

MÉTODO PARA ESTIMAR O NÍVEL DE SERVIÇO EM INTERSEÇÕES DO TIPO ROTATÓRIA ALONGADA NÃO VAZADA LOCALIZADAS EM RODOVIAS DE PISTA SIMPLES

Davi Antônio Avelar Bretas¹

Rafael Quintão de Andrade²

José Elievam Bessa Júnior³

1, 2, 3 – Curso de Mestrado em Geotecnia e Transportes

Escola de Engenharia

Universidade Federal de Minas Gerais

Resumo: No Brasil, a elaboração de projetos de interseções se dá a partir de manuais elaborados por órgãos oficiais governamentais e por documentos como o *Highway Capacity Manual* (HCM). Todavia, existem alguns tipos de interseções, denominadas como interseções alternativas, que não são contemplados nesses documentos, sendo a rotatória alongada não vazada (RANV) um desses casos. Neste trabalho, é proposto um método para estimar o nível de serviço desse tipo de interseção em rodovias de pista simples brasileiras. Para tanto, foram realizadas coletas de dados em campo para obtenção de uma diversidade de correntes de tráfego e para caracterização das velocidades desejadas em locais com a presença de RANV's. O simulador de tráfego Aimsun Next foi utilizado para a criação de diversos cenários hipotéticos, o que permitiu o desenvolvimento de modelos para estimação das medidas de desempenho escolhidas para análise de RANV's (o atraso médio, d_i , e o tempo de viagem de distância extra, *EDTT*). Foi realizada a validação do método proposto, tendo sido observados que os modelos de tráfego produziram valores de d_i e *EDTT* próximos dos que foram encontrados em campo.

Palavras-chave: Simulação de tráfego. Interseções alternativas. Nível de serviço.

Abstract: In Brazil, the design of roadway intersections is based on manuals prepared by official government agencies and documents such as the Highway Capacity Manual (HCM). However, there are some types of intersections, termed alternative intersections, which are not included in these documents, and elongated roundabouts (ERs). This study proposed a method to estimate the level of service of this type of intersection on two-lane rural highways. For this purpose, traffic data were collected in the field to obtain a diversity of traffic patterns and to characterize the desired speeds at sites with ERs. The Aimsun Next traffic simulator was used to create several hypothetical scenarios, which allowed the development of models to estimate the performance measures chosen for ER analysis (the average delay, d_i , and extra distance travel time, *EDTT*). The validation of the proposed method was performed, and it was observed that the traffic models produced values of d_i and *EDTT* close to those found in the field.

Keywords: Traffic simulation. Alternative intersections. Level of Service.

1. Introdução

No Brasil, a elaboração de projetos de interseções se dá a partir dos preceitos contidos em manuais elaborados por órgãos oficiais, como o Manual de Projeto de Interseções do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005), que foi elaborado a partir dos manuais americanos *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets* e do *Highway Capacity Manual*, em suas versões existentes a época. Dessa forma, no Brasil, é comum a adoção de soluções geométricas de interseções não previstas em manuais de tráfego (TRB, 2022) e de projetos viários (AASHTO, 2018; DNIT, 2005), não havendo, assim, um referencial ou metodologias adequadas para dimensionamento e verificação da condição operacional nesses dispositivos.

Os estudos de interseções alternativas, ou *unconventional arterial intersection design (UAIDs)*, conforme definido em El Esawey *et al.* (2013), têm demonstrado que esses tipos de interseções, não convencionais, podem levar ao aumento da capacidade e da segurança em interseções em nível, com um custo bem menor em comparação com interseções com dois níveis. Nesse sentido, Dhattrak (2010) e Hummer (1998) ressaltam que as medidas tradicionais de tratamento de interseções em nível estão esgotadas e não são mais capazes de aliviar consideravelmente os congestionamentos, devido ao acelerado e recente crescimento do tráfego.

Um desses casos está relacionado com a adoção de solução de interseção alternativa com configuração geométrica do tipo Rotatória Alongada Não Vazada (*RANV*). Essa interseção é comumente encontrada no Brasil em rodovias de pista simples com fluxo não interrompido, especificamente em rodovias rurais não semaforizadas e distantes de perímetros urbanos. A *RANV* é caracterizada pela adoção de rótula central alongada que prioriza o tráfego principal da rodovia, em detrimento das outras aproximações, conforme demonstrado na Figura 1. Esse dispositivo não permite o cruzamento direto da via para realização de conversões à esquerda, para entrada ou saída da via secundária, e a troca direta de tráfego entre as vias secundárias, sendo necessária a utilização dos movimentos de retorno (*U-turns*) por meio da rótula central. Assim, não existem pontos de cruzamentos diretos entre veículos, mas áreas de entrecruzamento.

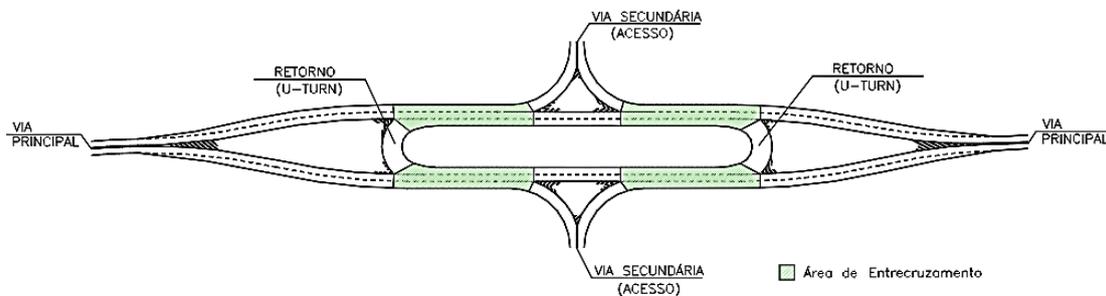


Figura 1 - Rotatória Alongada Não Vazada (*RANV*)

Normalmente, a *RANV* possui seu maior número de faixas (três) nas áreas de entrecruzamento, sendo uma faixa para os movimentos de mudança de velocidade próxima a rótula central, uma faixa para o tráfego de veículos direto pela rodovia, sem interesse de utilização dos acessos, e uma faixa para os movimentos de mudança de velocidade dos acessos lindeiros. Esse tipo de interseção tem sido implantado no Brasil, em rodovias de pista simples com fluxo de tráfego elevado, sendo recomendada sua adoção por editais de elaboração de projetos do DNIT e da ANTT (Ex. Edital 01/2022 da ANTT).

Do ponto de vista do planejamento e da operação, relacionados à capacidade e nível de serviço, interseções similares à *RANV* são tratadas no HCM-7 (TRB, 2022) também como interseções alternativas. Os dispositivos presentes no HCM-7, que mais se assemelham ao analisado neste trabalho, são a *right turn followed by u-turn (RTUT)*, também tratada como *restricted crossing U-turn (RCUT)*, e a *median u-turn (MUT)*, que também têm sido estudadas em alguns trabalhos (Dash *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2002; Al-Masaeid, 1999; Hummer, 1998). Todavia, salienta-se que nenhum desses trabalhos reflete a especificidade da *RANV* em termos de aplicabilidade, de características geométricas e de operação.

Posto isso, nota-se a importância do desenvolvimento de estudos que subsidiem o planejamento e a operação de interseções alternativas, especificamente no caso da *RANV*, por ser bastante aplicada em rodovias de pista simples brasileiras, com intuito de garantir aspectos satisfatórios relacionados a sua segurança e a sua operacionalidade. O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor um método capaz de estimar o nível de serviço em locais com esse tipo de interseção.

2. Revisão bibliográfica

Neste capítulo, são apresentados aspectos relacionados às características geométricas de projetos de interseções rodoviárias, focando em projetos com características presentes na RANV. Foram abordadas as principais referências normativas e realizada uma discussão em torno dos dispositivos viários, assim como a caracterização de interseções alternativas e uma revisão acerca das metodologias para cálculo da capacidade e do nível de serviço nesses locais.

As interseções alternativas, ou não convencionais, são assim chamadas devido a sua característica de realocar um ou mais movimentos de seus lugares habituais para junções secundárias, sendo mais comum o reordenamento dos movimentos de conversão à esquerda (TRB, 2016). As análises desse tipo de interseção são realizadas mais comumente em vias com fluxo interrompido, semaforizadas e com características predominantemente urbanas (TRB, 2016; FHWA, 2014; El Esawey *et al.*, 2011). Uma das possibilidades que justificam esse tipo de aplicação urbana é a predominância de estudos internacionais, que analisam a sua própria realidade e, no que se refere a interseções rodoviárias, difere da realidade brasileira.

Todavia, El Esawey *et al.* (2011) afirmam que o termo “interseções alternativas” também é utilizado para vias com fluxo não interrompido, visando a redução do atraso, a melhoria da segurança e a redução dos impactos ambientais, além de custo inferior com relação às soluções tradicionais. El Esawey *et al.* (2007) sugerem ainda que interseções alternativas, tratadas por eles como *unconventional arterial intersection design* (UAIDs), são mais adequadas às características rurais, se comparadas à sua aplicação urbana. Portanto, a partir dessas análises, enquadrou-se a rotatória alongada não vazada (RANV) como uma “interseção alternativa”. A RANV se coloca como uma configuração de interseção ainda não estudada com profundidade, e poderá contribuir positivamente para a melhoria da condição operacional e de segurança de interseções em rodovias de pista simples com elevados volumes de tráfego. Essa configuração combina elementos de soluções viárias existentes como a rotatória, a MUT, a UMUT e a NMER.

O HCM (TRB, 2022) dedica um capítulo a metodologias para determinação da capacidade e níveis de serviço de interseções alternativas das quais algumas se assemelham a RANV, como a *right turn followed by u-turn* (RTUT), ou *restricted crossing U-turn* (RCUT), e a *median u-turn* (MUT), também estudadas em Dash *et al.* (2017), Hughes *et al.* (2010), Zhou *et al.* (2002); Al-Masaeid (1999) e Hummer (1998), sendo essa última a mais semelhante com a RANV. No projeto de uma interseção do tipo MUT, os movimentos de conversão à esquerda podem ser parciais ou totalmente proibidos de forma direta, podendo ser alocados para cruzamentos a jusante da interseção primária, ou seja, nas alças de retornos (Hummer 1998). Diversos pesquisadores se dedicaram ao estudo do comportamento dessa solução geométrica de interseção, dentre eles Autey *et al.* (2011), Hughes *et al.* (2010), Bared e Kaisar (2002).

El Esawey e Sayed. (2011) analisaram a interseção *unconventional median u-turn* (UMUT), proposta por Shahi e Choupani (2009), que também se assemelha a RANV. Diferentemente da RANV, a UMUT considera a existência de um canteiro intransponível para os veículos que giram à direita, além de número de faixas e elementos geométricos, como raios de conversão, todos incompatíveis com as soluções adotadas nas rodovias brasileiras, conforme DNIT (2005). Mohamed *et al.* (2020) estudaram outra configuração geométrica, que também se assemelha à RANV, denominada *New Mega Elliptical Roundabout Intersection* (NMER), através de uma adaptação do modelo de tráfego proposto no HCM-6 (TRB, 2016) para análise da capacidade e nível de serviço de segmentos de entrecruzamentos. Todavia, essa interseção possui elementos geométricos distintos dos presentes na RANV, haja visto sua forma elíptica, o grande número de faixas adotado (mais característico em rodovias duplicadas).

Diferentes medidas de desempenho são usadas para avaliar o desempenho operacional de interseções alternativas e podem ser calculadas para movimentos específicos ou como uma média para todos os veículos na interseção. TRB (2010, 2016 e 2022), à semelhança de Hughes *et al.* (2010) e Shahi e Choupani (2009), identificaram a necessidade de obter uma medida de serviço específica para interseções alternativas capaz de representar operações em vias arteriais e em vias semaforizadas. Dessa forma, o atraso médio (*average control delay*) não seria adequado como a única medida para determinar os níveis de serviço para interseções alternativas, como no caso de interseções TWSC (*Two-way stop-controlled*), em que os movimentos diretos do tráfego à esquerda são inteiramente permitidos, pois não explicaria o atraso do caminho desviado presente nas interseções alternativas tratadas neste trabalho.

Em vez disso, TRB (2022) e Hughes (2010) defendem que as interações nas interseções são todas responsáveis por uma certa quantidade de tempo de viagem experimentado (*ETT*). Os deslocamentos dos veículos na interseção podem sofrer atrasos em suas junções, semaforizadas ou não, como, por exemplo, na conexão da via secundária com a principal. De forma similar, também podem ser observados “tempo de viagem de distância extra” (*EDTT*), devido aos deslocamentos dos veículos no trajeto da via secundária até a alça de retorno e novamente até o alinhamento da via secundária. A Equação 1 é usada para calcular o tempo de viagem experimentado (*ETT*), em que d_i é o atraso em cada junção “ i ”, encontrada no caminho através da interseção, e *EDTT* é o tempo de viagem de distância extra (FHWA, 2014).

$$ETT = \sum d_i + \sum EDTT \quad (1)$$

No HCM-7, os passos para avaliação operacional de interseções alternativas (TRB, 2022) são enumerados de um a dez, mas os que se aplicam a interseções não semaforizadas são apenas oito, que incluem o cálculo do *EDTT* e a estimativa do atraso adicional do entrecruzamento, sintetizadas através da Equação 2:

$$EDTT = \frac{D_t + D_f}{1.47 \times S_f} + a \quad (2)$$

em que: D_t = distância da junção principal para o retorno (u-turn); D_f = distância do retorno (u-turn) para a junção principal; S_f = velocidade de fluxo livre (mi/h) da via principal; a = atraso associado à desaceleração para uma curva e aceleração para a seguinte.

O *ETT* obtido para cada movimento da interseção é convertido em um *ETT* médio da interseção, ponderado pelo fluxo de tráfego (Equação 3) e, com isso, é determinado o nível de serviço (Tabela 1):

$$ETT_1 = \frac{\sum (ETT_k \times v_k)}{\sum v_k} \quad (3)$$

em que: ETT_1 = Tempo de viagem experimentado na interseção (s/veh); ETT_k = Tempo de viagem experimentado para o movimento “ k ” (s/veh); v_k = fluxo de tráfego para o movimento “ k ” (veh/h); k = Conjunto de todos os movimentos da interseção.

Observa-se que a RANV possui características semelhantes às interseções alternativas aqui apresentadas e, portanto, foi natural que as análises realizadas no presente trabalho tivessem como ponto de partida essas experiências. Dessa forma, a metodologia adotada neste trabalho para obter nível de serviço em RANVs, de forma semelhante ao HCM, foi baseada nas medidas de desempenho *EDTT* e *ETT*.

Tabela 1 – Critério para cálculo do NS para cada movimento em interseções alternativas (TRB, 2022)

ETT (s/veh)	Condição		
	$v/c \leq 1$ e $R_q \leq 1$ para todos os grupos de faixas	$v/c > 1$ para todos os grupos de faixas	$R_q > 1$ para todos os grupos de faixas
≤ 10	A	F	F
$>10-20$	B	F	F
$>20-35$	C	F	F
$>35-55$	D	F	F
$>55-80$	E	F	F
>80	F	F	F

Em que: v/c = Relação volume capacidade e R_q = Proporção média de fila para armazenamento

3. Coleta de dados de tráfego e calibração do Aimsun Next

A coleta e o tratamento de dados de campo tiveram por objetivo obter um conjunto de dados para serem utilizados no processo de calibração do simulador de tráfego (Aimsun Next) e na validação dos modelos de tráfego propostos para estimar as medidas de serviço. A coleta de dados de campo foi planejada de modo que fosse possível obter uma diversidade de fluxos de tráfego para observação das velocidades desejadas no segmento de entrecruzamento da interseção e em seus segmentos adjacentes. Dessa forma, foram realizadas pesquisas de tráfego em três interseções RANV (Figura 2) localizadas em três importantes rodovias do Estado de Minas Gerais - Brasil (denominadas de BR-040, BR-262 e MG-010). Por meio de filmagens, foram registradas 100 correntes de tráfego de 15 minutos. Em todos os casos, foram instaladas quatro câmeras, sendo posicionada uma em cada segmento adjacente a interseção, perpendicular à via e em tangente (sem interseções próximas), e outras duas câmeras posicionadas para obter a movimentação de tráfego na interseção.



Figura 2 – Interseções objeto das pesquisas de campo

Foi ainda realizada uma coleta de dados nas interseções com a utilização de veículo aéreo não tripulado (drone), para obtenção de dados relacionados à velocidade de fluxo livre dos veículos nos segmentos de entrecruzamento e, para validação do método proposto, também o *ETT*. Os fluxos de tráfego coletados em campo apresentaram volumes entre 50 veic/h e 1.200 veic/h, tendo sido registradas todas as movimentações na interseção. Os dados obtidos apresentaram percentuais de veículos pesados entre 10% e 50%.

Para tornar as simulações de tráfego, realizadas através do Aimsun Next, mais fidedignas às condições observadas em campo, foi utilizada a caracterização da frota de veículos pesados obtida em Silva *et al.* (2022). Os dados de potência veiculares foram obtidos através do registro das marcas e modelos de uma amostra de 450 caminhões, registrados em uma balança fixa situada em um dos pontos de maior tráfego veicular da rodovia BR-040/MG, com características similares às rodovias pesquisadas no presente trabalho. Outro parâmetro de importante inserção no Aimsun Next é a velocidade de fluxo livre dos segmentos, que, nesse caso, foi obtida das pesquisas realizadas por drone, considerando os veículos que trafegavam com *headways* maiores que 10 segundos (fora de pelotões). Observa-se que o valor crítico do *headway* estabelecido Washburn *et al.* (2018) é de 2,5 segundos; todavia, foi adotado um valor superior, com o intuito de se obter velocidades de fluxo livre em condição plena de fluxo livre sem a influência de outros veículos na corrente de tráfego.

Além da inserção de parâmetros relacionados à velocidade de fluxo livre e ao desempenho veicular, foi realizada a verificação da necessidade de calibração dos parâmetros comportamentais do simulador. Para tanto, foi utilizado um método análogo ao proposto em Silva *et al.* (2022), em que, para determinar os parâmetros mais relevantes, foram realizadas simulações de diferentes correntes de tráfego com os parâmetros de calibração com seu valor default e, posteriormente, com os valores mínimo e máximo atribuído a cada parâmetro. Para realização da análise de sensibilidade dos parâmetros comportamentais do Aimsun Next, foram utilizadas 50 correntes de tráfego de 15 minutos, referentes aos postos de pesquisas instalados nas rodovias BR-262 e BR-135.

Para a realização da análise de sensibilidade, foram consideradas duas medidas de desempenho, o atraso médio e a fila média, usualmente utilizadas para verificação da capacidade de interseções (Autey *et al.*, 2011 e Hughes *et al.*, 2010). Em seguida, foram calculadas as diferenças entre as medidas escolhidas, separadamente para as junções de ramos da interseção e para a via principal, de cada corrente de tráfego simulada, com valores mínimo e máximo de cada parâmetro do simulador, em relação aos resultados obtidos com os parâmetros default. A partir das diferenças obtidas para cada parâmetro analisado, foi realizado um teste t-student para amostras dependentes (pareadas), com um nível de significância igual a 5%. Na análise procedida, 54 parâmetros dos 58 analisados, não alteraram as medidas de desempenho consideradas. Para a medida de desempenho “atraso médio”, quatro parâmetros demonstraram serem significativos, tendo ocorrido o mesmo quando foi avaliada a “fila média”. Todavia, esses parâmetros apresentaram intervalos de confianças pequenos, o que indica baixa relevância prática.

Embora a hipótese inicial fosse a necessidade de calibração de algum parâmetro comportamental do Aimsun Next, como observado em Silva *et al.* (2022) e Bessa e Setti (2018), na literatura há trabalhos (Mohamed *et al.*, 2020; El Esawey e Sayed, 2011; Autey *et al.*, 2011; Hughes *et al.*, 2010 e Bared e Kaisar, 2002) que não efetuaram a calibração dos simuladores utilizados. Dessa forma, para realização de experimentos de simulações em interseções RANV, não foi necessário realizar a calibração dos parâmetros comportamentais do Aimsun Next.

4. Método de obtenção do nível de serviço

O método proposto para obter o nível de serviço em RANV's busca analisar os atrasos decorrentes das movimentações de maior conflito de tráfego referentes à conversão à esquerda, realizado a partir da via secundária ou a partir da via principal, e da troca direta entre as vias secundárias, no caso de interseções com quatro aproximações. Tal definição assume que os movimentos diretos do eixo da rodovia não possuem atraso experimentado significativo (TRB, 2022; El Esawey e Sayed, 2013), assim como as movimentações de conversão à direita, a partir da via secundária.

Foram utilizadas as medidas de desempenho atraso médio (d_i), para as junções dos ramos da interseção, e tempo de viagem de distância extra ($EDTT$), para os segmentos de entrecruzamento, para obter a medida de serviço tempo de viagem experimentado (ETT) para avaliação do nível de serviço, conforme descrito em TRB (2022) para interseções alternativas. No método proposto, de acordo com as condições geométricas e de tráfego e dos fluxos nos movimentos da interseção, deve-se calcular d_i e $EDTT_i$ e, conseqüentemente, o ETT . Por fim, o nível de serviço é determinado de acordo com a Tabela 1.

A partir dos resultados obtidos das simulações de tráfego, foram realizadas análises de correlação dos parâmetros geométricos e de tráfego com as medidas de desempenho escolhidas. Com as correlações estabelecidas, foram gerados os modelos de tráfego entre as variáveis dependentes (d_i e $EDTT$) e independentes (parâmetros geométricos e de tráfego). Os experimentos de simulação foram realizados a partir das variáveis informadas na Tabela 2, estabelecidos a partir da revisão bibliográfica realizada e de observações em campo. Nenhum dos estudos apresentados na revisão bibliográfica considerou o alinhamento vertical (greides) da via principal nos experimentos, nem apresentou justificativa para não consideração desses parâmetros. Nos experimentos com o Aimsun Next, foram realizadas 1.166.400 simulações, fruto das combinações das variáveis mostradas na Tabela 2, com três replicações em cada simulação, com diferentes sementes de números aleatórios.

Tabela 2 – Variáveis consideradas nos experimentos de simulação

Variável	Valores
Comprimento do entrecruzamento (m)	35; 45; 55; 65; 75; 85;
Velocidade de fluxo livre (km/h)	60; 70; 80; 90
Fluxo direcional da via principal (veic/h)	300; 600; 900; 1200; 1500; 1800
Distribuição direcional da via principal (%)	Iguais
Fluxo da via secundária (% Fluxo da via principal)	10; 20; 30; 40; 50
Porcentagem de veículos pesados (%)	10; 20; 30; 40; 50
Porcentual de veículos da via Principal virando à esquerda ou à direita (% Principal)	10; 20; 30
Classes das rampas <i>Upstream</i> (%)	1; 2; 3; 4; 5; 8
Classes das rampas <i>Downstream</i> (%)	1; 2; 3; 4; 5; 8

Os valores referentes ao comprimento do entrecruzamento foram estabelecidos com base em DNIT (2005) e de observações empíricas. A velocidade de fluxo livre mínima foi definida também em função de DNIT (2005) e de Silva *et al.* (2022). Por sua vez, os valores adotados para o fluxo direcional da via principal foram definidos de acordo com Washburn *et al.* (2018). A escolha dos alinhamentos verticais foi baseada em Oliveira (2021), que reclassificou as categorias inicialmente definidas em Washburn *et al.* (2018), considerando o veículo típico brasileiro. Foram então escolhidos valores médios de extensão e rampa que culminaram nas categorias apresentadas. Os demais parâmetros foram definidos a partir da análise dos estudos descritos na seção 2, de revisão da literatura.

A inclusão e a variação dos parâmetros descritos acima foram realizadas em um modelo de RANV dotado de três aproximações construído no Aimsun Next, constituído por todos os elementos considerados necessários para obtenção dos parâmetros escolhidos, conforme demonstrado na Figura 3. Nessa figura, o d_{i1} representa o local de medição do atraso pontual obtido na conexão da via secundária com a via principal. O d_{i2} representa o local de medição do atraso pontual obtido na conexão do ramo de retorno localizado entre um segmento dotado de entrecruzamento (anterior) e um segmento sem entrecruzamento (posterior). O d_{i3} representa o local de medição do atraso pontual obtido na conexão do ramo de retorno localizado entre um segmento sem entrecruzamento (anterior) e um segmento dotado de entrecruzamento (posterior). Todos esses locais foram considerados operando com sinal de “Pare”.

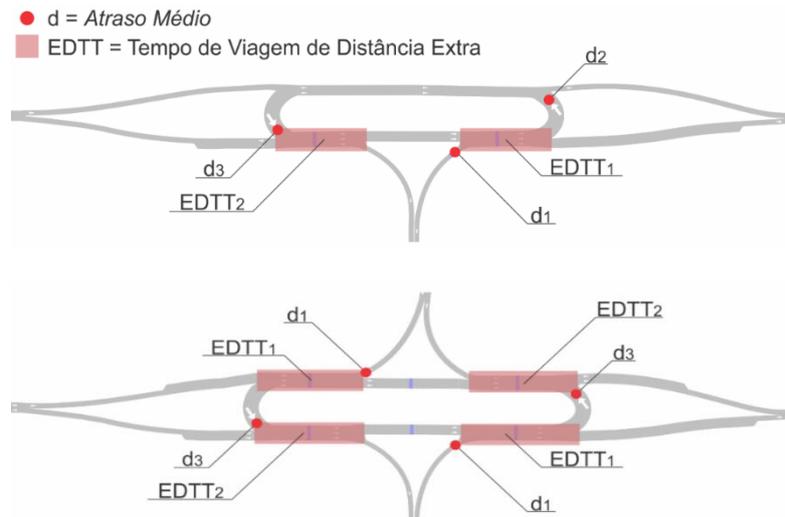


Figura 3 – Modelo de simulação de três e quatro aproximações

Por sua vez, o $EDTT_1$ representa o segmento de medição do tempo de viagem de distância extra localizado entre a conexão da via secundária (anterior) e a conexão com a alça de retorno (posterior). O $EDTT_2$ representa o segmento de medição do tempo de viagem de distância extra localizado entre a conexão com a alça de retorno (anterior) e a conexão da via secundária (posterior). Interseções dotadas de três aproximações possuem, portanto, dois movimentos conflitantes, sendo (a) conversão a esquerda a partir da via secundária ($ETT = d_{i1} + d_{i2} + EDTT_1$) e (b) conversão a esquerda a partir da via principal ($ETT = d_{i3} + EDTT_2$). As interseções dotadas de quatro aproximações possuem seis movimentos conflitantes, sendo (a) dois movimentos de conversão a esquerda a partir da via secundária ($ETT = d_{i1} + d_{i2} + EDTT_1$), (b) dois movimentos de conversão a esquerda a partir da via principal ($ETT = d_{i3} + EDTT_2$) e (c) dois movimentos de trocas de tráfego direto entre as vias secundárias ($ETT = d_{i1} + d_{i2} + EDTT_2$). Após a definição dos movimentos conflitantes e do cálculo do ETT por movimento, com a utilização dos modelos definidos neste trabalho, obtém-se os níveis de serviço individualizado por movimento conflitante. Para a utilização da Equação 3, a obtenção do nível de serviço da interseção foi realizada a partir da ponderação dos valores de ETT por movimento da interseção, com o peso sendo os volumes de tráfego.

Das simulações de tráfego realizadas, foram obtidos os resultados de atrasos médios (d_i) pontuais das conexões controladas por “PARE” (conexão da via secundária com a principal e dos retornos com a via principal) e do tempo de viagem de distância extra ($EDTT$). Posteriormente, foi identificado que os fluxos de tráfego da via principal e da via secundária apresentaram correlação com todas as variáveis dependentes, com exceção da d_{i1} , em que somente o fluxo da via secundária se mostrou correlacionado. As demais variáveis independentes não apresentaram correlação direta com as variáveis dependentes. Dessa forma, os modelos de tráfego foram

gerados em função das variáveis independentes que apresentaram correlação satisfatória com as medidas de desempenho relacionadas. As rampas (greides) do alinhamento vertical da via principal, considerados nas simulações de tráfego, foram descartados dos modelos por não apresentarem correlação com as medidas de desempenho escolhidas.

Utilizando de regressão linear, e de posse dos dados sintéticos produzidos pelas simulações, foram definidos os modelos e os coeficientes separadamente para obtenção de d_{i1} , d_{i2} , d_{i3} , $EDTT_{i1}$ e $EDTT_{i2}$, a saber:

$$d_{i1} = a_0 + a_1 \times q_s \quad (4)$$

$$d_{i2} = b_0 + b_1 \times q_p + b_2 \times q_s \quad (5)$$

$$d_{i3} = c_0 + c_1 \times q_p + c_2 \times q_s \quad (6)$$

$$EDTT_{i1} = d_0 + d_1 \times q_p + d_2 \times q_s \quad (7)$$

$$EDTT_{i2} = e_0 + e_1 \times q_p + e_2 \times q_s \quad (8)$$

em que: q_p = fluxo da via principal; q_s = fluxo da via secundária; d_{i1} = atraso pontual na conexão da via secundária com a via principal; $a_0 - a_1$ = coeficientes de ajuste para o cálculo de d_{i1} ; d_{i2} = atraso pontual na conexão do ramo de retorno localizado entre um segmento dotado de entrecruzamento (anterior) e um segmento sem entrecruzamento (posterior); $b_0 - b_2$ = coeficientes de ajuste para o cálculo de d_{i2} ; d_{i3} = atraso pontual na conexão do ramo de retorno localizado entre um segmento sem entrecruzamento (anterior) e um segmento dotado de entrecruzamento (posterior); $c_0 - c_2$ = coeficientes de ajuste para o cálculo de d_{i3} ; $EDTT_{i1}$ = tempo de viagem de distância extra localizado entre a conexão da via secundária (anterior) e a conexão com a alça de retorno (posterior); $d_0 - d_2$ = coeficientes de ajuste para o cálculo de $EDTT_{i1}$; $EDTT_{i2}$ = tempo de viagem de distância extra localizado entre a conexão com a alça de retorno (anterior) e a conexão da via secundária (posterior); $e_0 - e_2$ = coeficientes de ajuste para o cálculo de $EDTT_{i2}$.

Os modelos foram classificados em função do percentual de veículos pesados e da velocidade de fluxo livre, para todos os modelos, e em função do comprimento do entrecruzamento, para os modelos usados para obter $EDTT$. Na Tabela 3, é possível verificar exemplos de parâmetros b (Equação 4), encontrados com P_{HV} igual a 10% e velocidade de fluxo livre (FFS) igual a 60 km/h, para obter d_{i2} . As tabelas contendo os valores encontrados para cada modelo obtido podem ser vistos em Brêtas (2022).

Tabela 3 – Exemplo de coeficientes do modelo para obter d_{i2} , com $P_{HV} = 10\%$ e $FFS = 60$ km/h

P_{HV}	b_0	valor-p	b_1	valor-p	b_2	valor-p
10	-1,59723457	3,07398E-22	0,016655672	2,05553E-23	0,033534799	1,47402E-19
20	-0,50938272	1,0633E-13	0,014891656	5,03727E-54	N/A	0,062211258
30	N/A	0,072133881	0,0077268	5,76787E-06	0,01525234	7,97635E-05
40	-1,6122963	0,001607146	0,013801677	0,006962344	0,056271876	2,62797E-06
50	-1,99940741	4,73375E-06	0,021184252	1,52423E-06	0,040927961	4,08655E-05

Para os casos em que os coeficientes de ajuste apresentaram regressão com $valor-p$ superiores ao nível de significância de 5%, concluiu-se que esse coeficiente de ajuste não é aplicável (denotado na Tabela 3 por N/A). Para valores intermediários de FFS e P_{HV} , os valores das medidas de desempenho devem ser obtidos valores por meio de interpolação linear. Alguns modelos propostos neste trabalho podem eventualmente apresentar valores negativos para as medidas de desempenho; nesses casos, o valor deve ser considerado igual a zero.

Definidos os modelos e os coeficientes de d_i e $EDTT$, foi realizado, por meio de funções de ajustamento, um processo de validação da medida de desempenho ETT , obtidas pelos modelos propostos neste trabalho e em campo. As funções de ajustamentos escolhidas foram o erro normalizado médio (MNE), o erro normalizado absoluto médio ($MANE$), a raiz quadrada do erro normalizado quadrático médio ($RMSNE$) e o coeficiente de correlação (r), conforme Hollander e Liu (2008). Os valores encontrados para as funções de ajustamento estão apresentados na Tabela 4. Dos resultados apresentados, é possível dizer que os modelos propostos são adequados, tendo sido obtidos valores de MNE , $MANE$ e $RMSNE$ baixos. Na Figura 4, é possível ver os valores das medidas de desempenho obtidos com os modelos propostos e com os dados coletados em campo.

Tabela 4 - Funções Fitness para os Modelos de ETT

Modelo ETT	MNE	MANE	RMSNE	r
Modelo Linear	-4,10%	4,10%	0,98	0,853

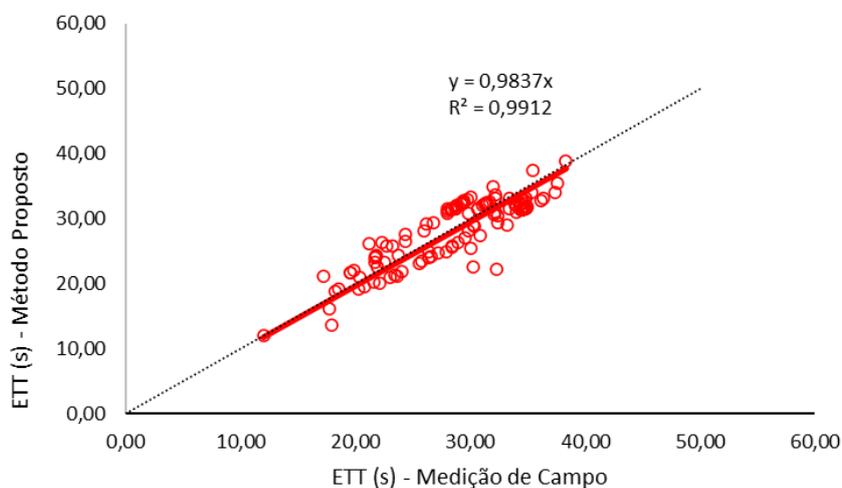


Figura 4 – Análise de regressão linear de valores de ETT obtidos com o método proposto e com os dados coletados em campo

A comparação obtida por meio do modelo linear demonstrou resultados bastante aderentes entre os dados obtidos em campo e o método proposto. Nessa análise o coeficiente de determinação desse modelo (R^2) foi de 0,9912, com desvios médios de somente 1,7%, o que indica que o modelo proposto superestima discretamente os dados de campo. A mesma similaridade foi encontrada quando o nível de serviço é calculado, obtidos com o método proposto e encontrados em campo.

5. Considerações finais

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um método para estimação do nível de serviço em interseções do tipo rotatória alongada não vazada para rodovias rurais de pista simples brasileiras. Este trabalho se justifica uma vez que a $RANV$ ser um elemento viário que, sistematicamente, é utilizado em rodovias de pista simples brasileiras e por não existirem metodologias adequadas para sua avaliação operacional. Para obtenção dos modelos de tráfego propostos, foram coletados dados em campo para verificar a necessidade de calibrar o software de simulação de tráfego Aimsun Next e, posteriormente, para validar o método proposto. Não foi verificada a necessidade de calibração do simulador de tráfego, fato que poderá ser objeto de futuras investigações com o uso de medidas alvo diferentes.

Dessa forma, foram simulados diversos cenários hipotéticos para condições geométricas e de tráfego para se obter dados sintéticos capazes de gerar modelos suficientes para obtenção das medidas de desempenho pretendidas (d_i e $EDTT$). Com os resultados das simulações, foram definidas as variáveis a serem utilizadas nos modelos através de testes de correlação, para, então, gerar os modelos de tráfego para obter as medidas de desempenho e a medida de serviço proposta. Não foi identificada correlação entre o alinhamento vertical (greides) da via principal e as medidas de desempenho escolhidas, o que é corroborado por outros métodos presentes na literatura, como o HCM (TRB, 2022).

Na etapa de validação, foi verificado que os modelos gerados se mostraram aderentes quando comparados aos dados coletados em campo, demonstrando que são adequados para a análise desse tipo de interseção em rodovias rurais de pista simples brasileiras. Todavia, resalta-se a limitação dos dados utilizados na etapa de validação e recomenda-se, em trabalhos futuros, a obtenção de dados em interseções com volumes de tráfego mais expressivos. Salienta-se, ainda, a necessidade da definição de critérios, adequados a realidade brasileira, para determinação do nível de serviço com base em ETT , de preferência a partir da opinião do usuário.

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPEMIG (processo TEC-APQ-03818-18) e ao CNPq (processos 315001/2021-6 e 439250/2018-8) pelo apoio financeiro, além da CAPES.

Referências

AASHTO. **A Policy on Geometric Design of Highways and Streets**. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C. 2018.

AL-MASAEID, Hashem. Capacity of U-turns at median openings. **ITE Journal**, 69(6), 28–34. 1999

AUTEY, Jarvis; SAYED, Tarek; EL ESAWEY, Mohamed. Operational performance comparison of four unconventional intersection designs. **Journal of Advanced Transportation**, 47. 2012.

BARED, Joe; KAISAR, Evangelos. Median U-turn design as an alternative treatment for left turns at signalized intersections. **ITE Journal**, 72(2), 50–54. 2002.

BESSA JR, José Elievam; SETTI, José Reynaldo. Evaluating Measures of Effectiveness for Quality of Service Estimation on Two-Lane Rural Highways. **Journal of Transportation Engineering**, Part A: Systems, v. 144, p. 04018056.1-04018056.10. 2018.

BRÊTAS, Davi Antônio Avelar. **Desenvolvimento de método para estimar o nível de serviço em interseções do tipo rotatória alongada não vazada localizadas em rodovias de pista simples**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2022.

DHATRAK, Amit; EDARA, Praveen; BARED, Joe. Performance analysis of parallel flow intersection and displaced left turn intersection designs. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2171, 33–43. 2010.

DNIT. Manual de Estudos de Tráfego. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes., Rio de Janeiro. (IPR. Publ. 723). 2006.

DNIT. Manual de Projeto de Interseções. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2.ed., Rio de Janeiro. (IPR. Publ. 718). 2005

EL ESAWEY, Mohamed; SAYED, Tarek. Comparison of two unconventional intersection schemes: crossover displaced left-turn and upstream signalized crossover intersections. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 2023, 10–19. 2007.

EL ESAWEY, Mohamed; SAYED, Tarek. Analysis of unconventional arterial intersection designs (UAIDs): state-of-the-art methodologies and future research directions. **Transportmetrica A: Transport Science**, 9(10), 860–895. 2013.

EL ESAWEY, Mohamed; SAYED, Tarek. Operational performance analysis of the unconventional median U-turn intersection design. **Canadian Journal of Civil Engineering**, 38(11), 1249–1261. 2011.

FHWA. EDC-2 **Intersection and Interchange Geometrics**. Federal Highway Administration. <https://www.fhwa.dot.gov/everydaycounts/edctwo/>, 2014a.

FHWA. **Median U-Turn Informational Guide**. Federal Highway Administration (FHWA), 2014b.

HOLLANDER, Yaron; LIU, Ronghui. The principles of calibrating traffic microsimulation models. **Transportation**, v. 35, n. 3, p. 347–362. DOI: 10.1007/s11116-007-9156-2. 2008.

HUGHES, Warren *et al.* Alternative Intersections/interchanges: informational report (AIIR). **Publication FHWA-HRT-09-06**. FHWA, U.S. Department of Transportation. 2010.

HUMMER, Joseph. Unconventional left-turn alternative for urban and suburban arterials – part one. **ITE Journal**, 68 (9), 26–29. 1998.

MOHAMED, Ahmed; Ci, Yusheng; Tan, Yiqiu. A Novel Methodology for Estimating the Capacity and Level of Service for the New Mega Elliptical Roundabout Intersection. **Journal of Advanced Transportation**, 2020, 8467152. 2020.

OLIVEIRA, Juliângelo. **Adaptação do HCM-6 para análise de rodovias de pista simples sem faixas adicionais em Minas Gerais**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia e Transportes – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. 2021.

DASH, Suman.; DEY, Partha. Estimation of critical gap of U-turns at uncontrolled median openings. **Transportation Letters**, 11(5), 229–240. 2017.

SHAHI, Jalil; CHOUPANI, Abdou-Ahad. Modelling the operational effects of unconventional U-turns at a highway intersection. **Transportmetrica**, 5(3), 173–191. 2009.

SILVA, Francisco *et al.* Analysis of no-passing zones to assess the level of service on two-lane rural highways in Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, v. 10, n. 1, p. 248–256. 2022.

TRB. **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board. Washington DC. 2010.

TRB. **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board. Washington DC. 2016.

TRB. **Highway Capacity Manual**. Transportation Research Board. Washington DC. 2022.

WASHBURN, Scott *et al.* **Improved Analysis of Two-Lane Highway Capacity and Operational Performance**. Final Report for NCHRP Project 17-65 National Cooperative Highway Research Program, TRB, Washington, Web-Only Document 255. 2018.

ZHOU, Huaghou. *et al.* Operational effects of U-turns as alternatives to direct left turns from driveways. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, 1796,(1), 72–79. 2002.