

UTILIZAÇÃO DA MICROSSIMULAÇÃO EM RECONFIGURAÇÕES DE INTERSEÇÕES RODOVIÁRIAS: UMA PROPOSTA PARA O ENTRONCAMENTO DAS RODOVIAS BR-262 E BR-050, EM UBERABA-MG

Arthur Henrique Verbe da Silva E-mail: arthurverbe@gmail.com

Cássio Leandro do Carmo E-mail: cassio.carmo@uftm.edu.br

Resumo: Este estudo tem como objetivo avaliar o potencial da microsimulação de tráfego como ferramenta de apoio à remodelação de interseções rodoviárias. O problema investigado é o entroncamento entre as rodovias BR-050 e BR-262, em Uberaba (MG), que apresenta congestionamentos frequentes e conflitos de tráfego que comprometem a fluidez e a segurança viária. Metodologicamente, realizou-se uma revisão bibliográfica sobre interseções viárias e microsimulação de tráfego, seguida da coleta de dados junto ao Plano de Mobilidade Urbana de Uberaba (PlanMob) e à plataforma TomTom, e da modelagem e calibração dos cenários atual e alternativo no *software* AIMSUN, este último elaborado com base no Manual de Projeto de Interseções do DNIT. Os resultados indicaram que a solução proposta reduziu o tempo de viagem em 45%, o tempo de atraso em 89% e a fila média em 95%, além de mitigar os principais pontos de conflito de tráfego identificados, com reduções adicionais de aproximadamente 35% nas emissões de CO₂ e 30% nas de NO_x. Conclui-se que a microsimulação de tráfego constitui uma ferramenta eficiente para embasar decisões sobre intervenções viárias, contribuindo tanto para a mobilidade quanto para a redução de impactos ambientais.

Palavras-chave: Microsimulação de tráfego, interseção viária, entroncamento, remodelação viária, AIMSUN.

Use of Microsimulation in Road Intersection Reconfigurations: A Proposal for the Junction of Highways BR-262 and BR-050, in Uberaba-MG

Abstract: This study aims to evaluate the potential of traffic microsimulation as a decision-support tool for the redesign of road intersections. The problem addressed is the junction between the BR-050 and BR-262 highways in Uberaba, Minas Gerais (Brazil), which experiences frequent congestion and traffic conflicts that compromise traffic flow and road safety. Methodologically, a literature review on road intersections and microsimulation was conducted, followed by traffic data collection from the Uberaba Urban Mobility Plan (PlanMob) and the TomTom platform, and the modeling and calibration of current and alternative scenarios in AIMSUN software, the latter designed according to the DNIT Intersection Design Manual. The results showed that the proposed solution reduced travel time by 45%, delay time by 89%, and average queue length by 95%, while mitigating the main traffic conflicts identified, with additional reductions of approximately 35% in CO₂ emissions and 30% in NO_x emissions. It is concluded that traffic microsimulation is an effective tool for supporting decisions on road interventions, contributing to both improved mobility and reduced environmental impacts.

Keywords: Traffic microsimulation, road intersection, junction, roadway redesign, AIMSUN.

1. Introdução

O crescimento acelerado do transporte individual impõe desafios significativos aos gestores públicos, exigindo o desenvolvimento de políticas mitigadoras do crescimento dos sinistros de trânsito com vítimas e dos congestionamentos urbanos, e também promovam sistemas alinhados aos princípios de sustentabilidade (CARVALHO, 2016).

O planejamento e a gestão do tráfego são essenciais para adaptar a infraestrutura viária ao crescimento da frota urbana, mitigando congestionamentos e garantindo mobilidade eficiente. Ferramentas como a microsimulação de tráfego permitem a análise detalhada de cenários e a avaliação de intervenções, sendo cruciais para a otimização do sistema de transporte existente (FHWA, 2019).

Os modelos de simulação de tráfego são empregados com o principal objetivo de reproduzir uma determinada rede de simulação de forma muito próxima à realidade e testar soluções

alternativas para o caso em estudo (PINHEIRO, 2018). A modelagem computacional reproduz o comportamento dos condutores e o fluxo de tráfego em diferentes configurações viárias, auxiliando na tomada de decisão baseada em dados quantitativos.

As rodovias BR-050 e BR-262 se encontram em um importante entroncamento na cidade de Uberaba, no estado de Minas Gerais, onde há vias de acesso urbano tanto para o interior da cidade quanto para os bairros da região. A população local se queixa do congestionamento nos horários de pico e das eventuais irresponsabilidades dos motoristas.

Este artigo apresenta um estudo de caso realizado na cidade de Uberaba, fundamentado em uma análise crítica dos conflitos de tráfego e das irregularidades no comportamento dos usuários no entroncamento formado pelas rodovias BR-050, BR-262 e vias urbanas da cidade. Dentre os aspectos analisados, destacam-se a estimativa dos tempos de viagem, a formação de filas, a densidade do tráfego e as emissões de poluentes pelos veículos.

A relevância deste trabalho está na busca por soluções que possam melhorar a mobilidade e a segurança viária na região, contribuindo para a redução de conflitos de tráfego. Além disso, o estudo reforça a importância do uso de ferramentas de simulação de tráfego para o planejamento urbano e rodoviário, permitindo intervenções mais assertivas e baseadas em análises quantitativas.

Embora a microssimulação de tráfego venha sendo amplamente aplicada à avaliação de interseções isoladas, a exemplo de reconfigurações geométricas em rotatórias e interseções sinalizadas (Zare et al., 2025) e de comparações multicritério entre alternativas de projeto considerando custos de implantação (Bayata et al., 2025), ainda são escassos os estudos que tratam especificamente de entroncamentos que combinam rodovias federais de alto volume com vias urbanas, como é o caso do encontro entre a BR-050 e a BR-262 em Uberaba. Esse tipo de configuração impõe desafios particulares, pois reúne, em um mesmo ponto, o tráfego de passagem interestadual e o tráfego local de acesso aos bairros da região, o que amplia a diversidade de conflitos e dificulta soluções padronizadas. O diferencial deste trabalho está, portanto, em aplicar a microssimulação a um entroncamento rodoviário-urbano real, classificado pelo diagnóstico municipal como um dos pontos de maior gravidade de conflitos de tráfego da cidade, testando uma proposta de reconfiguração fundamentada no Manual de Projeto de Interseções do DNIT (2005) e avaliada tanto sob o aspecto operacional quanto ambiental.

2. Metodologia

Esta pesquisa aplicada foi estruturada em quatro etapas:

2.1.Revisão bibliográfica

Na primeira, realizou-se uma revisão bibliográfica, com o objetivo de fundamentar teoricamente os principais temas abordados. Foram analisadas fontes bibliográficas e documentais relacionadas aos tópicos centrais da pesquisa, tais como: conflitos de tráfego, remodelagem de interseções rodoviárias, microssimulação de tráfego e manuais de projetos geométricos para interseções rodoviárias.

2.2.Estimativa do volume de tráfego

A segunda etapa do estudo concentrou-se na estimativa do volume de tráfego no entroncamento em análise. Para isso, utilizaram-se dados de volume de tráfego extraídos do relatório de resultados das pesquisas do Plano de Mobilidade Urbana de Uberaba (PLANMOB UBERABA, 2024), bem como os dados de volume de tráfego coletados no *site* da plataforma de GPS TomTom para auxiliar na distribuição do tráfego nas aproximações e saídas da interseção. A plataforma utiliza dados anonimizados de movimentação de veículos

coletados a partir de dispositivos GPS, aplicativos de navegação e outros sensores embarcados em veículos. A coleta dos dados foi realizada conforme os seguintes passos:

a) Obtenção de dados de viagens

Foram obtidos dados de viagens geradas e atraídas pelos bairros localizados nas zonas do Jardim Maracanã e do Conjunto José Vallim de Mello I, correspondentes às zonas 14 e 15, respectivamente, de acordo com a Pesquisa de Origem e Destino (OD) do PlanMob Uberaba. Esses dados referem-se ao período de maior volume de tráfego identificado na pesquisa, ou seja, o horário de pico da manhã;

b) Pesquisa de Contagem Volumétrica

Com base nos dados do PlanMob Uberaba, foram também coletadas informações da Pesquisa de Contagem Volumétrica na Linha de Contorno (*Cordon Line*), especialmente os volumes de tráfego nas rodovias BR-050 e BR-262. Esses dados foram utilizados como parâmetros para a calibração da rede de simulação;

c) Tratamento das informações

Os dados de viagens extraídos da Pesquisa OD para o horário de pico da manhã foram analisados, categorizados para unidades de carros de passeio (UCP) e distribuídos para os centroides da rede de simulação, isto é, para as zonas próximas à interseção em estudo.

d) Obtenção da Matriz OD

A distribuição do tráfego na interseção foi realizada, de acordo com os dados gerados por uma ferramenta da plataforma TomTom, que fornece dados de viagens de entrada e saída através do segmento de estrada selecionado. Dessa forma, obteve-se uma Matriz OD de entrada para a simulação, correspondente ao Volume Horário de Projeto (VHP);

e) Consolidação das informações

Por fim, com o VHP da interseção definido e os dados de contagem de tráfego nas rodovias BR-050 e BR-262 coletados, consolidaram-se as informações necessárias para a etapa seguinte do estudo.

Ressalta-se que os dados utilizados apresentam limitações que devem ser consideradas na interpretação dos resultados. A Pesquisa OD do PlanMob Uberaba baseia-se em uma amostra de domicílios expandida por zona de tráfego, de modo que sua precisão está condicionada ao tamanho amostral e à taxa de expansão adotada em cada zona, podendo não capturar variações sazonais ou de curto prazo na demanda. Já os dados da plataforma TomTom, por serem originados de dispositivos GPS e aplicativos de navegação, tendem a representar de forma mais robusta o tráfego de passagem nas rodovias, mas podem subestimar viagens de veículos sem conectividade ou de usuários que não utilizam aplicativos de navegação. Neste estudo, este efeito foi mitigado ao se empregar essa fonte apenas para a distribuição percentual dos movimentos, e não para a magnitude absoluta dos volumes, calibrada separadamente a partir da Pesquisa de Contagem Volumétrica na Linha de Contorno. A combinação dessas duas fontes buscou compensar as limitações individuais de cada uma, mas segue dependente da qualidade e da atualidade dos levantamentos originais, motivo pelo qual se recomenda, em estudos futuros, a validação com contagens de campo específicas para o entroncamento analisado.

2.3. Simulação do cenário atual

Após a estimativa do VHP e a coleta dos dados de contagem de tráfego das rodovias BR-050 e BR-262, iniciou-se a terceira etapa do estudo. Nessa etapa, foi simulado o cenário atual, ajustando-o por meio de calibração para melhor representação da realidade. O cenário atual

foi modelado considerando as características reais do local de estudo, incluindo sinalizações de trânsito existentes e dimensões das vias. Para a simulação, utilizou-se o *software* de microsimulação de tráfego AIMSUN, devido sua capacidade de representar de forma realista o comportamento dos motoristas no trânsito, modelar a geometria de forma detalhada as interseções e fornecer indicadores relevantes, como tempos de atraso, filas e emissões de poluentes. Esses indicadores foram utilizados para avaliar o impacto das alterações propostas na remodelagem da interseção em estudo.

A calibração do modelo seguiu um processo iterativo: partindo da matriz OD estimada, os parâmetros comportamentais do AIMSUN (como aceitação de brechas, distância de segurança e sensibilidade dos condutores) e as proporções de conversão nos movimentos foram ajustados sucessivamente até que os volumes simulados nos quatro pontos de contagem da Linha de Contorno apresentassem índice GEH inferior a 5, critério amplamente adotado na literatura como indicativo de boa aderência entre volumes contados e simulados (MORGAN e VEYSEY, 2013). A consistência da calibração foi confirmada nesses mesmos quatro pontos de contagem, indicando que a rede simulada reproduzia adequadamente o padrão de distribuição de tráfego observado antes de se avançar para a comparação entre os cenários atual e alternativo. Uma validação independente, com dados de contagem não utilizados na calibração, não foi realizada neste estudo.

Posteriormente, comparou-se o cenário atual com uma simulação de cenário alternativo, cuja configuração geométrica foi elaborada com base no Manual de Projeto de Interseções do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005). A Figura 1 ilustra as etapas do método.

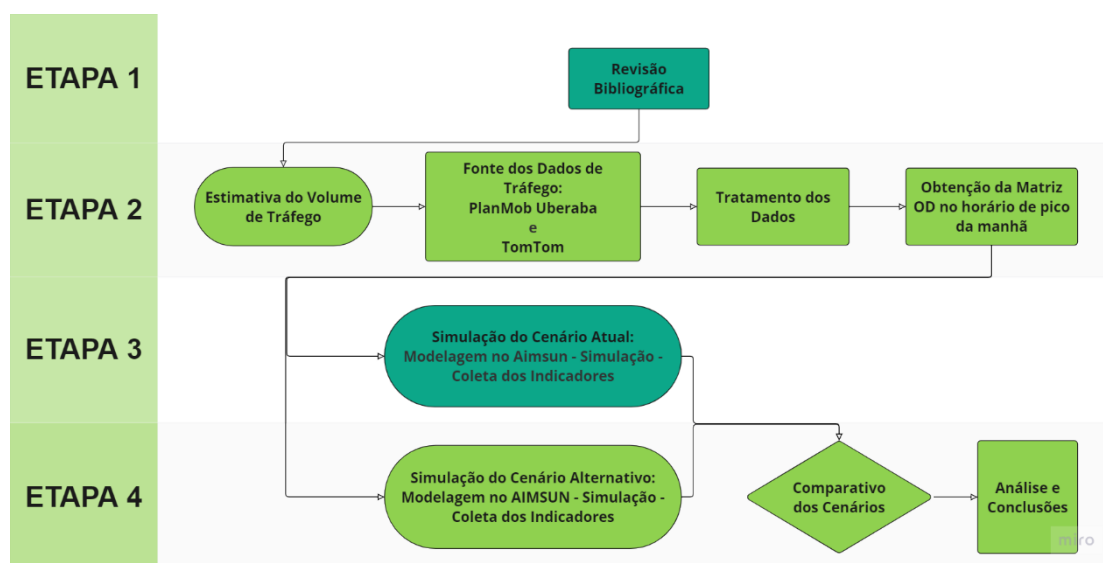


Figura 1 – Fluxograma da Metodologia

3. Estudo de caso

3.1.Referencial Teórico

Neste tópico, são relatados o manual orientador de projetos de interseções e conceitos sobre conflitos de tráfego, além de descritas informações sobre modelos de simulação de tráfego.

3.1.1. Projeto de Interseções

De acordo com o Manual de Projeto de Interseções do DNIT (DNIT, 2005), uma interseção é definida como a confluência, entroncamento ou cruzamento de duas ou mais vias. Trata-se de um ponto crítico da infraestrutura viária, pois é onde ocorrem os principais conflitos de

tráfego, exigindo soluções geométricas e operacionais que garantam fluidez e segurança. Segundo Albano (2016), as interseções viárias podem ser em nível, quando todas as vias se encontram no mesmo plano, e interseções em desnível, nas quais há separação vertical entre elas.

A escolha do tipo de interseção deve levar em consideração fatores como volume de tráfego, segurança, topografia e custos operacionais, sendo recomendadas soluções mais simples sempre que possível, pois são mais seguras e de fácil compreensão para os motoristas (DNIT, 2005). No que se refere aos pontos de conflitos em interseção, o Manual do DNIT afirma que devem ser separados, sempre que possível, no projeto da interseção. A separação dos pontos de conflito em interseções melhora a segurança e a capacidade viária, facilitando a percepção e reação dos motoristas. A aplicação de técnicas como faixas de giro, ilhas e controle de acessos auxiliam na organização dos fluxos, reduzindo colisões traseiras e conflitos de confluência (DNIT, 2005).

3.1.2. Conflitos de Tráfego

Conflito de tráfego pode ser entendido como uma interação inesperada entre dois veículos, entre um veículo e pedestres (ou outros usuários da via), ou entre um veículo e algum elemento da infraestrutura viária (como guias, sinais de trânsito, obstáculos, etc.), que, sem uma ação evasiva por parte de um ou mais envolvidos (como uma freada brusca, mudança abrupta de trajetória ou variação repentina na velocidade), resultaria em um sinistro. Assim, um conflito pode ser visto como uma situação que quase leva a um sinistro de trânsito (OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA, 2023). Um conflito de tráfego é uma situação que se aproxima de um sinistro, representando um risco potencial (ROBLES, 2008).

Os históricos de sinistros nas vias, formados a partir da compilação de dados extraídos dos boletins de ocorrência elaborados pela polícia ou por agentes de trânsito, podem levar um longo período para serem consolidados, porém, os conflitos de tráfego, que ocorrem com muito mais frequência do que os sinistros, são coletados de forma mais simples devido ao seu caráter observacional (ROBLES, 2008). Enquanto os sinistros podem resultar em vítimas, os conflitos não.

3.1.3. Modelo de simulação

Conforme Pinheiro (2018), o desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego envolve etapas sequenciais que asseguram uma aplicabilidade confiável. A primeira etapa, a formulação, define os objetivos do modelo, estabelece a área de estudo e seleciona o modelo mais adequado, considerando variáveis como a infraestrutura viária e a geração de tráfego. A segunda etapa, a codificação, que organiza as características físicas e operacionais da rede, incluindo variáveis globais, locais e específicas dos veículos.

A terceira etapa, a verificação, identifica e corrige erros da modelagem, como os de especificação, agregação, transferência, e computacionais. Em seguida a calibração, os parâmetros do modelo escolhido são ajustados para representar fielmente o comportamento do tráfego real, utilizando um processo de iteração onde os parâmetros do modelo são otimizados, a fim de obter uma correlação adequada entre o que foi idealizado e a rede. Após a calibração, realiza-se a validação, onde os resultados do modelo são comparados com dados reais, garantindo que estejam dentro do erro admissível. Por fim, a etapa de aplicação utiliza o modelo calibrado e validado para analisar o caso estudado e possíveis cenários alternativos. A Figura 2 resume as etapas do modelo proposto.



Figura 2 – Etapas do desenvolvimento de um modelo de simulação de tráfego.

Fonte: Pinheiro, 2018.

O método de calibração escolhido para este estudo foi o índice *GEH* (*Geoffrey E. Havers*), amplamente utilizado na avaliação da precisão de modelos de simulação de tráfego. O *GEH* é um método estatístico baseado no teste do *qui-quadrado*, utilizado para comparação dos volumes de tráfego contados e modelados. Sua equação é dada por:

$$GEH = \sqrt{\frac{(VO - VM)^2}{0,5 (VO + VM)}} \quad (\text{Equação 1})$$

onde, *VO* representa o volume de tráfego contado em uma hora pico e *VM*, o volume simulado. O índice incorpora tanto os erros absolutos quanto os relativos, utilizando a média dos volumes observados e simulados para evitar problemas em caso de valores nulos (PINHEIRO, 2018). Um valor de *GEH* inferior a 5 é considerado aceitável para 95% dos casos em seções individuais (MORGAN e VEYSEY, 2013). Este método de calibração é projetado para tolerar erros maiores em fluxos de tráfego mais baixos (PINHEIRO, 2018).

Estudos recentes reforçam a aplicabilidade da microsimulação na reconfiguração de interseções. Bayata et al. (2025) utilizaram o AIMSUN para comparar diferentes tipologias de interseção em um corredor urbano, avaliando simultaneamente indicadores operacionais, emissões de poluentes e custos de implantação por meio do método multicritério TOPSIS. Zare et al. (2025) empregaram o AIMSUN Next para comparar o desempenho de rotatórias, interseções semaforizadas e interseções controladas por parada, destacando a maior robustez operacional das rotatórias inclusive sob condições de falha do sistema de controle. Já Yaibok et al. (2024), utilizando o software VISSIM associado ao Safety Surrogate Assessment Model (SSAM), avaliaram cenários alternativos de reconfiguração geométrica de um entroncamento crítico quanto à redução de pontos de conflito, evidenciando que ganhos de segurança podem, em alguns casos, ser acompanhados de aumento no tempo de viagem e nas filas, o que reforça a necessidade de uma análise conjunta dos indicadores operacionais e de segurança. Esses trabalhos convergem com a abordagem adotada neste estudo, que utiliza o AIMSUN para comparar cenários alternativos de reconfiguração geométrica considerando, de forma integrada, indicadores operacionais e ambientais.

3.2. Características da interseção em estudo

A interseção analisada neste estudo está localizada na zona sul de Uberaba, no estado de Minas Gerais, mais especificamente no encontro entre duas importantes rodovias federais: a BR-050 e a BR-262. Na interseção, apresentada na Figura 3, também há a presença de vias urbanas que dão acesso à Avenida Deputado José Marcus Cherem e aos bairros da região do Jardim Maracanã. De acordo com o relatório de resultados das pesquisas do Plano de Mobilidade Urbana de Uberaba, elaborado em 2024, a cidade possui atualmente 85 pontos críticos listados pela equipe da Prefeitura Municipal, os quais foram categorizados de acordo com o grau de conflito de tráfego, sendo o grau 1 o mais leve e o grau 5 o mais severo. Entre os quatro pontos críticos classificados como grau 5 de conflito de tráfego, três estão localizados na interseção em estudo (PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERABA, 2024).



Figura 3 – Mapa da interseção do estudo e seus Pontos Críticos

Fonte: Google Earth (2025). Elaboração: Autor (2025)

O Ponto 1, localizado no encontro da alça de saída da BR-050, no sentido do estado de São Paulo, com a alça de retorno da BR-262, é descrito pelos pesquisadores do PlanMob Uberaba como uma área de fluxo intenso de veículos, cuja configuração geométrica favorece a prática de velocidades elevadas em ambos os acessos. Observou-se também a deficiência na sinalização, com indefinição do local onde ocorrem os conflitos, além de restrições laterais no acesso à BR-050 devido aos dispositivos de drenagem superficial e profunda presentes no local.

O Ponto 2, que corresponde ao acesso e à saída da Av. Dep. José Marcus Cherem pela interseção, foi descrito no PlanMob Uberaba como um ponto de conflitos complexos para ambos os sentidos da avenida, ocorrendo nele a transição entre o fluxo urbano e com o fluxo rodoviário, e vice-versa. Esse ponto apresenta situações de risco, pois exige comportamentos e decisões inadequadas por parte dos motoristas. A sinalização existente é considerada deficiente, apesar de ser essencial para orientar e induzir condutas compatíveis com as condições de tráfego local.

Já o Ponto 3, localizado no encontro da alça de saída da BR-050, com a Av. Dep. José Marcus Cherem, foi descrito como uma ligação essencial para o município. No entanto, conforme destacado anteriormente, o Ponto 2 já apresenta conflitos entre o fluxo urbano e com o rodoviário. No caso do Ponto 3, ocorre o entrelaçamento desses fluxos em um trecho de apenas 100 metros, agravando as condições de tráfego.

Para a modelagem da interseção no *software* AIMSUN, foram consideradas as observações do PlanMob Uberaba.

3.3. Cenário atual

O entroncamento foi escolhido para a simulação por se tratar de um encontro de duas importantes rodovias federais e por ser o principal acesso de uma zona de bairros muito populosa da cidade de Uberaba-MG, sendo os bairros Jardim Maracanã e Recreio dos

Bandeirantes, ou seja há grandes demandas de tráfego rodoviário e urbano na região. Outro fator importante da escolha é o fato de que há três pontos de conflito de tráfego graves, que causam trânsitos significativos tanto na hora pico da manhã quanto da tarde, gerando desconforto da população local.

3.3.1 Coleta de dados e modelagem do cenário atual

Diante das pesquisas realizadas para o Plano de Mobilidade Urbana da cidade de Uberaba, foi possível ter acesso a dados de estimativa do volume de deslocamento de pessoas, bem como a análises específicas da infraestrutura viária do município. A pesquisa Origem e Destino (OD) do PlanMob Uberaba (PMU, 2024) fornece informações importantes, como o volume de viagens atraídas e geradas por áreas próximas à interseção deste estudo. Além disso, apresenta a distribuição dos tipos de meio de locomoção utilizados para acessar essas áreas, incluindo veículos motorizados, não motorizados e pedestres. A partir da pesquisa OD, foi possível identificar o principal horário de pico nas áreas com os maiores volumes de tráfego da cidade, que ocorre entre no período da manhã.

Já a Pesquisa de Contagem Volumétrica na Linha de Contorno (*Cordon Line*) do PlanMob Uberaba teve relevância para a estimativa do volume de tráfego no entroncamento, pois se trata de uma contagem manual do número de veículos que entram e saem de Uberaba pelas principais rodovias da cidade. Tais dados foram utilizados na calibração do modelo de simulação.

As principais zonas utilizadas neste estudo foram as do bairro Jardim Maracanã e do Conjunto José Vallim de Mello I, duas das áreas com maior número de deslocamentos observados na cidade de Uberaba. As viagens atraídas e geradas por essas zonas representam cerca de 24% do total de viagens da matriz OD de 24 horas elaborada para o PlanMob Uberaba.

Com os dados de volume de tráfego para a hora pico da manhã no entroncamento estimados a partir do PlanMob Uberaba, o VHP foi distribuído entre os movimentos do entroncamento, ou seja, entre as entradas e saídas da interseção. Para isso, foi utilizada a plataforma de GPS TomTom, que dispõe de diversas ferramentas de análise de tráfego a partir de dados de telefonia de usuários que utilizam sistemas de GPS, seja para auxílio na navegação ou simplesmente por terem a função GPS ativada em seus dispositivos móveis.

A ferramenta utilizada no TomTom para a elaboração da distribuição do volume de tráfego foi a ***O/D Analysis Selected Link***, cuja função é analisar as viagens de entrada e saída em um segmento viário ou área selecionada. Dessa forma, foi selecionada a área do entroncamento e coletados os dados, em porcentagem, das viagens de entrada e saída. A Matriz OD de entrada foi usada para a distribuição de tráfego, com o VHP calculado a partir da metodologia estabelecida pelo modelo. A Tabela 1 apresenta a Matriz OD obtida.

Tabela 1 - Matriz Origem Destino estimada para a simulação de tráfego

DESTINO → ORIGEM ↓	1. Av. Dep. José Marcus Cherem	2. Av. Bandeirantes	3. BR-262	4. Conj. José Vallim de Mello	5. BR-050 (Sentido Delta-MG)	6. Jardim Maracanã	7. BR-050 (Sentido Uberlândia - MG)	TOTAL
1. Av. Dep. José Marcus Cherem	0	72	193	105	230	303	41	945
2. Av. Bandeirantes	88	0	64	529	77	103	261	1.122
3. BR-262	292	27	0	40	143	150	804	1.457
4. Conj. José Vallim de Mello	77	219	14	0	77	50	59	495
5. BR-050 (Sentido Delta-MG)	137	73	166	49	0	20	1.762	2.207
6. Jardim Maracanã	156	25	66	36	18	0	99	400
7. BR-050 (Sentido Uberlândia-M G)	305	155	641	166	1.431	101	0	2.800
TOTAL	1.054	571	1.144	926	1.977	728	3.027	9.426

Fonte: Dos autores (2025)

Para o cenário atual da interseção, foi modelada uma rede de simulação, representada na Figura 4, de acordo com alguns critérios, como a geometria das vias, as velocidades das vias, as sinalizações de trânsito, os comportamentos observados nos usuários e as condições das vias.



Figura 4 – Rede de simulação modelada no AIMSUN

Fonte: Dados do autor (2025)

3.4. Cenário Alternativo

Para o cenário alternativo de melhoria do tráfego na interseção, foram modeladas intervenções pontuais para amenizar os conflitos de tráfego existentes no entroncamento. Para isso, foram aplicadas intervenções classificadas pelo Manual de Projeto de Interseções do DNIT (DNIT, 2005), adaptadas ou não. As intervenções foram agrupadas em três conjuntos de fluxos de tráfego. Além dessas quatro intervenções drásticas, aplicaram-se algumas mudanças básicas como aumento de faixas e novas sinalizações de trânsito. A Figura 5 mostra a proposta do cenário alternativo.



Figura 5 – Cenário alternativo modelado
Fonte: Dados do autor (2025)

a) Intervenção 1:

Para essa intervenção, foi adaptada uma das classes de interseções do Manual de Projeto de Interseções do DNIT (DNIT, 2005): a interconexão Trombeta. O DNIT (2005) classifica uma interconexão como uma interseção em desnível com ramos que conduzem veículos de uma via para outra, sendo a Trombeta um tipo específico desse modelo. Ela recebe esse nome porque uma das correntes de tráfego de um ramo executa um giro próximo a 270° (DNIT, 2005).

A Trombeta foi adaptada para o trajeto dos veículos que têm como origem a BR-050, no sentido leste, e desejam acessar a BR-262 ou a cidade de Uberaba pela Avenida Deputado José Marcus Cherem. A adaptação se deve ao fato de que, após o giro de saída da BR-050, a via passa a ser um túnel que se divide para as duas opções de destino.

b) Intervenção 2:

A intervenção 2 trata-se do acesso direto dos veículos da BR-262 à BR-050 no sentido de Uberlândia, sendo composta por um túnel na saída da BR-262 que passa a subir para o nível superior da rodovia BR-050.

c) Intervenção 3:

A intervenção 3 trata do acesso dos veículos à BR-050 no sentido do estado de São Paulo, sendo composta por uma alça em desnível até o nível superior da rodovia. Essa alça atende ao fluxo de tráfego tanto dos veículos provenientes da Avenida Deputado José Marcus Cherem quanto daqueles que saem da BR-262.

d) Intervenção 4

A intervenção 4 consiste na inserção de uma rotatória na aproximação e saída do bairro Jardim Maracanã. O DNIT (2005) classifica uma rotatória como uma solução viária em que o tráfego circula em sentido anti-horário ao redor de uma ilha central.

A escolha da rotatória para esse ponto deve-se ao fato de que essa configuração pode garantir a fluidez do tráfego dos veículos que desejam acessar o bairro Jardim Maracanã e a BR-262. Dessa forma, atende tanto ao trajeto que tem a Avenida Deputado José Marcus Cherem como

origem e o bairro Jardim Maracanã ou a BR-262 como destinos, quanto ao trajeto no sentido inverso, do Jardim Maracanã para a BR-262 ou a Avenida Deputado José Marcus Cherem.

Optou-se, basicamente, por manter o sentido do fluxo existente na interseção atualmente, com as devidas adaptações em razão das intervenções 1 e 3. Entretanto, destaca-se que a escolha da rotatória garante que os veículos que saem do Jardim Maracanã não precisarão mais entrar em conflito direto com o ponto de encontro do fluxo da Avenida Deputado José Marcus Cherem com o fluxo da BR-050.

Resultados e Discussão

No *software* AIMSUN, inicialmente, foi realizada uma simulação chamada “Ajuste de OD Estático”, que consiste basicamente no ajuste da matriz OD inserida para simulação, utilizando os dados da Pesquisa de Contagem Volumétrica na Linha de Contorno do PlanMob Uberaba como parâmetro. Após o ajuste, foi gerada uma nova demanda de tráfego, que foi utilizada na simulação dos cenários previstos.

Para a microsimulação do cenário atual, foi utilizada a nova demanda de tráfego e, novamente, os dados da Pesquisa de Contagem Volumétrica na Linha de Contorno do PlanMob Uberaba, porém, desta vez, como parâmetro de calibração pelo índice *GEH*. Os resultados de calibração foram satisfatórios, 100% dos pontos de contagem apresentaram índice *GEH* inferior a 5, conforme o ilustrado na Tabela 2

Tabela 2 – Índices *GEH* da microsimulação do Cenário Atual

PONTO DE CONTAGEM	FLUXO CONTADO	FLUXO SIMULADO	DIFERENÇA ABSOLUTA	GEH
262M1	197	203	-6	0,42
262M2	148	152	-4	0,33
050M1	854	857	-3	0,10
050M2	808	838	-30	1,05

Dessa forma, com o modelo de simulação calibrado, está válida a análise dos resultados da simulação do cenário atual e do cenário alternativo. Para a análise dos cenários, foram escolhidos oito indicadores, que são gerados para cada microsimulação no AIMSUN. Os resultados dos indicadores dos cenários estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados das microsimulações

↓ INDICADORES ↓ / CENÁRIOS →	ATUAL	ALTERNATIVO	UNIDADES
TEMPO DE VIAGEM - TODOS	118,81	65,36	seg/km
DENSIDADE - CARRO	12,78	4,5	veíc/km
FLUXO - CARRO	4.937	4.557	veíc/h
VELOCIDADE - CARRO	48,85	60,9	km/h
TEMPO DE ATRASO - CARRO	48,97	5,45	seg/km
FILA MÉDIA - CARRO	61,83	2,82	veíc
EMIÇÃO DE IEM - TODOS - CO ₂	1.124.501,48	729.800,65	g
EMIÇÃO DE IEM - TODOS - NO _x	2.783,93	1.944,34	g

O cenário alternativo, que apresenta mudanças drásticas na geometria da interseção e foi projetado para evitar conflitos de tráfego, apresentou um desempenho superior quando comparado ao cenário atual, que reproduz a situação vigente da interseção. Os resultados da simulação do cenário alternativo evidenciam que mitigar ou eliminar os pontos de conflito de tráfego otimiza a operação da interseção.

Nota-se que, em relação ao cenário atual, houve uma redução de 45% no tempo de viagem dos veículos, de 65% na densidade da interseção, de 89% no tempo de atraso e de 95% na fila média de veículos. Além disso, a velocidade média dos veículos que utilizam a interseção passou a ser cerca de 25% maior do que no cenário atual (Figuras 6 e 7).



Figura 6 – Simulação do Cenário Atual

Figura 7 – Simulação do Cenário Alternativo

Além dos resultados de operação dos veículos pela interseção, também foram coletados dados de emissão de poluentes da rede de simulação. O AIMSUN utiliza dois modelos para o cálculo das emissões de CO₂ e NO_x. O primeiro é o QUARTET (1992), que avalia a emissão de cada veículo para cada intervalo de tempo de simulação com base nos estados operacionais dos veículos, como marcha lenta, cruzeiro, aceleração ou desaceleração, e na velocidade. O segundo é um modelo baseado no artigo "Modelagem de emissão de tráfego instantânea e a influência dos limites de velocidade do tráfego" (PANIS et al., 2006).

A comparação dos resultados de emissão de poluentes mostrou-se satisfatória, com redução de cerca de 35% na emissão de dióxido de carbono e de 30% na de óxidos de nitrogênio do cenário atual para o cenário alternativo. Tal fato evidencia que a diminuição do trânsito existente atualmente, ou seja, permitir o fluxo dos veículos sem conflitos de tráfego na interseção pode diminuir a emissão de poluentes na região.

Os ganhos operacionais e ambientais observados no cenário alternativo são consistentes com o que a literatura recente reporta para intervenções de reconfiguração geométrica apoiadas em microsimulação. Bayata et al. (2025), por exemplo, obtiveram, em um corredor semaforizado, reduções mais modestas de emissões e de tempo de atraso do que as verificadas neste estudo, o que se explica pelo fato de as intervenções propostas para o entroncamento das BR-050/BR-262 serem mais estruturais — envolvendo desnivelamento de movimentos e eliminação de pontos de conflito, e não apenas ajustes de tempo semafórico ou geometria local. Esse contraste sugere que ganhos mais expressivos tendem a estar associados a intervenções de maior porte, o que também implica custos de implantação mais elevados, um aspecto não quantificado neste estudo e que representa uma limitação relevante para a avaliação da viabilidade prática da proposta. Trabalhos como o de Bayata et al. (2025) mostram a possibilidade de incorporar os custos de implantação diretamente na comparação entre alternativas, por meio de métodos multicritério, o que constitui uma direção natural para o aprofundamento deste estudo. Quanto à segurança, os achados de Yaibok et al. (2024) reforçam a necessidade de cautela ao interpretar a redução dos indicadores operacionais como sinônimo direto de maior segurança: em seu estudo, intervenções que reduziram pontos de conflito nem sempre mantiveram os mesmos ganhos de fluidez, evidenciando um possível trade-off entre segurança e capacidade que não foi avaliado quantitativamente no presente trabalho, mas que deve ser objeto de análise específica, por exemplo, por meio de modelos de conflitos de tráfego simulados (Surrogate Safety Assessment), antes da implantação da proposta.

5. Considerações Finais

Este estudo apresentou uma análise detalhada do entroncamento entre as rodovias BR-050 e BR-262, localizado na cidade de Uberaba, utilizando a microssimulação de tráfego. A partir da modelagem do cenário atual e da proposta de um cenário alternativo, foram possíveis verificar os impactos das modificações geométricas e operacionais na fluidez e segurança viária.

O método utilizado baseado nos dados do Plano de Mobilidade Urbana de Uberaba, nos procedimentos do Manual de Projeto de Interseções do DNIT e no uso do *software* AIMSUN, permitiu uma modelagem consistente com os dados disponíveis e uma avaliação fundamentada das intervenções. A calibração do modelo pelo índice GEH indicou boa aderência entre os volumes simulados e os contados nos quatro pontos utilizados, reforçando a confiabilidade das análises, ainda que sem uma validação independente com dados de contagem não empregados na calibração.

Os resultados evidenciam que a remodelação proposta não apenas melhora indicadores isolados, mas modifica de forma consistente o padrão operacional da interseção: as reduções de 45% no tempo de viagem, de 89% no tempo de atraso e de 95% na fila média ocorrem simultaneamente à redução das emissões de CO₂ e NO_x, o que indica que, neste caso, a eliminação dos pontos de conflito geométrico beneficia tanto a fluidez quanto a sustentabilidade ambiental, sem o trade-off entre esses objetivos frequentemente reportado na literatura (BAYATA et al., 2025). Esse resultado reforça a contribuição prática do estudo: demonstra, para um entroncamento rodoviário-urbano real, classificado entre os pontos de maior gravidade de conflitos de tráfego da cidade, que uma reconfiguração geométrica fundamentada no Manual de Projeto de Interseções do DNIT (2005) e calibrada por microssimulação pode produzir ganhos operacionais e ambientais mensuráveis antes de qualquer investimento em obra.

A principal contribuição deste trabalho está, portanto, em oferecer uma metodologia replicável para a avaliação preliminar de reconfigurações geométricas em entroncamentos que combinam rodovias federais e vias urbanas, integrando dados de mobilidade urbana, contagens de tráfego e microssimulação calibrada pelo índice GEH. O estudo apresenta, contudo, limitações que devem ser consideradas na leitura dos resultados: os dados de origem e destino utilizados dependem da precisão amostral do PlanMob e da representatividade da plataforma TomTom; os custos de implantação das intervenções propostas não foram quantificados, o que limita a avaliação da viabilidade prática da proposta; e os ganhos de segurança foram inferidos a partir da redução de pontos de conflito geométrico, sem uma análise quantitativa de conflitos de tráfego simulados (Surrogate Safety Assessment), que permitiria avaliar mais diretamente o efeito da reconfiguração sobre o risco de sinistros. Como desdobramentos para pesquisas futuras, recomenda-se: (i) incorporar uma análise de custo-benefício das intervenções, inclusive por meio de métodos multicritério como o TOPSIS (BAYATA et al., 2025); (ii) validar os ganhos de segurança com técnicas de análise de conflitos simulados, a exemplo de Yaibok et al. (2024); e (iii) testar cenários intermediários entre a situação atual e a proposta aqui avaliada, de modo a subsidiar decisões de implantação em etapas.

Referências

ALBANO, João Fortini. Vias de transporte. Bookman Editora, 2016.

BAYATA, Halim Ferit; BAŞ, Fatih İrfan; DEMİRCİOĞLU, Muhammed Sami; ÇOLAK, Muhammed Ali. Appropriate Intersection Design Type Based on TOPSIS Multiple Criteria Decision Method with AIMSUN Mesoscopic Simulation. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, v. 49, n. 2, p. 1889-1899, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s40996-025-01789-3>. Acesso em: 11 ago. 2026.

CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro. Desafios da mobilidade urbana no Brasil. Texto para discussão, 2016. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/6664/1/td_2198.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

DNIT. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. Manual de projeto de interseções. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/718_manual_de_projeto_de_intersecoes.pdf. Acesso em: 12 jun. 2025.

GOOGLE EARTH. Google, 2025.

MORGAN, Craig J.; VEYSEY, Michael - Traffic Modelling Guidelines. ISBN 978-1-922194- 21-3.

OBSERVATÓRIO NACIONAL DE SEGURANÇA VIÁRIA. *Segurança no trânsito*. 2023. Disponível em: <https://www.onsv.org.br/pdi/livro-seguranca-no-transito>. Acesso em: 12 jun. 2025.

PANIS, Luc Int; BROEKX, Steven; LIU, Ronghui. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. Science of the total environment, v. 371, n. 1-3, p. 270-285, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.08.017>

PINHEIRO, Diogo Rafael Ribeiro. Microssimulação de Tráfego Aplicada a um Caso de Estudo da Cidade do Porto. 2018. Dissertação de Mestrado. Universidade do Porto (Portugal). Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/116488/2/296287.pdf>. Acesso em: 12 jun. 2025.

ROBLES, Daniel Gatti; RAIA JR, A. A. Correlação entre Conflitos e Acidentes usando a Técnica Sueca de Análise de Conflitos de Tráfego. In: XII CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM TRANSPORTES, 2008, Fortaleza. Anais do XXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes. da ANPET. Rio de Janeiro: Associação Nacional de Ensino e Pesquisa em Transportes, 2008. p. 952-963. Disponível em: <http://redpgv.coppe.ufrj.br/index.php/es/produccion/articulos-cientificos/2008-1/386-robles-raia-jr-cc/file>. Acesso em: 12 jun. 2025.

PMU. PREFEITURA MUNICIPAL DE UBERABA. *Plano de Mobilidade Urbana de Uberaba*. Uberaba: Prefeitura Municipal de Uberaba, 2024. Disponível em: <https://www.mobilidadeuberaba.com.br/>. Acesso em: 12 jun. 2025.

TOMTOM. *TomTom Traffic Index*. 2025

QUARTET Entregável N°2 (1992), Avaliação das Ferramentas Atuais para Avaliação Ambiental no QUARTET, Projeto DRIVE II V2018: QUARTET, Setembro de 1992.

WUNDERLICH, Karl E. et al. TAT volume III: guidelines for applying traffic microsimulation modeling software 2019 update to the 2004 version. United States. Federal Highway Administration, 2019. Disponível em: <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/43570>. Acesso em: 12 jun. 2025.

YAIBOK, Chaiwat; SUWANNO, Piyapong; PORNBUNYANON, Thaksakorn; KANJANAKUL, Chollada; LUATHEP, Paramet; FUKUDA, Atsushi. Improving urban intersection safety: insights from simulation analysis. IATSS Research, v. 48, n. 4, p. 523-536, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2024.10.005>. Acesso em: 11 ago. 2026.

ZARE, Nazanin; TUMMINELLO, Maria Luisa; MACIOSZEK, Elżbieta; GRANÀ, Anna. Beyond Efficiency: Integrating Resilience into the Assessment of Road Intersection Performance. Smart Cities, v. 8, n. 6, artigo 184, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/smartcities8060184>. Acesso em: 11 ago. 2026.