas distinções da medição do tempo de viagem ao longo de ambos os períodos, a medição global desse parâmetro na rede apresenta comportamentos semelhantes, indicando apenas pequenas variações, localizando na interseção semaforizada uma perda significativa que pode ser justificada pela presença da sinalização. Já após a implementação da rotatória, o tempo de viagem não se assemelha aos demais parâmetros já medidos sob a mesma condição, sua tendência é crescente e se apresenta de forma positiva ainda que se eleve ao longo do tempo, em ambos períodos. No Gráfico 06 é possível observar a distribuição do tempo de viagem em ambos períodos.

**Gráfico 06.** Comparativo de resultados do tempo de viagem na rede com modificação. Período manhã e tarde

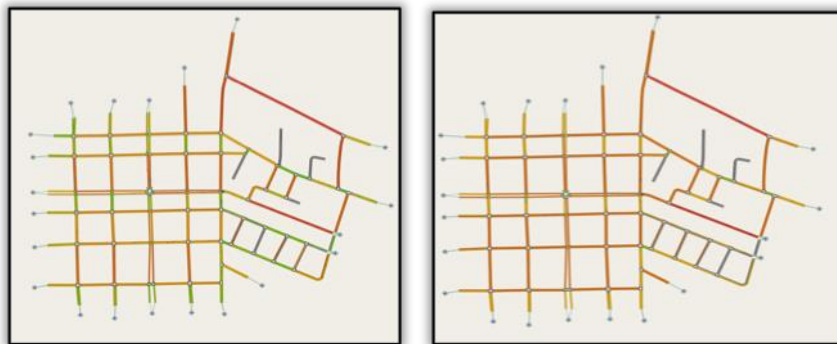


Fonte: Autor (2024).



Esse comportamento do tempo de viagem à tarde é semelhante às medidas realizadas de velocidade média também no mesmo período, em que, no Gráfico 04, a tendência negativa apresentada na medição do parâmetro velocidade, se repete no parâmetro tempo de viagem após a modificação de forma inversamente proporcional, porém diretamente relacionados, pois com a observação da queda de velocidade justifica-se o aumento no tempo de viagem. Na Figura 18, estão ilustrados os mapas da rede que reproduzem o comportamento desse parâmetro tempo de viagem após a modificação ser implementada. Em comparativo com a Figura 19, é possível notar a partir da ilustração a seguir, que após a mudança realizada na rede o tempo de viagem apresentou uma queda maior em determinadas vias principalmente nas adjacências onde a mudança aconteceu. As vias inicialmente indicadas com pior desempenho do tempo de viagem, antes da mudança, permaneceram com baixo desempenho sem sinais de melhora, o que sinaliza que a mudança não provocou resultados significativos na rede.

**Figura 19.** Comparativos entre as análises visuais de tempo de viagem ao longo da rede após a modificação implementada, período manhã e tarde



Fonte: Autor (2024).

Neste comparativo, a rede apresenta vias com carregamentos diferentes de tempo de viagem, onde é observado que em certos trechos algumas medições se mantêm constantes e outras exibem diminuição do desempenho. Nas regiões adjacentes à intervenção realizada, algumas vias que tinham tido um bom desempenho inicialmente no período da manhã, não conseguiram reproduzir o mesmo desempenho no período da tarde, podendo ser um indicativo de que os usuários podem estar buscando caminhos alternativos com mais frequência mesmo com a implementação da modificação. Isso reflete diretamente no processo de escolha de rotas ao entender que os usuários podem não possuir uma boa compreensão sobre os custos aos quais estão submetidos na rede e, assim, promover escolhas deficitárias de novas rotas alternativas.

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisou-se a substituição de um semáforo por uma rotatória em um trecho específico da malha viária de Juazeiro do Norte, Ceará, com objetivo de avaliar a eficácia dessa intervenção na melhoria do tráfego. Os resultados obtidos a partir das simulações no software AIMSUN indicam que a implementação da rotatória pode trazer benefícios significativos para a fluidez do tráfego, redução do tempo de viagem e diminuição das emissões de CO<sub>2</sub>. Essas melhorias são evidentes na análise comparativa entre as condições atuais e o cenário proposto, em que os dados coletados mostraram que a velocidade média dos veículos aumentou, enquanto o tempo de viagem reduziu consideravelmente após a instalação da rotatória. Além disso, houve uma diminuição perceptível nas emissões de CO<sub>2</sub>, o que contribui para um ambiente urbano mais sustentável, os gráficos de comparação entre os cenários atual e proposto ilustram essas melhorias, destacando a eficácia da rotatória em mitigar os problemas de tráfego no cruzamento estudado.

Apesar dos resultados positivos, o estudo também identificou algumas lacunas que precisam ser abordadas em futuras pesquisas, dentre elas a principal limitação foi a falta de dados reais sobre a distribuição dos fluxos de tráfego e o comportamento dos motoristas, o que levou à necessidade de suposições durante as simulações. Além disso, a análise não considerou fatores como o impacto econômico da intervenção e a percepção dos usuários sobre as mudanças implementadas. Portanto, pesquisas futuras devem focar na coleta de dados empíricos e na avaliação mais abrangente dos impactos socioeconômicos e ambientais das intervenções viárias.

Os principais achados deste estudo indicam que a substituição de semáforos por rotatórias pode ser uma solução eficaz para melhorar a mobilidade urbana, reduzindo congestionamentos e emissões de poluentes. No entanto, é crucial que essas intervenções sejam acompanhadas de estudos detalhados e contínuos para assegurar que as melhorias sejam sustentáveis a longo prazo, nesse tocante este trabalho contribui para a literatura existente ao fornecer evidências empíricas sobre a eficácia das rotatórias, reforçando a importância de um planejamento urbano integrado e baseado em dados.

Para os planejadores urbanos e gestores públicos, os resultados deste estudo oferecem insights valiosos para a tomada de decisões sobre a infraestrutura viária. A análise detalhada e as evidências empíricas apresentadas podem ajudar a orientar políticas públicas voltadas para a melhoria da mobilidade urbana, promovendo um sistema de transporte mais eficiente, seguro e sustentável. Dessa forma, este trabalho não só valida a proposta do Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte, mas também serve como referência para outras cidades que enfrentam desafios similares.

## REFERÊNCIAS

- Almeida, M. (2020). *Planejamento urbano e políticas públicas de trânsito*. Editora Cidades.
- Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport Policy*, 15(2), 73-80. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005>
- BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2010). *Normas Técnicas Relevantes para Infraestrutura Viária e Segurança Rodoviária*.
- Carvalho, A. S. V. A. (2000). Análise do sistema de transporte de grãos no estado de Pernambuco (Dissertação de mestrado). *Universidade Federal da Paraíba*, Campina Grande, PB.
- Carvalho, L. (2018). *Impactos socioeconômicos do trânsito nas cidades brasileiras*. Editora Sociedade.
- Código de Trânsito Brasileiro (Lei nº 9.503/1997). CTB. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/19503compilado.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19503compilado.htm). Acesso em: 18. Mai. 2024.
- Costa, P. (2018). *Tráfego e riscos de acidentes*. Editora Trânsito Seguro.
- De Feijter, R., Evers, J. J. M., & Lodewijks, G. (2004). Improving travel-time reliability by the use of trip booking. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 5(4), 288–292. <https://doi.org/10.1109/TITS.2004.837817>
- Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT). (2023). *Relatório de Tráfego Rodoviário: Juazeiro do Norte, CE*.
- Ferreira, E. (2021). *Infraestrutura viária nas cidades brasileiras*. Editora Mobilidade.
- Glaeser, E. L. (2011). *Triumph of the city: How our greatest invention makes us richer, smarter, greener, healthier, and happier*. Penguin.
- Gomes, R. (2021). *Segurança viária: desafios e soluções*. Editora Transporte.
- Jacobs, J. (1961). *The Death and Life of Great American Cities*. Vintage.
- Kwon, E., Park, C., University of Minnesota, D., & Transportation, M. D. of. (2018). *Development of a Travel-Time Reliability Measurement System* (Final Report). <http://www.dot.state.mn.us/research/reports/2018/201828.pdf>
- Lima, H. (2022). *Mobilidade urbana e uso do transporte individual*. Editora Urbanismo.
- Litman, T. (2013). *Evaluating Transportation Equity*. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org/equity.pdf>
- Martins, F. (2019). *Desafios da infraestrutura viária*. Editora Estradas.
- Morais, J. M. P., Souza, J. H. A., Oliveira, B. B., Barboza, Silva, E. M. (2020). Analysis of lean construction philosophy in a development in the municipality of Juazeiro do Norte, Ceará State, Brazil. *Research, Society and Development*, 9(7), 1-22, e183973799.
- Muñuzuri, J., & Gonzalez-Feliu, J. (2013). Decision-making tools and procedures for City Logistics An introduction to the Special Issue on Decision Support for Urban Logistics. *European Transport - Trasporti Europei*, 54. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84880988730&partnerID=40&md5=b306a7e088cf3c50e4a4bc0fdb312dba>.
- Muñuzuri, J. & Gonzalez-Feliu, J. (2013). Decision-making tools and procedures for City Logistics An introduction to the Special Issue on Decision Support for Urban Logistics. *European Transport - Trasporti Europei*, 54. <https://doi.org/10.7307/ptt.v54i0.414>

- Oliveira, J. (2020). *Acidentes de trânsito no Brasil: estatísticas e prevenção*. Editora Segurança.
- Organização Mundial da Saúde (OMS). Recuperado de <https://www.paho.org/pt/noticias/4-4-2022-novos-dados-da-oms-revelam-que-bilhoes-pessoas-ainda-respiram-ar-insalubre#:~:text=Dia%20Mundial%20da%20Sa%C3%BAde%202022&text=As%20%C3%BAltimas%20Diretrizes%20de%20Qualidade,24%20horas%3A%2045%20%C2%B5g%2Fm3>.
- Panis, L. I., Broekx, S., & Liu, R. (2006). Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. *Science of the total environment*, 371(1), 270-285.
- Peden, M., Scurfield, R., Sleet, D., Mohan, D., Hyder, A. A., Jarawan, E., & Mathers, C. (Eds.). (2004). World report on road traffic injury prevention. *World Health Organization*. <https://www.who.int/publications/i/item/world-report-on-road-traffic-injury-prevention>
- Pereira, A. S. et al. (2018). *Metodologia da pesquisa científica*. [e-book]. Santa Maria. Ed. UAB/NTE/UFSM, 2018. Recuperado de [https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic\\_Computacao\\_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1](https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1).
- Pereira, T. (2017). *Congestionamentos urbanos: causas e consequências*. Editora Infraestrutura.
- Prefeitura Municipal de Juazeiro do Norte. (2023). Plano Diretor Municipal de Juazeiro do Norte, (PDM): MINUTA DE LEI, *Revisão da LEI 2.572/2000*.
- Rakha, H., El-Shawarby, I., & Arafteh, M. (2010). Trip Travel-Time Reliability: Issues and Proposed Solutions. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 14(4), 232-250. <https://doi.org/10.1080/15472450.2010.517477>
- Rodrigues, S. (2020). *Problemas do transporte público no Brasil*. Editora Transporte Público.
- Santos, A. A. P. (2013). Estudo comparativo dos impactos causados pelo aumento da frota de veículos automotores nas cidades de Salvador, Recife e Fortaleza de 2007 a 2010 (Trabalho de conclusão de curso). *Universidade Federal da Bahia*, Salvador, BA.
- Santos, E. & Oliveira, M. 2020. Desafios da Mobilidade Urbana. *Revista Brasileira de Transporte*, 34(2), 123-145. [doi:10.1016/j.rbt.2020.02.004](https://doi.org/10.1016/j.rbt.2020.02.004)
- Santos, V. (2022). *Poluição e estresse no trânsito*. Editora Sustentabilidade.
- Silva, A. (2019). *Mobilidade urbana e seus desafios no Brasil*. Editora Trânsito.
- Wakabayashi, H. & Matsumoto, Y. (2012). Comparative Study on Travel Time Reliability Indexes for Highway Users and Operators. *Journal of Advanced Transportation*, 46(4), 318-339. <https://doi.org/10.1002/atr.1194>
- Wang, J., Wang, C., Lv, J., Zhang, Z., & Li, C. (2017). Modeling Travel Time Reliability of Road Network Considering Connected Vehicle Guidance Characteristics Indexes. *Journal of Advanced Transportation*. (Article ID 2415312). <https://doi.org/10.1155/2017/2415312>
- Xu, J. M., Zhao, M., & Lin, Y. J. (2022). Simulation-Based Evacuation System for Large-Scale Urban Road Network Considering Traffic Conditions. *Transportation Research Record*, 2676(10), 528–539. <https://doi.org/10.1177/03611981221090511>
- Yilmaz, M. F., Ozakgul, K., & Caglayan, B. O. (2022). Simulation-Based Reliability Analysis of Steel Girder Railway Bridges. *Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 17(3), 44-65. <https://doi.org/10.7250/bjrbe.2022-17.568>
- Zhang, P., Yue, H., Zhang, X., Shao, C. F., & Gao, W. C. (2019). Modeling the Equilibrium Road Network Capacity. *IEEE Access*, 7, 168029–168047. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2946977>