



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG
CENTRO DE TECNOLOGIAS E RECURSOS NATURAIS - CTRN
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL - UAEC
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

HAMILTON MARTINS DE MEDEIROS

**AVALIAÇÃO DE INTERSEÇÃO DO TIPO ROTATÓRIA NO MUNICÍPIO DE
CAMPINA GRANDE, UTILIZANDO SOFTWARE DE MICROSSIMULAÇÃO**

CAMPINA GRANDE - PB

2021

HAMILTON MARTINS DE MEDEIROS

**AVALIAÇÃO DE INTERSEÇÃO DO TIPO ROTATÓRIA NO MUNICÍPIO DE
CAMPINA GRANDE, UTILIZANDO SOFTWARE DE MICROSSIMULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof.^a:Dra. Izabelle Marie Trindade Bezerra

Coorientador: Eng. Hélio da Silva Queiroz Júnior

CAMPINA GRANDE – PB

2021

HAMILTON MARTINS DE MEDEIROS**AVALIAÇÃO DE INTERSEÇÃO DO TIPO ROTATÓRIA NO MUNICÍPIO DE CAMPINA GRANDE, UTILIZANDO SOFTWARE DE MICROSIMULAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, para encerramento do componente curricular e conclusão da graduação em Engenharia Civil.

Aprovado em: _____ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA

Prof^ª. Dr^ª. Isabelle Marie Trindade Bezerra – UFCG
(Orientadora) Nota _____

Eng. Hélio da Silva Queiroz Júnior- UFPE
(Coorientador) Nota _____

Prof. Dr. Walter Santa Cruz – UFCG
(Examinador interno) Nota _____

Dr. Leonardo Herszon Meira – UFPE
(1ºExaminador externo) Nota _____

Dra. Isabelle Yruska de Lucena Gomes Braga – UFPB
(2ºExaminador externo) Nota _____

Dedico este trabalho a meus pais Antonio e Felicia que tanto contribuíram na minha graduação e a toda a minha família que me apoiou, a meus amigos e professores que contribuíram na minha formação.

AGRADECIMENTOS

À Deus por iluminar e abençoar minha vida e também colocar pessoas incríveis no meu caminho.

À minha mãe, Felicia Freitas, por todo o amor, carinho, paciência e que sempre fez o possível para apoiar os meus estudos durante toda a vida.

Ao meu pai, Antonio Medeiros, pelo amor e carinho e sempre buscou me ensinar com sua experiência, mostrando o que a vida pode dá de melhor e os melhores caminhos a serem percorridos, como ser um homem de respeito e trabalhador. E ainda, por entender e apoiar a minha decisão de estudar em Campina Grande.

Aos meus irmãos, Arlesson e Alex, que participaram de grade parte da minha infância com as melhores, diversões, conversas e até mesmo discussões, tornando-a mais memorável e feliz.

Aos meus tios, Maria Rosicleide e Franciso Pereira, que me acolheram em sua casa durante todo o período da graduação de braços abertos com todo amor e carinho, fornecendo todo o suporte necessário para realização desse sonho e também pelos incontáveis momentos alegres e inesquecíveis que pude presenciar durante toda a graduação.

Aos amigos que adquiri na graduação, como Carlos Victor, Israel, Roberto, Gabriele Batista, Mateus Clemente, Milena, Luma, Geovana e Maria Teresa pelo suporte, conversas, brincadeiras, carinho e companheirismo, tornando a etapa de graduação umas das melhores que será lembrada eternamente em minhas memórias. As amizades aqui formadas são para toda a vida independente dos rumos que cada um irá seguir.

A orientadora, Prof. Dra. Izabelle Marie, que guardo enorme carinho e admiração, propiciou muitos momentos felizes que presenciei na universidade. Permitiu que eu participasse de alguns projetos ao se lado como orientando, como por exemplo, no projeto de extensão e PIBIC e que me fez despertar o interesse pela área de transportes, contribuindo assim, na metade de minha formação na UFCG, por fim, aceitou me orientar na elaboração desse trabalho com dedicação, paciência e carinho.

Aos demais familiares e amigos que de alguma forma contribuíram para minha graduação.

Por fim, agradecer a todos os professores que contribuíram de todas as formas e em todas as áreas do conhecimento na minha formação profissional.

“Não tentes ser bem-sucedido, tenta antes ser um
homem de valor.”

Albert Einstein

RESUMO

As rotatórias surgiram como ótimas soluções para os problemas de tráfego de grandes centros urbanos com a melhoria na segurança, pois aumenta a capacidade da interseção e diminui o tempo de espera, porém uma interseção mal projetada pode interferir nesses aspectos. Neste trabalho objetivou analisar a operacionalidade e eficiência de uma rotatória do município de Campina Grande-PB no que tange o nível de serviço e atraso. Para análise dessa interseção foi construída matriz de origem-destino escolhendo o horário e dois dias da semana considerados com maior fluxo, os dados foram coletados a partir de uma gravação com celular e um tripé divididos em quatro vídeos de 15 minutos. O *software* utilizado para microssimulação foi o PTV Vissim (*Traffic Simulation Software*) e optou por utilizar os modelos Wiedemann 74 e o 99 para a partir dos resultados obtidos definir o modelo com melhor representatividade, usando a quantidade de veículos contabilizados no mesmo intervalo de tempo da simulação como valor de referência para calibração, os parâmetros ajustados foram escolhidos com base na literatura. A determinação do *gap* crítico foi realizada com a coleta de dados na via com maior volume de modo a obter o maior número de brechas aceitas e rejeitadas. Com essas brechas calculou-se a crítica pelos métodos determinísticos de Raff e Wu e com o método usando a simulação determinou-se outro *gap* crítico utilizado nesse trabalho. A partir da construção da matriz de origem-destino determinou-se que a segunda-feira possui o maior fluxo de tráfego. Para simulação calibrada com o modelo Wiedemann 74, obteve-se um erro médio de 14,4%, com relação a quantidade de veículos e para calibração com Wiedemann 99 pôde-se obter um erro de apenas 11,8%. Os métodos determinísticos não mostraram eficácia e precisão na determinação do *gap* crítico, sendo o método com uso de simulador mais efetivo ao fornecer a brecha 2,5s, constatando que os motoristas da cidade são mais agressivos nas interseções quando comparada a outras regiões. Ao avaliar a simulação com funcionamento das rotatórias em três casos distintos determinou-se que ela opera com nível de serviço B e caso em que se tem prioridade das vias principais e semáforos instalados nas mesmas fornece o melhor nível de serviço.

Palavras-chave: Nível de serviço, Vissim, *gap* crítico

ABSTRACT

Roundabouts emerged as great solutions to solve traffic congestions in large urban centers. This solution improves traffic safety and security once it increases the intersection capacity and reduces waiting time. However, poorly designed intersections can interfere in these aspects. This research aims to analyze the operational capability and efficiency of a roundabout located in the city of Campina Grande. The study focuses mainly on the critical delay and service level of the roundabout. In order to evaluate this intersection, we build an origin-destination matrix based on the hour and day of the highest traffic flow. Data were collected using a tripod and a cellphone recording, divided into four videos of 15 minutes each. For microsimulation, we used the Vissim software and Wiedmann 74 and 99 models. From the results obtained through microsimulation, we choose the most representative model by using the number of vehicles counted at the same time-lapse as a calibration parameter. Adjusted parameters were selected based on the literature. The critical gap was selected based on data collected from the road with the most significant traffic volume in order to obtain the biggest number of accepted and rejected gaps. Besides, the critical gap was calculated using the Raff and Wu deterministic methods, while the simulation method was used to calculate other gap used in this study. According to the results obtained with the origin-destination matrix, Monday is the weekday that presents the highest traffic flow. Using the Wiedemann 74 model, the average error regarding vehicles number was 14,4%, while using the Wiedmann 99 model, the average error was only 11,8%. The deterministic methods did not show effectiveness and accuracy to determine the critical gap. Whereas, the simulation method was effective because it calculated a gap of 2.5 seconds, which means that drivers in Campina Grande are more aggressive in intersections if compared to other cities. After evaluating the simulation results into three different cases, we found that the roundabout operates at a service level B. Cases that provide the greatest service level are the ones that prioritize the main road and semaphores installed in it.

Key Words: Service Level, Vissim, Critical gap

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Pontos de conflitos de uma interseção de quatro ramos.	6
Figura 2: Movimentos dentro da rotatória.	10
Figura 3: Pontos de conflitos de uma interseção de 4 ramos e uma rotatória.	11
Figura 4: Poluição de monóxido de carbono em uma interseção de 4 ramos e uma rotatória.	11
Figura 5: Elementos físicos de uma rotatória moderna urbana.	13
Figura 6: Modelo de mini rotatória.	15
Figura 7: Rotatória urbana compacta.	16
Figura 8: Rotatória urbana com uma faixa de tráfego.	16
Figura 9: Rotatória urbana com duas faixas de tráfego.	17
Figura 10: Rotatória rural com uma faixa de tráfego.	17
Figura 11: Rotatória rural com duas faixas de tráfego.	18
Figura 12: Etapas da metodologia para calibração do simulador.	26
Figura 13: Métodos para determinação da brecha crítica em interseções não semaforizadas.	29
Figura 14: Localização da rotatória da UFCG.	32
Figura 15: Rotatória da UFCG com demarcação de zonas.	34
Figura 16: Instruções do funcionamento do programa para determinação da brecha.	38
Figura 17: Interface do programa para determinação de brecha.	38
Figura 18: <i>Gap</i> crítico da faixa esquerda determinado pelo método de Raff.	55
Figura 19: Frequência acumulada de brechas aceitas e rejeitadas pelo método de Wu - faixa esquerda.	55
Figura 20: Determinação do <i>gap</i> crítico pelo método de Raff - faixa direita.	56
Figura 21: Frequência acumulada do método de WU - faixa direita.	56
Figura 22: Relação do <i>gap</i> crítico com o atraso médio na saída 04.	59
Figura 23: Relação entre o atraso e comprimento de fila por saída - Caso A.	60
Figura 24: Relação entre o atraso e comprimento de fila por saída - caso B.	61

Figura 25: Modelo de simulação com semáforos nas zonas 1 e 4 - caso C.....	62
Figura 26: Relação entre o atraso e comprimento de fila por saída - Caso C.	63
Figura 27: Comparação do atraso médio nas zonas em cada modelo.	64

LISTRA DE QUADROS

Quadro 1: Análise comparativa entre interseção do tipo rotatória e semaforizada.	9
Quadro 2: Características geométricas de algumas rotatórias.	18
Quadro 3: Processo analítico para o cálculo do nível de serviço.	20
Quadro 4: Relação do nível de serviço com atraso do veículo.....	21
Quadro 5: Fatores de equivalência em unidades de carros de passeios (UCP).	22
Quadro 6: Comparação dos três casos de simulação.	23
Quadro 7: Descrição das entradas e saídas para a rotatória da UFCG.	35
Quadro 8: Caracterização geométrica e operacional da rotatória.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de veículos partindo da saída 01 (zona 1) - sexta feira.	41
Tabela 2: Quantidade de veículos partindo da saída 02 (zona 2) - sexta feira.	42
Tabela 3: Quantidade de veículos partindo da saída 03 (zona 3) - sexta feira.	42
Tabela 4: Quantidade de veículos partindo da saída 04 (zona 4) - sexta feira.	43
Tabela 5: Quantidade de veículos partindo da saída 05 (zona 5) - sexta feira.	43
Tabela 6: Matriz de Origem e Destino da rotatória - sexta feira.	44
Tabela 7: Quantidade de veículos partindo da saída 01 (zona 1) - segunda feira.	45
Tabela 8: Quantidade de veículos partindo da saída 02 (zona 2) - segunda feira.	45
Tabela 9: Quantidade de veículos partindo da saída 03 (zona 3) - segunda feira.	46
Tabela 10: Quantidade de veículos partindo da saída 04 (zona 4) - segunda feira.	46
Tabela 11: Quantidade de veículos partindo da saída 05 (zona 5) - segunda feira.	47
Tabela 12: Matriz de Origem e destino da rotatória - segunda feira.	48
Tabela 13: Quantidade de carros de passeio nas saídas 01 e 04 no intervalo de 10 minutos. ...	50
Tabela 14: Resultados da simulação para calibração do modelo W74.	50
Tabela 15: Parâmetros calibrados para o modelo Wiedemann 74.	51
Tabela 16: Resultados da simulação para calibração do modelo W99.	52
Tabela 17: Parâmetros calibrados para o modelo W99.	53
Tabela 18: Tempo de espera médio na saída 04 de cada faixa.	58
Tabela 19: Resultados das simulações para calibração do <i>gap</i> crítico.	58
Tabela 20: Resultados da simulação no caso A.	60
Tabela 21: Resultados da simulação no caso B.	61
Tabela 22: Resultados da simulação no caso C.	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CTB	Código de Trânsito Brasileiro
EPAM	Erro Percentual Absoluto Médio
FHWA	Federal Highway Administration
HCM	Highway Capacity Manual
RP	Regra de prioridade
STTP	Superintendência de Trânsito e Transportes Públicos de Campina Grande
UCP	Unidade de carros de Passeio
W74	Wiedemann 74
W99	Wiedemann 99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.1.1. <i>Objetivos específicos</i>	2
1.2. JUSTIFICATIVA	2
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	5
2.1. INTERSEÇÕES.....	5
2.2. ROTATÓRIAS	7
2.2.1. <i>Dimensões e tipos de rotatórias</i>	12
2.3. CAPACIDADE E NÍVEIS DE SERVIÇO DE INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS.....	19
2.4. SIMULAÇÃO.....	22
2.5. CALIBRAÇÃO DA SIMULAÇÃO	25
2.5.1. <i>Calibração dos parâmetros de Car-following</i>	27
2.5.2. <i>Calibração do parâmetro de brecha crítica (gap crítico)</i>	28
3. METODOLOGIA.....	32
3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DA ROTATÓRIA.....	32
3.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO.....	33
3.3. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ OD.....	33
3.4. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	35
3.4.1. <i>Calibração dos parâmetros de Car-following</i>	35
3.4.2. <i>Calibração dos parâmetros de brecha crítica</i>	36
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	40
4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E OPERACIONAL DA ROTATÓRIA	40
4.2. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ OD.....	41
4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO	49
4.3.1. <i>Calibração dos parâmetros de Car-following de Wiedemann</i>	49

4.3.2. Determinação da brecha crítica da interseção.....	54
4.4. ESTUDOS DE CASOS	60
5. CONCLUSÕES	65
6. REFERÊNCIAS	69
7. ANEXOS	74
ANEXO A – FOTOGRAFIAS DA ROTATÓRIA EM ESTUDO E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA COLETA DE DADOS DA MATRIZ OD E BRECHA.	74
ANEXO B – MODELO DE FOLHA PARA CONTAGEM DE VEÍCULOS.....	76
ANEXO C – PARTE DOS RESULTADOS DE BRECHAS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA.	78
ANEXO D – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DE BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE RAFF PARA FAIXA DIREITA.....	80
ANEXO E – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE WU – FAIXA DIREITA.....	82
ANEXO F – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE RAFF – FAIXA ESQUERDA.	84
ANEXO G – PARTE DOS DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE WU – FAIXA ESQUERDA.....	85

1. INTRODUÇÃO

Com o advento da segunda revolução industrial surgiram várias invenções como máquinas a vapor utilizadas na produção de fios para tecidos e nesse mesmo século surgiu o primeiro automóvel movido a vapor, mas apenas no século XX ocorreu a produção em massa por Henry Ford. Desse ano em diante, o número de veículos no mundo só aumentou e por consequência a necessidade de vias para trafegar.

Ao mesmo tempo que o número de veículos aumentava começaram a surgir conflitos e acidentes envolvendo veículos e pedestres, principalmente nas interseções que são consideradas os locais mais perigosos do trânsito. Em virtude desses acidentes deu-se início a criação das regras de trânsito como faixa de tráfego, introdução de placas de “Pare” nas vias não preferenciais, e com isso surgiram problemas como o congestionamento, tempo de espera, tamanho das filas, entre outros.

Em consequência do elevado número de problemas encontrados em uma interseção comum, surgiu o conceito de uma solução criada por William Eno que anos depois com algumas modificações seria utilizada nas interseções, denominada de rotatória ou rótula na qual os veículos trafegam em uma via circulatória. Esse modelo foi desenvolvido com o objetivo de reduzir a severidade dos acidentes ao permitir os veículos entrarem com um ângulo menor que 90° na interseção, aumentar a capacidade de tráfego e reduzir os atrasos enfrentados pelos motoristas.

Como as rotatórias apresentam ótimas soluções para diversos problemas do tráfego urbano nas cidades, os usos desses dispositivos só aumentam, Silva, Vasconcelos e Santos (2014 *apud* Balvedi, 2018) afirmam que as rótulas vêm se firmando ao longo das últimas décadas, como excelentes soluções em termos de custo-benefício, tendo em vista que podem alcançar elevados níveis de eficiência relacionados a múltiplas funções, como regulação do trânsito, moderação do tráfego, requalificação urbana e paisagística. Em Campina Grande, na Paraíba, não é diferente, a cidade possui muitas rotatórias, desde mini-rotatórias à rotatória rural.

No entanto, o projeto de uma interseção é muito complexo e exige estudo detalhado, pois quando mal dimensionado traz grandes problemas ao tráfego urbano. Costa (2010) aponta que uma interseção mal projetada pode interferir na segurança, na capacidade do tráfego e na velocidade de operação da via.

Uma interseção bem projetada para atender o melhor nível de serviço é bastante onerosa e complexa, os dados utilizados são variáveis, como por exemplo, o fluxo de veículos que possui valores muito distintos ao longo de um dia e até mesmo de uma semana. Logo, uma coleta de dados mal feita poderá subdimensionar o dispositivo. Diante disto, surge a proposta da simulação que permite avaliar uma interseção com mais precisão, se as modificações pretendidas são suficientes sem que haja modificação geométrica desnecessária, reduzindo os custos nesse quesito.

Moita e Almeida (2012) afirmam que a simulação contribui na otimização dos processos de análise da interseção, permitindo prever as consequências que as mudanças trarão na área em questão.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo analisar a operacionalidade e eficiência de interseção do tipo rotatória no município de Campina Grande, PB, no que tange a capacidade, nível de serviço e atraso, sugerindo nas situações críticas soluções obtidas a partir do uso de microssimulador.

1.1.1. *Objetivos específicos*

- Elaborar matriz origem-destino da rotatória analisada;
- Avaliar o atraso médio veicular, comprimento médio de fila e nível de serviço com uso da microssimulação;
- Comparar os resultados com as calibrações dos modelos *Car-following* Wiedemann 74 e Wiedemann 99;
- Calibrar os modelos de simulações com os dados coletados em campo;
- Determinar o *gap* crítico da interseção avaliada;
- Sugerir propostas para melhoria da operação do dispositivo utilizando o *software* de microssimulação.

1.2. JUSTIFICATIVA

As interseções da malha viária representam o principal problema do tráfego urbano tendo em vista que são pontos mais críticos em que podem ocorrer conflitos entre veículos e entre veículos e pedestres, além disso, são responsáveis pela qualidade do nível de serviço das vias, atrasos, tempo de percurso, ou seja, determinam a eficiência da malha viária. Por essa

razão, é de suma importância o estudo para obter a melhor solução a ser utilizada nessas áreas de modo a garantir uma boa operacionalidade e fluidez do tráfego da cidade.

De acordo com Araújo (2018), os grandes centros urbanos que apresentam problemas relacionados ao tráfego, como congestionamento e acidentes, ocorrem frequentemente ao longo do dia. Esses problemas têm a tendência de se agravarem conforme a malha viária se torna mais carregada comprometendo a qualidade de vida dos indivíduos. A cidade de Campina Grande se tornou um grande centro urbano ao longo dos anos com elevado crescimento populacional e conseqüentemente um crescimento ainda maior da frota veicular, devido à grande oferta de empregos com salários melhores e os problemas de uso do transporte público ocorreu um incentivo do consumo de veículos particulares.

Nos últimos dez anos o número de automóveis no Brasil cresceu 138,6% enquanto a população brasileira teve expansão de apenas 12,2% no mesmo período (Rubim e Leitão, 2013 *apud* Sgarbi e Barteles, 2018). Conforme dados do IBGE, em Campina Grande no ano de 2018 foram registrados 182.241 veículos, enquanto no ano 2006 apenas uma frota total de 74.961 veículos, ou seja, um aumento de 143% no volume de veículos. Levando em conta que as vias e as interseções da cidade tenham sido projetadas para o horizonte de projeto de 10 anos como indicado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), a possibilidade do volume de veículos ter ultrapassado o valor de projeto é bem elevada, por esse motivo, o estudo de interseções com microssimuladores com grandes solicitações se torna muito importante visando determinar seu nível de serviço atual e possíveis soluções para os problemas encontrados.

Segundo Portugal (2005 *apud* Medeiros, 2012), a simulação é uma ferramenta que permite representar o comportamento dos motoristas e as interações de um sistema viário e assim avaliar o desempenho do objeto de estudo. Ainda segundo o mesmo autor, os resultados das simulações permitem propor mudanças que possam melhorar a eficiência do sistema avaliado e auxiliar na tomada de decisão evitando alterações na via e no tráfego real.

O uso dos microssimuladores na engenharia de tráfego tornou-se uma ferramenta de grande auxílio aos engenheiros e estudantes que permite estudar o fluxo dos veículos em um determinado trecho de via, interseção, alocação de viagens etc. Com uso dessas ferramentas é possível obter resultados com maior rapidez e precisão, além de reduzir custos que seriam gastos com soluções de tentativa e erro como executadas por muitos órgãos de trânsito de cidades que não avaliam o impacto de alterações sem antes estudar.

No entanto, para que sejam usados os simuladores são necessários alguns dados de entrada que dependem do estudo a ser realizado. Além disso, é preciso calibrar os modelos para que representem o mais fielmente possível as atitudes dos motoristas no trânsito, se são agressivos ou mais moderados e como se comporta o fluxo do local de estudo. Apesar do *software* possuir valores padrões para os parâmetros obtidos no país de origem, geralmente não correspondem aos mesmos valores que seriam representativos, por exemplo, para a cidade de Campina Grande.

De acordo com Hourdakis *et al.*, (2003 *apud* Medeiros *et al.*, 2013) para que um simulador possa fornecer resultados confiáveis sobre o sistema de tráfego estudado é fundamental que seus parâmetros estejam devidamente calibrados e validados. Deste modo este trabalho tem como objetivo analisar a eficiência e a operacionalidade de uma interseção do tipo rotatória na Cidade de Campina Grande.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. INTERSEÇÕES

As interseções são os pontos mais críticos na engenharia de tráfego, deste modo, é definida como a área em que duas ou mais vias se unem ou cruzam, abrangendo todo o espaço destinado a facilitar os movimentos dos veículos que por ela circulam (BRASIL, 2005). De acordo com Neto (2013), o projeto e o desempenho operacional de uma interseção são analisados com base nos atributos geométricos e os atributos operacionais. Em relação aos aspectos geométricos, as interseções são divididas em duas categorias: em nível ou em desnível (interconexões) sendo diferenciadas no local de ocorrência do cruzamento.

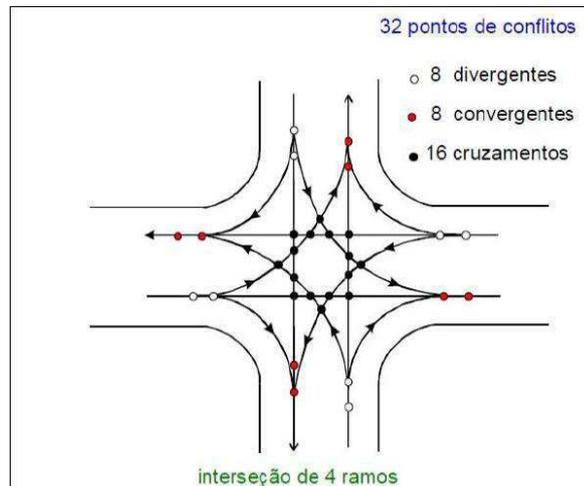
Por serem elementos de grande importância no tráfego urbano que determinam principalmente a fluidez do tráfego e também por serem os locais com os maiores índices de acidentes do trânsito precisam ser bem sinalizadas, assim como toda a via com sinalização horizontal e vertical sempre que necessário. De acordo com o CONTRAN (2007), a sinalização horizontal é composta por marcas, símbolos e legendas sobre o pavimento da pista de rolamento com a função de informar aos usuários comportamentos a serem seguidos, aumentando a segurança e fluidez na via ou interseção.

Ainda segundo o CONTRAN (2007), a sinalização vertical tem como objetivo repassar informações importantes para os condutores como de advertências e regulamentação acerca do comportamento adequado que aumenta a segurança.

Segundo Costa (2010), as interseções viárias são pontos nevrálgicos do funcionamento de uma rede viária de transportes, pois é lá onde se perde mais tempo e onde ocorre grande parte dos acidentes. Nas interseções ocorrem movimentos de fluxo que divergem, convergem e se cruzam. Por exemplo, numa interseção de quatro ramos tem-se 32 pontos potenciais de colisão, como mostra na Figura 1. As possíveis colisão são:

- **Convergente:** Quando dois veículos de vias diferentes têm a mesma via como destino, sejam eles da via principal para a secundária ou da secundária para a principal;
- **Divergente:** Quando dois veículos da mesma via têm destino diferentes, um veículo entra para esquerda e seguinte para direita ou um segue em frente e o outro realiza a curva;
- **Cruzamento:** Quando veículos de vias diferentes se interceptam em um ponto da via em comum.

Figura 1: Pontos de conflitos de uma interseção de quatro ramos.



Fonte: Costa (2010).

As interseções constituem elementos de descontinuidade em qualquer rede viária e representam situações críticas que devem ser tratadas de forma especial. O projeto de interseções deverá assegurar circulação ordenada dos veículos e manter o nível de serviço da via, garantindo a segurança nas áreas em que as suas correntes de tráfego sofrem a interferência de outras correntes, internas ou externas (BRASIL, 2005).

Em razão das interseções serem pontos críticos e de grande problema na engenharia de tráfego a qual demandam muitos estudos e adequação para o pleno funcionamento, são necessárias algumas medidas de desempenho que auxiliam na caracterização do tráfego. Segundo TRB (2010 *apud* Neris, 2018, p. 27-28), as medidas de desempenho são:

- Brecha (*gap*): Brecha entre dois veículos na via principal, medida entre a traseira do veículo que está à frente e a dianteira do segundo veículo em segundos;
- Brecha crítica (*gap* crítico): *Gap* mínimo, em segundos, a ser aceito por um veículo oriundo de uma via secundária com sinalização “Pare” ou “Dê a preferência” para adentrar no fluxo principal entre dois veículos ou apenas cruzar este fluxo.
- *Headway*: Possui significado semelhante ao do termo “*gap*”, porém a medida é realizada entre a dianteira de cada um dos veículos em uma fila, ou seja, é o intervalo entre a chegada de veículos consecutivos, em segundos. Essa medida é mais fácil de ser determinada já que os veículos são geralmente representados sem levar em consideração suas dimensões, ao contrário da “brecha”.
- *Headway* crítico: *Headway* mínimo, em segundos, a ser aceito por um veículo, oriundo de uma via secundária com sinalização “Pare” ou “Dê a preferência” para adentrar no fluxo principal entre dois veículos ou apenas cruzar este fluxo.
- *Headway* em fila (*follow-up headway*): É o intervalo, em segundos, entre dois veículos que entram em fila, a partir da via secundária, em uma mesma brecha (ou *gap*) da via principal. Geralmente o intervalo em fila é menor que o intervalo crítico.
- Atraso: Determina o acréscimo no tempo de viagem de um veículo em segundos. Esse acréscimo de tempo pode ter diversas origens, classificando essa variável em:

- Atraso controlado: Atraso causado pelas sinalizações das interseções (semáforo, “pare” ou “dê a preferência”). Basicamente esse atraso é determinado pelo tempo do veículo parado, em fila, à montante da interseção, pela desaceleração do veículo ao encontrar a fila, (...).
- Atraso Geométrico: Atraso causado pela configuração geométrica da via. Esse é o atraso, por exemplo, causado pelos veículos que estão utilizando uma rotatória na via circular, ou então veículos que estão realizando alguma conversão;
- Atraso por incidente: Atraso causado por algum incidente na via, seja por obras ou acidentes, por exemplo;
- Atraso por tráfego: Atraso causado pela interação entre veículos em uma via, como, por exemplo, em um congestionamento devido a alto fluxo de veículos;
- Atraso total: A soma de todos os atrasos anteriores em um trecho de via.

2.2. ROTATÓRIAS

A rotatória é uma interseção em nível geralmente com quatro ramos, mas pode ser com três ou até mais de 4 ramos. A rotatória é uma forma de interseção que acomoda o fluxo de veículos ao redor de uma ilha central e opera o controle de retenção no ponto de entrada dos veículos, priorizando aqueles que se encontram circulando no interior (LASTRAN, 2009).

Segundo Waddel (2000 *apud* Costa, 2010), as primeiras rotatórias datam há mais de 100 anos em diferentes tipos de rodovias. Uma das primeiras iniciativas dos técnicos preocupados com esta questão foi colocar uma marcação no centro da interseção. William Eno, foi o pioneiro na engenharia de tráfego ao desenvolver um sinal luminoso no centro da interseção em que os veículos circulavam em torno e recebeu os seguintes nomes “*sleeping Policial*”, “*Silent Policial*” ou “*Dummy Cop*”.

De acordo com Lastran (2009), o conceito de rotatória surgiu em 1903, em que os veículos deveriam circular em um sentido único, porém a primeira aplicação prática deu-se em Nova York, em 1905 seguido por Paris em 1907 e no Reino Unido em 1927. Entretanto, o termo rotatória só foi utilizado a partir de 1929 com algumas sugestões de melhoria do processo.

Federal Highway Administration (2000 *apud* Neris, 2018) afirma que a rotatória é um dispositivo que traz maior segurança e fluidez ao tráfego com a redução dos pontos de conflitos e reduz também a gravidade e número de acidentes se bem projetada. Além disso, esse tipo de interseção pode reduzir congestionamento e tempo de atraso proporcionado pelo aumento da capacidade do cruzamento.

As rotatórias são excelentes soluções para interseções viárias, pois reduzem o número de acidentes e a gravidade do acidente em virtude do ângulo de entrada dos veículos durante um conflito. Souza (2014) afirma ter diversos estudos que comprovam a utilização da interseção

do tipo rotatória em que o fluxo circulante preferencial proporciona menores impactos no meio ambiente por meio da redução da emissão de CO₂ e do ruído provocado pelos veículos.

Kansas (2003 *apud* Costa, 2010) apresenta os locais em que a implantação de rotatórias traz benefícios para o controle do tráfego:

- Interseções com históricos de problemas de segurança;
- Interseções com elevada quantidade de giros e retornos;
- Interseções com elevado volume de tráfego na hora de pico, mas baixo tráfego nas horas fora de pico;
- Interseções com possibilidade virada em U (retorno);
- Interseções próximas as Universidades, áreas residenciais urbanas ou comerciais;
- Interseções ou corredores que pretendem moderar o tráfego;
- Interseções com crescimento de tráfego incerto;
- Rodovias com histórico de problemas de excesso de velocidade.

Com o desenvolvimento das rotatórias no século XX, denominadas também de rótulas convencionais que funcionavam com base na “regra de prioridade a direita” que concede a prioridade ao tráfego que se aproximava na interseção, o fluxo circular começou a apresentar problemas de congestionamentos com o aumento da demanda veicular gerando atrasos excessivos.

Com base nisso, Waddell (1997 *apud* Balvedi, 2018) afirma que para eliminar esse problema, os primeiros estudos nos Estados Unidos tinham como premissa que a capacidade de uma rotatória convencional estava diretamente ligada ao comprimento do trecho de entrelaçamento das vias. Via de regra, quanto maior fosse a distância entre uma entrada e uma saída, maior seria a capacidade da rotatória. Essa teoria foi responsável pela utilização de diâmetros elevados para as ilhas centrais, o que além de favorecer a alta velocidade de entrada limitava sua aplicação devido ao espaço necessário para a construção desses dispositivos.

A regra para o fluxo em circulação na rotatória como prioridade sobre o fluxo entrante foi adotada em 1966, no Reino Unido, fazendo com que os veículos que estivessem no ponto de entrada fossem controlados pelo fluxo circulante, eliminando o congestionamento no interior da pista de circulação. Além de limitar a capacidade da rotatória para a disponibilidade de brechas no fluxo circulante, aumentou, dessa forma, a segurança do tráfego (ALMEIDA, 2009).

Almeida (2009) apresenta em sua pesquisa um quadro (Quadro 1) com algumas vantagens e desvantagens do uso da rotatória nas interseções em comparação com o uso de semáforos.

Quadro 1: Análise comparativa entre interseção do tipo rotatória e semaforizada.

Quesitos	Vantagens	Desvantagens
Segurança	Número reduzido de pontos de conflito quando comparado as interseções controladas por semáforos;	No período de familiarização com a rotatória, pesquisas apontam um aumento no número de acidentes;
	Velocidades operacionais menores, assegurando acidentes menos graves;	Interseções semaforizadas podem ser controladas quando se faz necessário.
	Redução do número de acidentes devido à baixa velocidade.	
Capacidade	Vale-se de limitação do tráfego ao invés de paradas, não travando o fluxo de veículos;	Semáforos apresentam um bom resultado quando aplicados em interseções que operam acima da capacidade prevista;
	Rotatórias provêm maior capacidade por faixa do que interseções semaforizadas, devido à omissão do tempo perdido quando nas paradas.	
Atrasos	Em períodos de baixa demanda, não ocorrem atrasos desnecessários das vias secundárias devido ao atraso obtido com o semáforo.	Quando ocorre formação de fila na entrada da rotatória, os condutores geralmente tendem a forçar sua entrada no fluxo circulante, promovendo aumento no número de acidentes.
Custo	Custos de manutenção da rotatória são menores do que o custo aplicado a interseções semaforizadas.	Por necessitar de mais espaço, a construção das rotatórias pode apresentar-se como mais onerosa que a implantação de semáforos;
Ciclistas e Pedestres	A ilha divisora proporciona refúgio para o pedestre, aumentando sua segurança;	Para os usuários de cadeiras de rodas, entretanto, podem causar dificuldades no acesso;
		Não são apropriadas quando o volume de pedestres é apreciável, visto a necessidade de circulação constante dos veículos na pista de circulação;
		Podem provocar atrasos para os pedestres, visto que a travessia só pode ser realizada quando encontram brechas aceitáveis;

Continuação Quadro 1: Análise comparativa entre interseção do tipo rotatória e semaforizada.

Quesitos	Vantagens	Desvantagens
Ciclistas e Pedestres	Baixa velocidade de tráfego aumentam a segurança tanto do ciclista quanto do pedestre.	Quanto maior a ilha central maior é o incremento na distância que os ciclistas e pedestres tem que percorrer.

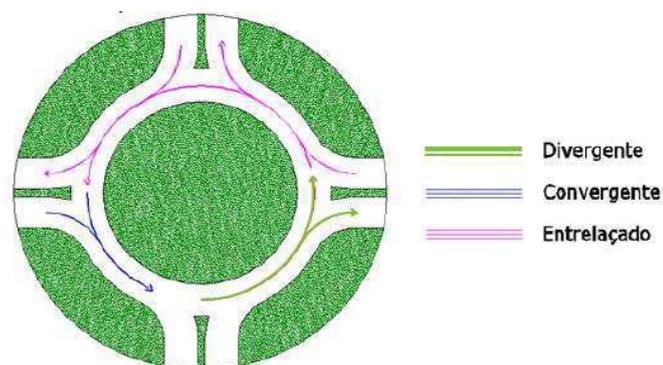
Fonte: Salvatti (1986 *apud* Lastran, 2009), adaptado.

De acordo Mathew (2006 *apud* Souza, J. V., 2015), em uma rótula tem-se três tipos de movimentos:

- Divergente: é o movimento quando os veículos se deslocam em uma mesma direção e que são separados em fluxos distintos, de acordo com os seus destinos;
- Convergente: é o oposto do divergente, isto é, quando os fluxos de tráfego que vêm de vários pontos e que vão para um destino comum são unidos em único fluxo;
- Entrelaçamento: é a combinação de movimentos de ambos os movimentos convergentes e divergentes em uma mesma direção.

Ainda segundo o mesmo autor, o dimensionamento da rotatória consiste em atender o comprimento e a largura de uma seção de entrelaçamento, na Figura 2 observa-se os movimentos descritos.

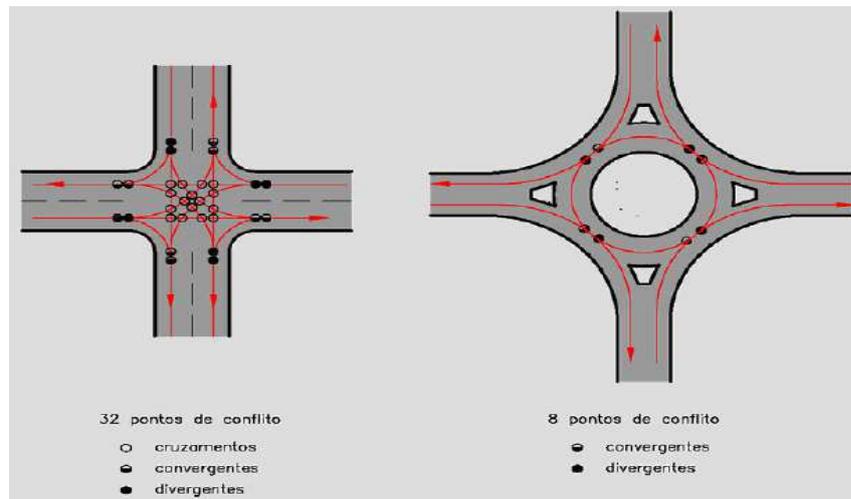
Figura 2: Movimentos dentro da rotatória.



Fonte: Mathew (2006 *apud* Souza, 2015).

Além das vantagens em relação a implantação de semáforos em interseções expostos por Almeida (2009), as rotatórias reduzem consideravelmente os números de conflitos em uma interseção de 4 ramos, a qual possui 32 pontos de conflitos sem o dispositivo e com sua implantação é possível reduzir para 8 pontos apenas, como mostra a Figura 3.

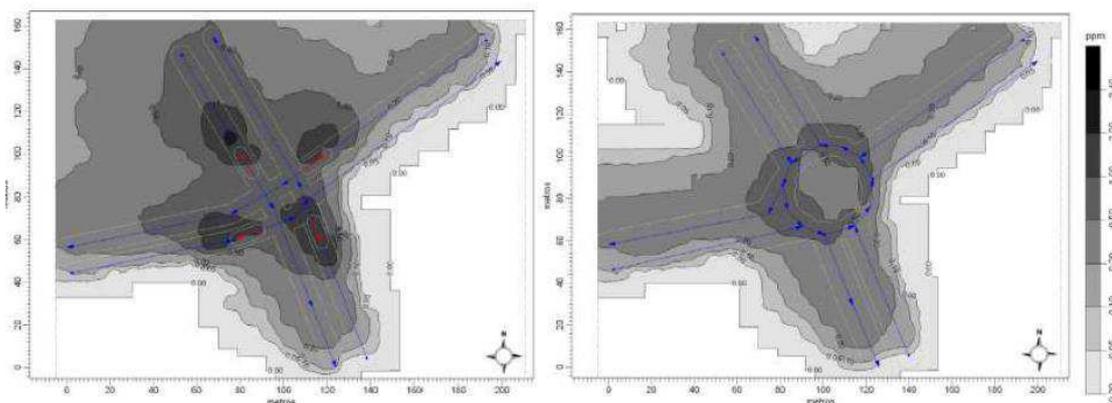
Figura 3: Pontos de conflitos de uma interseção de 4 ramos e uma rotatória.



Fonte: (Brasil, 2005).

Ainda, segundo Coelho (2012), além de reduzir os pontos de conflitos e aumentar a segurança viária, as rótulas diminuem de forma natural a velocidade na interseção, reduzem o consumo de combustível e a emissão de gases poluentes por meio da diminuição da rápida aceleração e desaceleração em interseções semaforizadas. Ele apresenta também a figura (Figura 4) de um estudo específico, desenvolvido por Lima *et al.*, (2009) que compara a concentração de monóxido de carbono em interseções.

Figura 4: Poluição de monóxido de carbono em uma interseção de 4 ramos e uma rotatória.



Fonte: Lima *et al.*, (2009 *apud* Coelho, 2012).

A interseção de 4 ramos possui uma concentração de monóxido muito superior a rotatória como observado na Figura 4, em que as tonalidades de cinza representam a concentração de monóxido de carbono variando do tom mais escuro (maior concentração) ao mais claro (sem concentração). Percebe-se que as proximidades da interseção de 4 ramos

possuem o maior nível de concentração, enquanto na rotatória, a quantidade é menor e mais uniforme.

De acordo com Coelho (2012) e estudado pelos holandeses e americanos pode-se afirmar que as rótulas reduzem em cerca de 40% o número de acidentes, e de 75% a 80% o número total de vítimas graves ao inserir uma rótula de faixa única, ao invés de uma interseção de 4 ramos.

Apesar da interseção do tipo rotatória apresentar diversos benefícios citados anteriormente, sua implantação necessita atender a critérios importantes, que de acordo com Souza (2014), os critérios são:

- **Fluxo equilibrado:** recomenda-se sua utilização em locais onde não haja discrepância elevada entre o volume de veículos da via principal e secundária. De acordo com DER-SC (2000), em seu manual de projeto de rotatórias, recomenda-se adotar rotatória somente quando a soma dos veículos de entrada dos dois “braços” de menor fluxo representar pelo menos 20% do volume total da interseção;
- **Espaço físico:** o diâmetro da rotatória varia diretamente com o veículo tipo a ser considerado em projeto. Mesmo que considerando somente o movimento de veículos automotores de pequeno porte, esta solução requer mais espaço que uma interseção semaforizada;
- **Compatibilidade local:** não se recomenda sua implantação em locais onde haja incompatibilidade com suas características, ou seja, localizada em uma rede cercada por interseções semaforizadas ou em regiões com significativa diferença de nível.

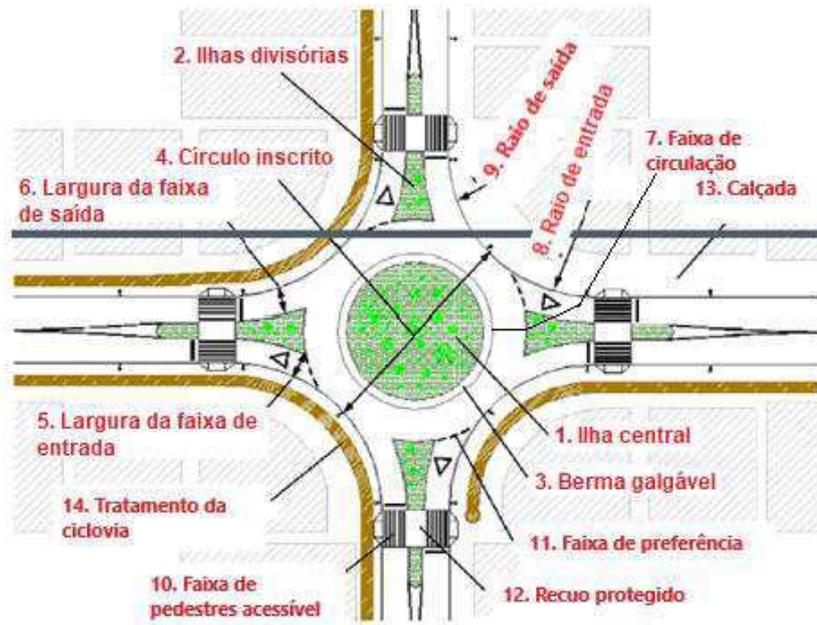
2.2.1. Dimensões e tipos de rotatórias

Segundo *Roadabouts: An Informational Guide* (2000 *apud* Schuster, 2012), no projeto de uma rotatória é importante definir as dimensões chave do dispositivo. Dessa forma, são apresentados na Figura 5 os elementos necessários para construção de uma rotatória e suas respectivas definições.

Os elementos recuo protegido e tratamento de ciclovia são incomuns na maioria das rotatórias, inclusive na rotatória analisada deste trabalho, ela não apresenta esses dois elementos, pois seriam imprescindíveis por ter circulação de ciclistas e pedestres nas proximidades da interseção. Os demais elementos são de praxe para construção de uma rotatória em interseção urbana.

Além disso, na ilha central da maioria das vias urbanas é comum a presença de decoração paisagística com árvores e obras de artes em engenharia que destaque a rotatória, fazendo uso do espaço destinado a ilha central, por exemplo, na rotatória estudada tem-se algumas palmeiras e elementos de alvenaria.

Figura 5: Elementos físicos de uma rotatória moderna urbana.



Fonte: Coelho, 2012, adaptado.

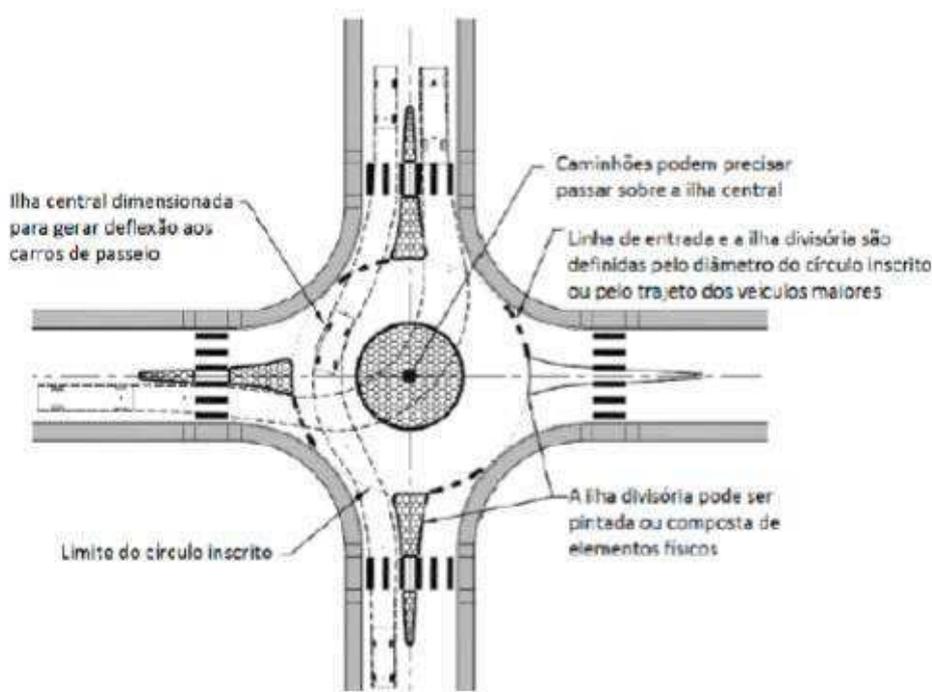
- **1 - Ilha central:** área elevada no centro de uma rótula em torno do qual o tráfego circula. Deve ser dimensionada de modo a causar deflexão do tráfego, impedindo que os veículos cruzem direto pela interseção;
- **2 - Ilhas divisórias/ Canalizadoras:** divisor físico para separar os fluxos de entrada e saída da rótula, podendo ser elevada ou pintada. O objetivo é canalizar e desviar o tráfego proporcionando a redução de velocidade, além de proporcionar espaço de armazenamento para os pedestres que atravessam;
- **3 - Berma galgável:** área rebaixada junto à ilha central que permite o galgamento se necessário por veículos grandes durante o giro, sem maiores restrições ou complicações operacionais. Utilizada em rótulas menores de uma faixa;
- **4 - Círculo inscrito:** o diâmetro do círculo inscrito é o parâmetro de base utilizado para definir o tamanho de uma rótula. Ele é medido entre as extremidades da pista de circulação;
- **5 - Largura da faixa de entrada:** a largura da faixa de entrada contribui para redução de velocidade de acesso à rótula. Trata-se de um dos fatores determinantes da capacidade e condições operacionais das rótulas modernas;

- **6 - Largura da faixa de saída:** A largura da faixa de saída contribui para o fluxo constante dos veículos na rótula. Trata-se também de um dos fatores determinantes da capacidade e condições operacionais das rótulas modernas;
- **7 - Largura da faixa de circulação:** largura da pista giratória em torno da ilha central. Esta largura não inclui a berma galgável e está diretamente ligada ao tipo de veículo previsto na rótula;
- **8 - Raio de entrada:** raio mínimo da curvatura do bordo de cada pista de acesso. Tem a função de garantir que os movimentos de giro sejam realizados com facilidade por todos os tipos de veículos;
- **9 - Raio de saída:** raio mínimo de curvatura de bordo de cada pista de saída da rótula. Sua função também é garantir que os movimentos de giro sejam realizados com facilidade por todos os tipos de veículos;
- **10 - Faixa de pedestres acessível:** faixas para travessias de pedestres acessíveis em todas as vias de acesso a rótula. O local de travessia deve ser afastado da faixa de “preferência”, com rampas de acessibilidade nas calçadas para a passagem de pedestres, cadeiras de rodas, carrinhos e bicicletas;
- **11 - Faixa de preferência:** Faixa interrompida de “Dê a preferência”, situada nas pistas de acesso a rótula, indicando que a preferência é do movimento circulatório;
- **12 - Recuo protegido:** Recuo rebaixado nas ilhas divisórias/canalizados para espera e acúmulo de pedestres, cadeirantes, carrinhos e bicicletas, para completarem a travessia em duas etapas com segurança;
- **13 - Calçada:** Espaço existente entre as pistas da rótula e as edificações no entorno, que devem estar livres e desimpedidas para a circulação de pedestres, e melhoria da visibilidade da interseção;
- **14 - Tratamento da ciclovia:** Vias de aproximação com ciclo faixas e ciclovias deverão ter um tratamento especial para a condução do ciclista para as travessias previstas. Ressaltando que, os ciclistas também podem percorrer a rotatória pelas pistas, se posicionando a direita, e sinalizando seus movimentos aos demais veículos, conforme previsto no Código de Trânsito Brasileiro (CTB).

As rotatórias modernas são classificadas de acordo com as dimensões do círculo inscrito e números de faixas, podendo ser mini rótulas, rótulas de faixas simples e rótulas de múltiplas faixas (FHWA, 2000 *apud* Balvedi, 2018).

De acordo com Balvedi (2018), as minis rótulas (Figura 6) apresentam como característica principal o diâmetro reduzido do círculo inscrito e a ilha central que também não é elevada em relação ao pavimento. Esse modelo tem a finalidade de facilitar a utilização da interseção por veículos maiores que teriam dificuldades de realizar manobras de giro a esquerda. Com base em *Federal Highway Administration* (2000 *apud* Costa, 2010) pode-se acrescentar ainda que esse modelo é útil em ambiente urbano com baixas velocidades e volumes e onde há impedimento na utilização de rotatórias convencionais e sua ilha apresenta diâmetro variado de 1 e 4 metros. Costa (2010) afirma ainda que a capacidade para esperada para mini-rotatórias é próximo à de rotatórias urbanas compactas.

Figura 6: Modelo de mini rotatória.



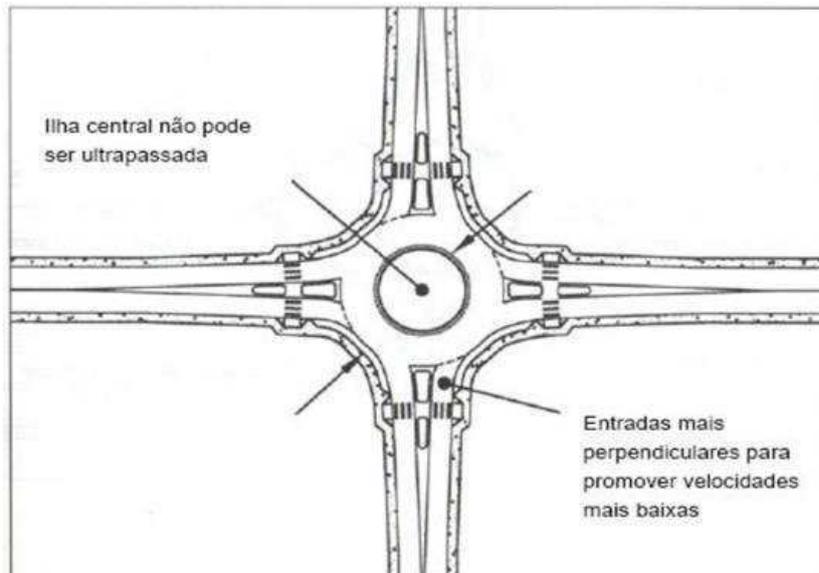
Fonte: FHWA (2000 *apud* Balvedi, 2018).

Costa (2010) apresenta classificações para rotatórias além da citada acima de acordo com o número de faixa e dimensões da ilha central:

Rotatória urbana compacta: são caracterizadas por apresentarem o diâmetro do círculo inscrito na interseção variando entre 30 e 37 metros, ilha central relativamente elevada de modo

a não permitir que os veículos não passem sobre a ilha, na Figura 7 apresenta os elementos dessa rotatória;

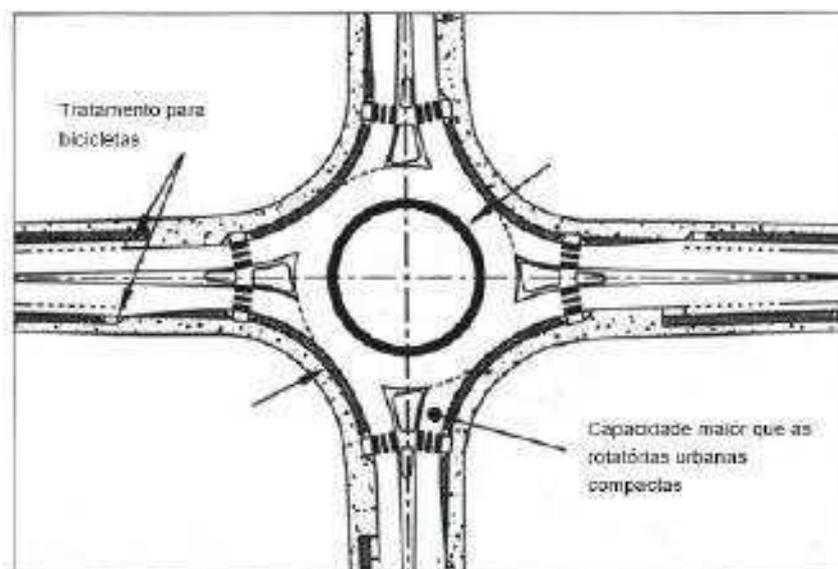
Figura 7: Rotatória urbana compacta.



Fonte: FHWA (2000 *apud* Costa, 2010), adaptado.

Rotatória urbana com uma faixa de tráfego: Esse modelo é caracterizado por possuir uma faixa de tráfego em todas as suas aproximações e uma única faixa de circulação e se diferenciam das urbanas compactas por possuírem diâmetro inscrito entre 37m e 45m. Suas entradas e saídas são tangenciais em relação ao anel de circulação que permite maior velocidade de operação, na Figura 8 observa-se o modelo e algumas características;

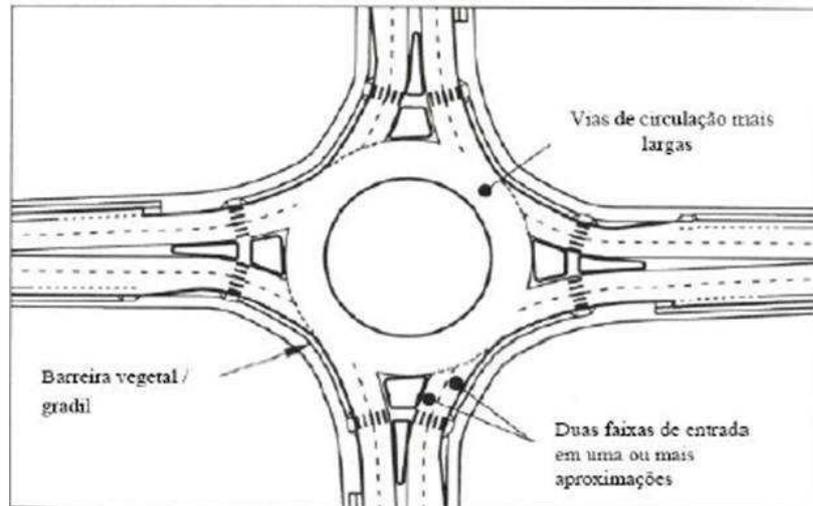
Figura 8: Rotatória urbana com uma faixa de tráfego.



Fonte: FHWA (2000 *apud* Costa, 2010), adaptado.

Rotatória urbana com duas faixas de tráfego: Esta classificação inclui todas as rotatórias em área urbana que tenha pelo menos uma entrada com duas faixas por sentido. Este tipo requer um anel de circulação maior para acomodar os veículos em movimento, as velocidades das pernas e faixa de circulação são similares a das rotatórias urbanas com uma faixa de tráfego, conforme apresenta a Figura 9.

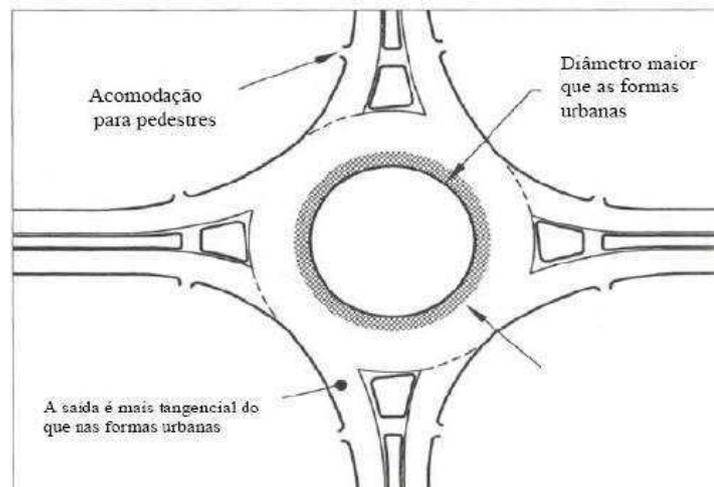
Figura 9: Rotatória urbana com duas faixas de tráfego.



Fonte: FHWA (2000 *apud* Costa, 2010), adaptado.

Rotatória rural com uma faixa de tráfego: Este tipo de rotatória (Figura 10) apresenta um diâmetro maior que as rotatórias urbanas permitindo altas velocidades na entrada, circulação e saída isto porque a presença de pedestre é quase nula. Necessitam de um dispositivo de tratamento para o controle de tráfego na aproximação, fazendo com que os motoristas desenvolvam velocidade compatível com a de projeto para a rotatória;

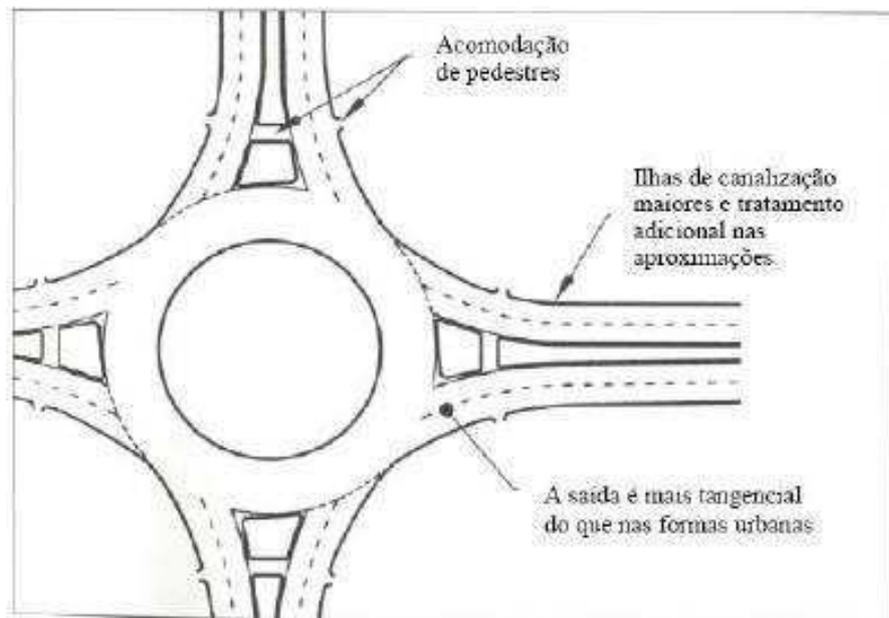
Figura 10: Rotatória rural com uma faixa de tráfego.



Fonte: FHWA (2000 *apud* Costa, 2010), adaptado.

Rotatória rural com duas faixas de tráfego: este tipo de rotatória tem características similares às rotatórias urbanas de faixa simples, por consequência, muitas características do seu traçado são semelhantes aos das rotatórias urbanas, a principal diferença é seu projeto com diâmetro e velocidade de entrada mais elevada, a Figura 11 apresenta as características dessa rotatória.

Figura 11: Rotatória rural com duas faixas de tráfego.



Fonte: FHWA (2000 *apud* Costa, 2010), adaptado.

Conforme Costa (2012) diz em seu trabalho, existem outros tipos de rotatórias como por exemplo: rotatórias desniveladas, rotatórias semaforizadas, rotatórias duplas e rotatórias dispostas em anel. O Quadro 2 apresenta características geométricas de algumas rotatórias segundo o mesmo autor.

Quadro 2: Características geométricas de algumas rotatórias.

Alguns tipos de rotatórias e suas características de projeto				
Elementos de Projeto	Mini-rotatória	Urbana Compacta	Urbana com uma faixa de tráfego	Urbana com duas faixas de tráfego
Velocidade de projeto máxima recomendada na entrada da interseção	25 km/h	25 km/h	35 km/h	40 km/h
Máximo número de faixa de entrada por aproximação	1	1	1	2

Continuação Quadro 2: Características geométricas de algumas rotatórias

Alguns tipos de rotatórias e suas características de projeto				
Elementos de Projeto	Mini-rotatória	Urbana Compacta	Urbana com uma faixa de tráfego	Urbana com duas faixas de tráfego
Tamanho do diâmetro do círculo inscrito	15-27 m	30- 37 m	37-45 m	46-67 m
Volume de serviço de um dia típico em rotatórias com quatro aproximações (veíc. /dia)	15.000	15.000	20.000	Aproximadamente 40.000 – 50.000

Fonte: FHWA (2000 *apud* Costa, 2012).

Com base Taekratok (1998 *apud* Souza, 2015), a implantação de uma rotatória necessita que seu projeto observe e atenda os seguintes requisitos:

- Tipos de veículos;
- Velocidade regulamentar;
- Áreas visuais;
- Ângulos e deflexões;
- Ilha central;
- Largura da via circular;
- Diâmetro da circunferência;
- Projeto de entrada e saída das vias de aproximação;
- Ilha separadora;
- Topografia e drenagem;
- Sinalização horizontal e vertical;
- Iluminação;
- Paisagismo.

2.3. CAPACIDADE E NÍVEIS DE SERVIÇO DE INTERSEÇÕES NÃO SEMAFORIZADAS

As interseções impactam diretamente na capacidade da via, dessa forma, no Manual de Projeto de Interseções do DNIT (2005) é dito que as interseções devem ser projetadas para acomodar os volumes de tráfego determinado para o 10º ano após sua abertura. “O desempenho operacional de uma interseção é frequentemente avaliado através da sua capacidade de escoamento do tráfego” (OLIVEIRA, 2016). Segundo *Highway Capacity Manual- HCM* (2010 *apud* OLIVEIRA, 2016), a capacidade é definida como o fluxo máximo com que os veículos atravessam uma interseção ou trecho de via durante um período de tempo sem a interrupção do tráfego.

O Manual HCM edição 2000, apresenta uma metodologia para a determinação da capacidade de rotatórias modernas com apenas uma faixa de tráfego e com base nas pesquisas

de outros países, o número de faixas de entrada e de circulação são essenciais para a determinação da capacidade da rótula.

Para avaliação operacional das rotatórias sugere-se a determinação da capacidade e do nível de serviço. A capacidade é definida como o número máximo de veículos que poderá passar por um determinado trecho de uma faixa ou pista durante um determinado período de tempo, sob condições reais predominantes na via e no tráfego (MANUAL DE INTERSEÇÕES, 2005).

HCM (2010 *apud* Neris, 2014) sugere o processo analítico para determinação da capacidade e do nível de serviço em cada faixa de tráfego que chega à rotatória, conforme apresentado no Quadro 3.

Quadro 3: Processo analítico para o cálculo do nível de serviço.

Passo 1: Converter o volume de veículos em taxa de fluxo
Passo 2: Ajustar a taxa de fluxo para veículos pesados
Passo 3: Determinar a taxa de fluxo circulante e que sai da rotatória
Passo 4: Determinar o fluxo de entrada por faixa
Passo 5: Determinar a capacidade de cada faixa de entrada em unidade de carros de passeio
Passo 6: Determinar impedância devido aos pedestres
Passo 7: Converter taxa de fluxo e capacidade, por faixa, por veículo, por hora
Passo 8: Calcular razão da taxa de fluxo pela capacidade da faixa
Passo 9: Calcular a média de atraso de controle em cada faixa
Passo 10: Determinar o nível de serviço em cada faixa e em cada aproximação

Fonte: HCM (2010 *apud* Neris, 2014), adaptado.

Segundo Neris e Ferraz (2014), a avaliação do nível de serviço de uma rotatória não possui critério bem definido, entretanto, o HCM – *Highway Capacity Manual* indica que seja feito com base nos valores de atrasos. No Quadro 4 estão relacionados os valores de atrasos com o determinado nível de serviço (levando em consideração que se o volume for superior à capacidade da via, o nível de serviço é sempre F).

Quadro 4: Relação do nível de serviço com atraso do veículo.

Atrasos (s/veíc.)	Nível de Serviço	
	$V/C \leq 1$	$V/C > 1$
0-10	A	F
>10-15	B	F
>15-25	C	F
>25-35	D	F
>35-50	E	F
>50	F	F

Fonte: HCM (2010 *apud* Neris, 2014).

Cada nível de serviço apresenta uma característica relacionada à fluidez na interseção e podem ser caracterizados conforme o Manual de Projeto de Interseções do DNIT (2005):

- Nível de serviço A: A maioria dos veículos passa livremente pela interseção praticamente sem sofrer atrasos;
- Nível de serviço B: A capacidade de deslocamento da via secundária é afetada pelo fluxo na via principal, porém os atrasos são relativamente pequenos;
- Nível de serviço C: Número expressivo de veículos na via principal e inicia a formação de filas na via secundária, mas sem grande extensão e duração;
- Nível de serviço D: Os veículos da via secundária são obrigados a efetuar paradas e o tempo de espera pode ser elevado e, mesmo que forme filas grandes, elas tendem a reduzir. O tráfego permanece estável;
- Nível de serviço E: Há grandes retenções de veículos que, enquanto não reduz o volume de tráfego, tendem a se manter. Os tempos de esperas são elevados e, com pequenos aumentos no volume, pode levar o tráfego ao colapso. Essa é a situação em que atinge a capacidade da interseção;
- Nível de serviço F: Sobrecarregamento da interseção. O volume de veículos é maior que a capacidade da via, ou seja, as filas e o atraso tendem a aumentar caso não haja uma diminuição de veículos chegando.

Para determinar o nível de serviço da rotatória é necessário inicialmente calcular a sua capacidade. De acordo com Neris (2014), a capacidade na entrada da rotatória é calculada de acordo com o número de faixas no sistema. Para o caso de uma via de uma faixa que chega a rotatória também de faixa simples, o cálculo é determinado da seguinte forma (Equação 1):

$$C_{e,pce} = 1130 \times e^{[(-10^{-3}) \times (V_{c,pce})]} \quad 1$$

Em que:

$C_{e,pce}$: Capacidade de entrada na rotatória equivalente em veículos de passeio;

$V_{c,pce}$: Volume de veículos de passeio que estão na rotatória que cruzam com a entrada em consideração.

Com base no Manual de Interseções (2005), para determinar a capacidade e o nível de serviço de uma rótula é necessário conhecer as origens e destinos dos veículos que chegam à interseção, de forma a determinar os fluxos dos diversos ramos e assim elaborar a Matriz de Origem e Destino. Nos estudos de tráfego deverão ser feitas contagens classificatórias de origem e destino nos períodos de pico, separando os veículos pelos seus tipos: carros de passeio, motocicleta, caminhão e ônibus e assim determinar a representação em unidades de carro de passeio usando o fator de equivalência conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5: Fatores de equivalência em unidades de carros de passeios (UCP).

Tipo de veículo	Automóvel	Motocicleta	Caminhão	Ônibus
Fato de equivalência	1,00	0,75	2,80	2,80

Fonte: CONTRAN,2014.

2.4. SIMULAÇÃO

Ao longo dos anos, após o surgimento dos veículos automotores e com o aumento de sua circulação nas cidades, surgiu a necessidade de organizar e controlar o tráfego para poder torna-lo mais seguro e rápido. Contudo, o estudo de alternativas a serem viabilizadas utilizavam modelos matemáticos de grande complexidade. Dessa forma, Porto (2018) afirma que a busca por melhorias no sistema viário passa por uma questão de melhoria de planejamento urbano. O desenvolvimento de métodos de simulação auxilia nesta tarefa, sendo de bom uso estes tipos de ferramenta na área de engenharia de transportes.

De acordo com *Federal Highway Administration* (2004 *apud* Porto, 2018), os simuladores têm como função: melhorar o processo de tomada de decisão; avaliar e priorizar alternativas de planejamento e operação; melhorar projetos e avaliar tempos e custo; reduzir distúrbios no tráfego; apresentar e convencer o público a respeito das estratégias adotadas; operar e gerenciar as capacidades das vias existentes e monitorá-las.

Segundo Portugal (2005 *apud* Neto, 2013), existem diversos *softwares* computacionais que permitem a representação de redes viárias, modelando a alocação de tráfego de pessoas e bens, utilizando diversos meios de transportes, em diferentes níveis de representação do fluxo veicular. De forma que seja possível realizar estudos de planejamento estratégico, avaliar impactos de medidas nas vias, analisar alterações na circulação viárias e até mesmo impactos nas alterações de planos semafóricos sem a necessidade de mudar o sistema real.

A simulação de tráfego melhora o entendimento da realidade em estudo; avalia o cenário em tempo real, acelerado ou desacelerado, simula cenários alternativos e avalia situações novas, inexistentes, de experimento inseguros sem causar riscos aos usuários HCM (2000 *apud* Porto, 2018).

O estudo de tráfego por meio de simulações pode ser dividido em três casos de representação: macroscópico, mesoscópico e microscópico. Desse modo, Maia (2007 *apud* Neto, 2013) compara os níveis de simulação em diversos aspectos, entre eles: agregação da simulação, consideração da variabilidade, detalhamento da simulação, agregação dos resultados, intervalos de atualização e principais aplicações, como apresentado no Quadro 6.

Quadro 6: Comparação dos três casos de simulação.

Tipo de Modelo	Microscópico	Mesoscópico	Macroscópico
Agregação da simulação?	Menor nível de agregação, considera os veículos individualmente (partículas)	Nível de agregação médio, pode considerar o veículo individualmente, pelotões (grupos) ou na corrente de tráfego (fluxo não interrompido)	Totalmente agregado, não considera interrupções nas correntes de tráfego
Considera a variabilidade?	Considera a variabilidade- Estocástico	Geralmente não considera a variabilidade, mas pode considerar variações no tráfego ao longo da simulação-Determinístico ou Estocástico	Não considera a variabilidade-Determinístico

Continuação Quadro 6: Comparação dos três casos de simulação.

Tipo de Modelo	Microscópico	Mesoscópico	Macroscópico
Detalhamento da simulação?	Simulação que captura a maioria dos detalhes-Grande detalhamento	Pode considerar os veículos individualmente- Mas não considera as suas interações –Médio detalhamento	Baixo detalhamento
Escolha de rotas?	Modela a escolha de rotas pelos veículos	Pode modelar a escolha de rotas pelos condutores / pode modelar incidentes / veículos podem alterar a rota devido a estímulos	Não modela a escolha de rotas pelos condutores / impossível a simulação de incidentes / não simula semáforos nem vias secundárias
Agregação dos resultados?	Exibe resultados bastante desagregados e precisos	Exibe resultados medianamente agregados (taxas médias para arcos ou categoria veicular)	Exibe resultados totalmente agregados (taxas médias para a rede)
Intervalos de atualização?	Modelam os veículos individualmente em intervalos da ordem de segundos	Podem simular o tráfego com agregação do intervalo tanto de segundos quanto de minutos	Modelam o fluxo de tráfego com incrementos de minutos no volume
Principais aplicações?	Redes pequenas, alteração na operação semafórica, Merging / diverging (entrada e saída de rampas), análise de entrada e saída de polos geradores de tráfego (PGT's), implementação de novas vias, análise de esquemas alternativos de controle de tráfego, definição de rotas de veículos	Redes médias / grande definição de rotas de veículos, implementação de novas vias, duplicação de vias, análise estratégicas, análise de esquemas, alternativas de controle de tráfego	Redes médias / grande implementação de novas vias, duplicação de vias, análise estratégica, modelagem de transporte coletivo urbano

Fonte: Maia (2007 *apud* Neto, 2013).

Como o objetivo principal deste trabalho é determinar os níveis de serviços de rotatórias com alto nível de detalhamento, logo, o nível de simulação a ser utilizado deve ser a microssimulação. De acordo com Ariotti *et al.*, (2004 *apud* Neto, 2013), os modelos microscópicos de tráfego são ferramentas ideais para estudos que exigem um elevado nível de detalhamento na representação do tráfego viário. Esses modelos representam cada veículo individualmente, comportamento dos motoristas e outras variáveis. Assim, o uso de modelos microscópicos é adequado para avaliar situações onde os efeitos das interseções individuais

entre veículos são importantes. Os microsimuladores mais recomendados são INTEGRATION, PARAMICS, AIMSUN, VISSIM e CORSIM.

Porto (2018) afirma que para um simulador ser confiável depende da sua habilidade de reproduzir resultados próximos da realidade e para isso, os modelos oferecem parâmetros a serem ajustados que modelem o comportamento em cada caso analisado. Ainda segundo o mesmo autor para a etapa de calibração utiliza-se o período de aquecimento (*warmup*) e uma quantidade mínima de replicações e que segundo Blomberg e Dale (2000), 10 replicações são suficientes para avaliar o desempenho do sistema simulado.

2.5. CALIBRAÇÃO DA SIMULAÇÃO

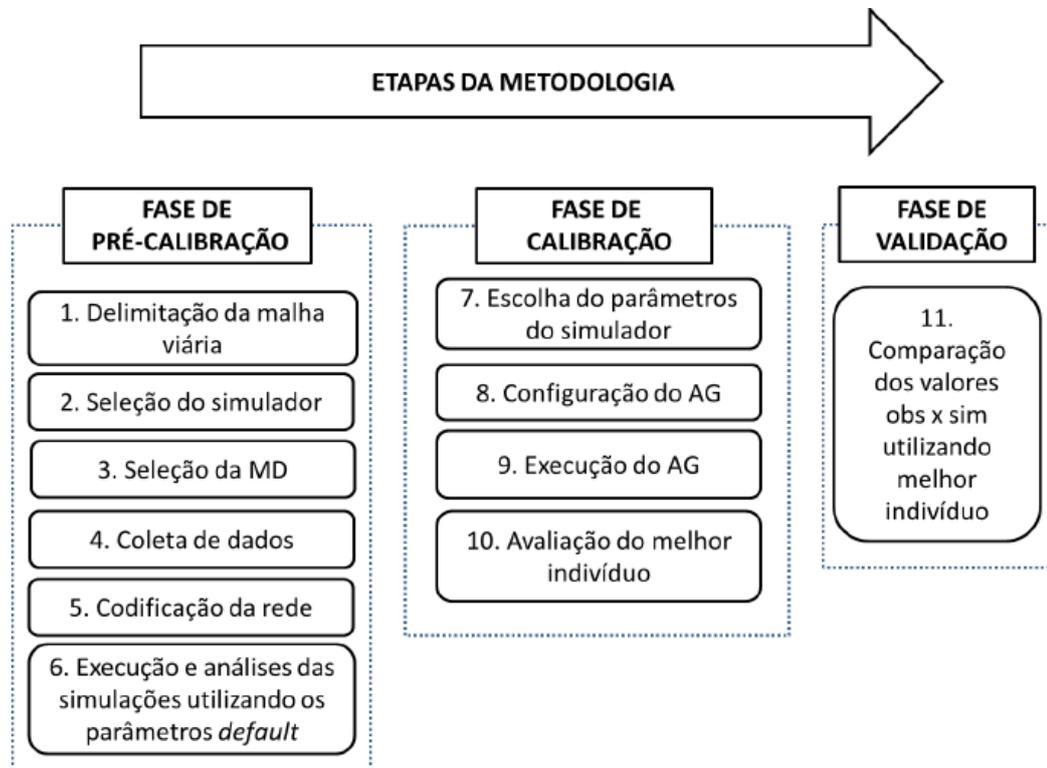
O uso de simuladores na engenharia de transportes é de extrema importância, pois auxilia o estudo de casos que seriam mais dispendiosos com os métodos convencionais, como por exemplo, o estudo da implantação de um semáforo que é muitas vezes implantando sem um estudo prévio, gerando custos elevados e que poderiam ser minimizados com a simulação que permite avaliar eficiência, qual a melhor solução e quais os problemas gerados pela implantação do semáforo naquela interseção.

Entretanto, para obter resultados precisos e mais realistas possíveis é necessário calibrar o modelo mesmo que os simuladores possuam valores *defaults*, mas esses valores dos parâmetros mudam de região para região, ou seja, os parâmetros padrões do simulador representam em geral o comportamento dos tráfegos do seu país de origem que pode não ser o caso de um estudo no Brasil.

Segundo Medeiros *et al.*, (2013), a simulação microscópica possui vários parâmetros que descrevem os comportamentos condutores/veículos, esses parâmetros estão relacionados aos modelos de *car-following* (perseguição veicular), *lane changing* (mudança de faixa) e *gap acceptance* (aceitação de brecha) e outros parâmetros específicos dos arcos e das interseções das redes com valores padrões do seu país de origem. Porém, o mesmo autor cita Toledo e Koutsopoulos (2004) e Hourdakis *et al.*, (2003) que afirmam que para um simulador reproduzir satisfatoriamente o tráfego em análise, é necessário ajustar os valores.

O estudo do tráfego com uso da simulação possui etapas que começam desde a escolha dos parâmetros a serem estudados e as saídas de dados necessárias, além da calibração do modelo. Medeiros (2012) apresenta em seu trabalho as etapas de metodologia para uso da simulação como pode ser observado na Figura 12.

Figura 12: Etapas da metodologia para calibração do simulador.



Legenda: MD: Medidas de desempenho; AG: Algoritmos Genéticos.

Fonte: Medeiros, 2012.

A etapa de pré-calibração consiste na definição da área de estudo e os dados geométricos. Nesse trabalho, por exemplo, cujo objetivo é estudar uma rotatória, foi necessário coletar informações sobre velocidade de operação das pernas e faixa de circulação, largura das faixas, diâmetro da ilha, entre outros dados que se julgue importantes para o estudo. Nessa etapa escolhe-se também o simulador e em seguida executa-se as simulações com valores padrões do software.

De acordo com Medeiros (2012), a segunda etapa é própria calibração com a escolha dos parâmetros a serem modificados e determinação dos valores para os escolhidos. Enquanto a terceira etapa, nada mais é que a fase de análise de eficiência dos valores calibrados.

O método de calibração com algoritmos genéticos é visto como o método mais eficaz e mais confiável e bastante difundido no meio acadêmico, no entanto, é um processo muito complexo e necessita de excelente conhecimento com programação. Por essa razão, os modelos utilizados nesse trabalho usaram o método da tentativa e erros, comparando com parâmetros de campo que determine sua eficiência.

Wang e Prevedouros (1998 *apud* Medeiros, 2012) afirmam que o processo de calibração dos parâmetros dos simuladores é um processo exaustivo e tedioso e que necessita muitas das vezes calibrar um grande número de parâmetros e assim representar o modelo real com mais precisão.

2.5.1. Calibração dos parâmetros de *Car-following*

O modelo de *car-following* ou perseguição veicular é um dos principais parâmetros dos modelos de simulações, esse parâmetro determina o comportamento dos motoristas ao encontrar outro a frente e em fila, é responsável pela velocidade, distância e aceleração do veículo perseguidor em relação ao líder. De acordo com Medeiros (2012), “os modelos de *car-following* regem a movimentação dos veículos a partir de vários parâmetros predefinidos, determinando a velocidade e a aceleração em função da distância entre o veículo seguidor e líder.”

Segundo Lacerda e Neto (2014), o modelo comportamental de perseguição veicular do Vissim é o parâmetro com maior influência em comparação com outros modelos porque possui maior interesse entre os pesquisadores e analistas e que de acordo com eles simula os movimentos do tráfego ao longo da via. O Vissim, software que será utilizado nessa pesquisa, possui duas grandes lógicas psicofísicas de *car-following*, Wiedemann 74 (W74) e Wiedemann 99 (W99), que de acordo com o manual do próprio software, o modelo W74 é indicado para análise em tráfego urbano enquanto o W99 para tráfego rodoviário.

Ainda de acordo Lacerda e Neto (2014) o modelo psicofísico de Wiedemann tem um comportamento oscilatório e é limitado pelos parâmetros $ax+bx$ (chamado de abx) e o limite superior sdx , onde o parâmetro ax representa o *headway* entre os veículos parados e o parâmetro bx a distância de segurança que é um adicional deixado pelo veículo seguidor que está em movimento. Apesar desse modelo possuir quatro parâmetros ajustáveis na teoria, a versão acadêmica e profissional do Vissim permite modificar apenas três. De acordo com Souza et al. (2018), os parâmetros ajustáveis são:

- *Average standstill distance*: Distância pretendida pelo veículo seguidor em relação ao líder na velocidade de 0 km/h;
- *Additive part of safety distance*: Fator aditivo da distância de segurança;
- *Multiplicated par of safety distance*: Fator multiplicativo para a distância de segurança.

Diferentemente do W74, o W99 possui 10 parâmetros de ajustes do modelo, sendo muitas vezes utilizados em estudos de vias urbanas por permitir maior controle do comportamento dos motoristas através dos 10 parâmetros. De acordo com Oliveira e Cybis (2008), esses parâmetros são:

- **CC0 (distância de parada, em metros):** Representa a distância que um motorista deseja manter atrás de um veículo parado em uma rodovia, e não possui variação alguma;
- **CC1 (tempo de *headway*, em segundos):** É o intervalo de tempo que corresponde a um espaçamento que motoristas desejam manter de veículos a frente;
- **CC2 (variação de *following*, em metros):** Restringe a oscilação longitudinal da distância de segurança, sendo um incremento de espaçamento para a distância de segurança desejada;
- **CC3 (espaçamento para entrar em *following*, em segundos):** Controla o começo do processo de desaceleração, isto é, define quantos segundos antes de atingir a distância de segurança, o motorista começa a desacelerar;
- **CC4 e CC5 (limites de *following*):** São parâmetros adimensionais que influenciam a aproximação entre o veículo seguidor e o veículo líder, controlando a diferença de aceleração entre estes dois veículos;
- **CC6 (velocidade dependente da oscilação):** Busca representar a influência da distância na oscilação da velocidade dos veículos no processo de *following*;
- **CC7 (oscilação da aceleração):** aceleração real durante o processo de oscilação;
- **CC8 (aceleração quando parado):** aceleração desejada de um veículo quando este estiver começando a se movimentar a partir da situação de parada;
- **CC9 (aceleração a 80 km/h):** aceleração desejada a 80 km/h.

Apesar do modelo W99 possuir esses 10 parâmetros, é comum selecionar apenas os que influenciam o estudo em questão. Algumas pesquisas que estudaram a calibração do Vissim selecionaram parâmetros conforme suas necessidades como é o caso de Medeiros (2012) que selecionou os parâmetros CC0; CC1; CC2; CC3; CC4; CC5 e CC6 para estudo de via urbana enquanto JIE *et al.*, (2013 *apud* Lacerda, 2016) selecionaram os parâmetros CC1; CC2; CC3; CC7 e CC8.

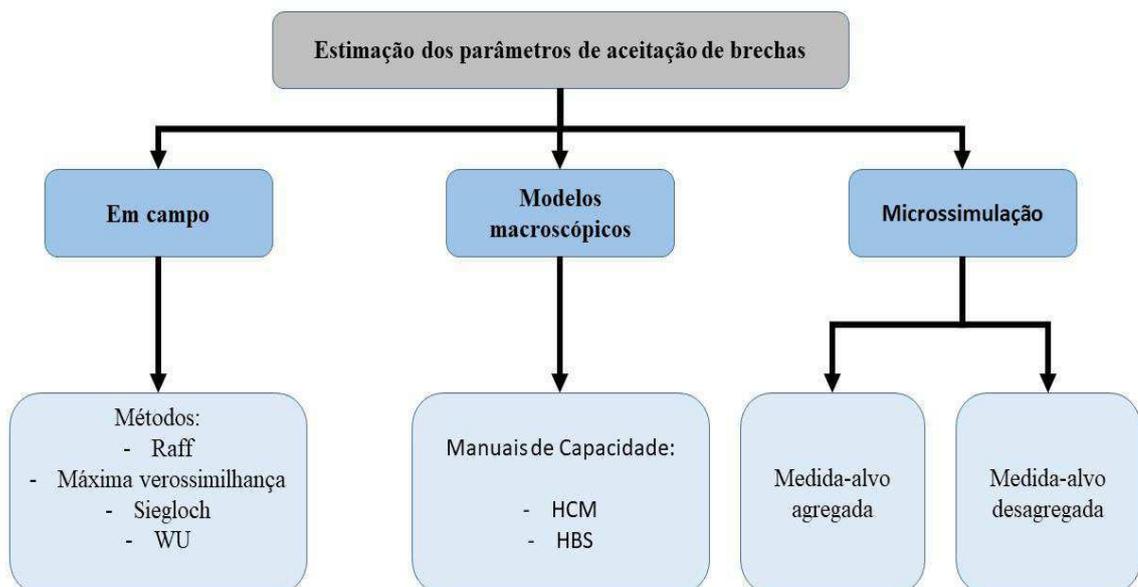
2.5.2. Calibração do parâmetro de brecha crítica (*gap crítico*)

O parâmetro de brecha crítica ou *gap crítico* é considerado de grande importância no estudo de tráfego, principalmente para interseções cujo nível de serviço está fortemente

relacionado a essa brecha que representa o comportamento dos motoristas, se são agressivos ou calmos e com isso determina a capacidade da interseção. “A aceitação de brechas rege o comportamento das filas em aproximações secundárias e impacta diretamente na estimativa de medidas de desempenho e de capacidade da aproximação” (ARAÚJO, 2018).

Ainda de acordo com Araújo (2018) tem-se basicamente três maneiras para determinação do gap crítico que estão apresentados na Figura 13. O primeiro método, de campo, consiste basicamente na coleta dos gaps, podendo ser apenas os aceitos ou aceitos e rejeitados na interseção de interesse e em seguida calculado o valor da brecha crítica por um dos métodos apresentados na Figura 13. Como esse trabalho utilizará os métodos de Raff e WU classificados de campo para a determinação, será dispensada as explicações dos dois métodos restantes.

Figura 13: Métodos para determinação da brecha crítica em interseções não semaforizadas.



Fonte: Araújo (2018), adaptado.

Com base em Neris, Ferraz e Larocca (2019), o método de Raff determina um valor médio para o gap crítico, subestimando esse valor. Sua determinação é feita de acordo com os seguintes procedimentos:

- Identificação dos *gaps* aceitos e os rejeitados separados entre eles e classificados em ordem decrescente. Segundo os mesmos autores, deve-se considerar o maior *gap* rejeitado pelo mesmo veículo;

- Elaboração de funções de distribuição acumuladas para os *gaps* aceitos ($F_a(t)$) e para os *gaps* rejeitados ($F_r(t)$);
- Construção dos gráficos das funções acumuladas para os dois *gaps*, sendo que o gráfico dos *gaps* rejeitados usa a função complementar ($1-F_r(t)$);
- Determinação do valor do *gap* crítico que é obtido da interseção das duas funções de distribuição.

Como o método de WU é similar ao de Raff, com os mesmos dados de coleta para sua determinação decidiu-se usá-lo nessa pesquisa. Com base no trabalho de Neris (2018), o método de WU não trabalha com as brechas aceitas e rejeitadas separadamente, o processo para esse método é o seguinte:

- Ordena-se os valores dos *gaps* aceitos e rejeitados em ordem decrescente em uma planilha do Excel identificando e separando-os em duas colunas;
- Utiliza a função de distribuição acumulada individualmente entre os *gaps* aceitos e os rejeitados e quando um *gap* classificado como aceito, a função acumulada de *gaps* aceitos é atualizada enquanto a função de *gaps* rejeitados se conserva;
- A cada *gap* calcula-se uma estimativa da função densidade acumulada do *gap* crítico - $F_{tc}(t)$ com base na Equação 2 a seguir.

$$F_{tc}(t) = \frac{F_a(t)}{F_a(t) + 1 - F_r(t)} \quad 2$$

Em que: $F_a(t)$: Função de distribuição acumulada de *gaps* aceitos;

$F_r(t)$: Função de distribuição acumulada de *gaps* rejeitados;

t: *gap* considerado (s).

Determina a frequência dos *gaps* críticos estimados conforme a Equação 3 que representa a diferença entre o valor da função densidade acumulada do *gap* crítico estimado atual (t_i) e o anterior (t_{i-1}):

$$p_{tc}(t_i) = F_{tc}(t_i) - F_{tc}(t_{i-1}) \quad 3$$

Calcula a média do *gap* atual com o anterior e multiplicando esse valor pela frequência dos *gaps* críticos estimados $p_{tc}(t_i)$, obtém-se uma multiplicação para cada *gap*;

Por fim, são somados todos os produtos da multiplicação da etapa anterior e com isso é determinado o *gap* crítico pelo método de WU.

A escolha desses dois métodos para determinação do parâmetro de interesse usou como referência o estudo de Neris (2018), em sua tese, que ao comparar os resultados e as dificuldades de uso dos demais métodos observou, como por exemplo, que o método de Siegloch limita a utilização de dados em período de saturação e os demais métodos, Miller & Pretty, Bunker apresentaram ainda mais limitações.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho usou como objeto de estudo uma rotatória localizada nas proximidades da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG que é considerada importante no tráfego urbano. Na Figura 14 estão apresentadas a geometria e localização dessa rotatória.

É uma interseção considerada importante por permitir o tráfego urbano da cidade e por receber grande frota de veículos de cidades próximas e até mesmo do sertão. A rotatória da UFCG é situada na interseção com a Rua Aprígio Veloso (1), Av. Vinte e Sete de Julho (2), Rua Brg. Eduardo Gomes (3), Rua Eng. Lourival Andrade (4) e Av. Joaquim Caroca (5).

Figura 14: Localização da rotatória da UFCG.



Fonte: Google Earth, 2021, adaptado.

3.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DA ROTATÓRIA

A caracterização geométrica e operacional da rotatória foi realizada a partir da coleta de dados geométricos e operacionais como:

- Largura da faixa de entrada e saída de cada perna da rotatória;
- Largura da faixa de circulação da rotatória;
- Número de faixas em cada perna e de circulação;
- Diâmetro do círculo inscrito da rotatória;

- Inclinação transversal das faixas;
- Velocidade de operação.

Essas informações foram obtidas a partir da coleta em campo e por meio de dados fornecidos pela STTP (Superintendência de Trânsito e Transportes Públicos de Campina Grande). Em seguida, foi feita a classificação dela com base na classificação apresentada na literatura.

3.2. CONSTRUÇÃO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO

Nesta etapa foram construídos os modelos de simulação utilizando o *software* PTV VISSIM. Para a rotatória analisada foram construídos três casos: caso **A**: caso real (prioridade para via circulatória); caso **B**: prioridade das vias principais (Rua Aprígio veloso e Rua Eng. Lourival Andrade) e o caso **C**: uso de semáforo nas proximidades da via principal usando como referência o estudo de Neris (2013) no estudo de formação de pelotões em rotatórias.

A construção de cada modelo foi realizada a partir da geometria exibida no mapa do próprio Vissim que mostra as vias que compõem a interseção analisada. Deste modo, insere-se *links* e conectores contornando as ruas e a faixa de circulação mostradas no mapa e dentro do limite de um quilômetro quadrado para a versão acadêmica a fim de assimilar o mais fiel possível a geometria da simulação com o caso real. Ainda, para maior representatividade da interseção são inseridos os dispositivos como semáforos e faixas de pedestres que têm impacto no tráfego da interseção, formando filas e que aumentam o tempo até a entrada na interseção.

Como a entrada de veículos na interseção não semaforizada no simulador é determinada pelo *gap* crítico (*gap* mínimo) e o *follow-up headway* que representa o comportamento de cada motorista, utiliza-se então a função “*Priority rules*” do *software* que possui esses dois parâmetros com valores calibrados a partir da coleta de dados para a rótula. As coletas dos dados necessários de cada modelo são obtidas com uso das funções “*Nodes*” e “*Data Collection Points*” que quando inseridos nas interseções desejadas fornecem os resultados de atraso veicular, comprimento de fila, nível de serviço etc.

Cada modelo teve simulação com duração de 600 s ou 10 minutos, pois é o tempo máximo permitido pela versão acadêmica do software. Além disso, serão feitas 10 simulações para cada caso com o objetivo de obter média de resultados mais satisfatórios, além de ser o mínimo recomendado para estudo com simulação de tráfego.

3.3. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ OD

Para a construção da matriz OD foram analisados os dias da semana com maior volume de tráfego, sendo considerados segunda-feira e sexta-feira em virtude do tráfego de comerciantes, caminhoneiros com mercadorias oriundas do sertão, trabalhadores das cidades próximas a Campina Grande que utilizam a rotatória e do próprio tráfego urbano da cidade.

Além disso, foram observados também, os horários com maiores picos de veículos. Tendo em vista que a rótula dá acesso as universidades UFCG e UEPB e um colégio próximo e como o horário comercial é de 08:00 às 12:00h e de 14:00 às 18:00h, ou seja, os horários que mais impactam estão entre 07:00 às 08:00h, 12:00 às 13:00h e 18:00 às 19:00h.

Os dados da matriz OD foram obtidos a partir de filmagem com celular posicionado em um ponto estratégico de modo a capturar todas as pernas da rotatória. A filmagem teve duração total de uma hora sendo dividida em duas gravações de 30 minutos devido a capacidade do aparelho. Portanto, foram construídas duas matrizes, uma em relação a segunda-feira e outra para a sexta feira no intervalo entre 07:00 e 08:00h da manhã.

A partir da imagem de satélite obtida no *Google Earth pro*® definiu-se as zonas e as respectivas entradas e saídas conforme apresentado na Figura 15. Além disso, no Quadro 7 estão mostradas as ruas as quais cada entrada e saída representam.

Figura 15: Rotatória da UFCG com demarcação de zonas.



Fonte: *Google Earth Pro*, 2021, adaptado.

Quadro 7: Descrição das entradas e saídas para a rotatória da UFCG.

E1/S1	E2/S2	E3/S3	E4/S4	E5/S5	E6/S6
R. Aprígio Veloso – sentido ufgc	Av. Vinte e Sete de Julho – sentido UEPB	R. Brg. Eduardo Gomes	R. Aprígio Veloso – sentido sertão	Av. Vinte e Sete de Julho – sentido Pedregal	Av. Joaquim Caroca

Fonte: Autor, 2021.

Com base nas gravações obtidas e nas classificações das zonas com suas respectivas entradas e saídas são observadas as origens de cada categoria de veículo e o destino escolhido. Em seguida todos os veículos de cada par origem-destino são convertidos para unidades de carros de passeio conforme conversão apresentada no Quadro 4 para determinação da matriz origem destino.

3.4. CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

3.4.1. Calibração dos parâmetros de Car-following

A partir do estudo da literatura, observou-se que alguns parâmetros são utilizados com seus valores padrões por não surtirem efeito significativo nos resultados da simulação quando comparados com os dados de campo como: número de veículo que entra na interseção, quantidade de veículo simulados e tempo de espera. Dessa forma, para o método W74 que possui apenas três parâmetros, foram calibrados todos eles. Enquanto para o método W99 foram definidos parâmetros julgados essenciais, inicialmente foram avaliados CC0; CC1; CC2; CC3; CC4; CC5 e CC6 que de acordo com Medeiros (2012) são os parâmetros mais críticos para o estudo de tráfego com simulação de vias urbanas e que mais influenciam no comportamento dos motoristas na simulação.

Após definidos os parâmetros a serem modificados e tendo coletado os dados de campo referente a matriz OD, classificou-se seus respectivos pares de origem destino. A calibração do modelo de simulação foi realizada com o ajuste dos valores dos parâmetros individualmente, analisando se a quantidade de veículos simulados no tempo de 600 segundos é igual ou próxima da quantidade da matriz coletada no mesmo período de tempo e depois com a modificação dos parâmetros em pares.

O número de veículos foi observado simultaneamente em todas as pernas da interseção quando modificado os parâmetros individualmente e em pares. O modelo de simulação foi

considerado calibrado quando o volume de veículos simulados estava mais próximo do modelo real em toda a interseção, ou seja, esse método consiste basicamente em tentativa e erro, tentando aproximar o resultado da simulação com a realidade em função do número de veículos. Com o intuito de avaliar percentualmente a medida de ajuste, foi calculado o Erro Percentual Absoluto Médio (EPAM) que é comumente utilizado para comparação dos valores observados e simulados dentro do processo de calibração, sua determinação é dada de acordo com a Equação 4.

$$EPAM = \frac{100\%}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|x_i - y_i|}{y_i} \quad 4$$

A partir do valor do EPAM foi observado a precisão do modelo calibrado, ou seja, quanto menor o valor desse parâmetro, melhor é o resultado da simulação.

3.4.2. Calibração dos parâmetros de brecha crítica

O *gap* crítico foi obtido a partir da determinação das brechas oferecidas pelos veículos da faixa de circulação e aceitas pelos veículos da via secundária. Para isso, foi necessária filmagem de uma perna da rotatória no mesmo dia e horário utilizado para determinação da matriz OD, com no mínimo 60 minutos de gravação, pois Vasconcelos (2014) realiza a coleta entre 53 e 99 minutos e Neris (2018) afirma que o período de coleta não é fixo, pois o importante é obter o maior número de dados possíveis para a determinação do *gap*.

A escolha da saída para coleta de dados se deu a partir da definição que possui maior volume de veículos passando pela interseção e que com isso pudesse ser obtido o maior número de dados possível com um tempo de coleta razoável sem que precisasse filmar acima de 60 minutos como realizado por Vasconcelos (2014). Em virtude da falta de equipamento apropriado para gravação, utilizou-se um aparelho celular fixado em um tripé posicionado em um local estratégico para captar na perna da rotatória escolhida quando os veículos não prioritários chegavam na linha de retenção e aguardavam a oportunidade de entrar na interseção e que ao mesmo tempo fosse possível observar os veículos prioritários passando pela entrada de interesse, o posicionamento do aparelho encontra-se no anexo A. Além disso, devido a capacidade do aparelho a gravação de 60 minutos foi dividida em quatro vídeos de 15 minutos e depois unidos com um software de edição de vídeo.

Como os métodos determinísticos escolhidos de Raff e WU para essa pesquisa necessitam classificar as brechas aceitas e rejeitadas, devido ao processo manual de coleta

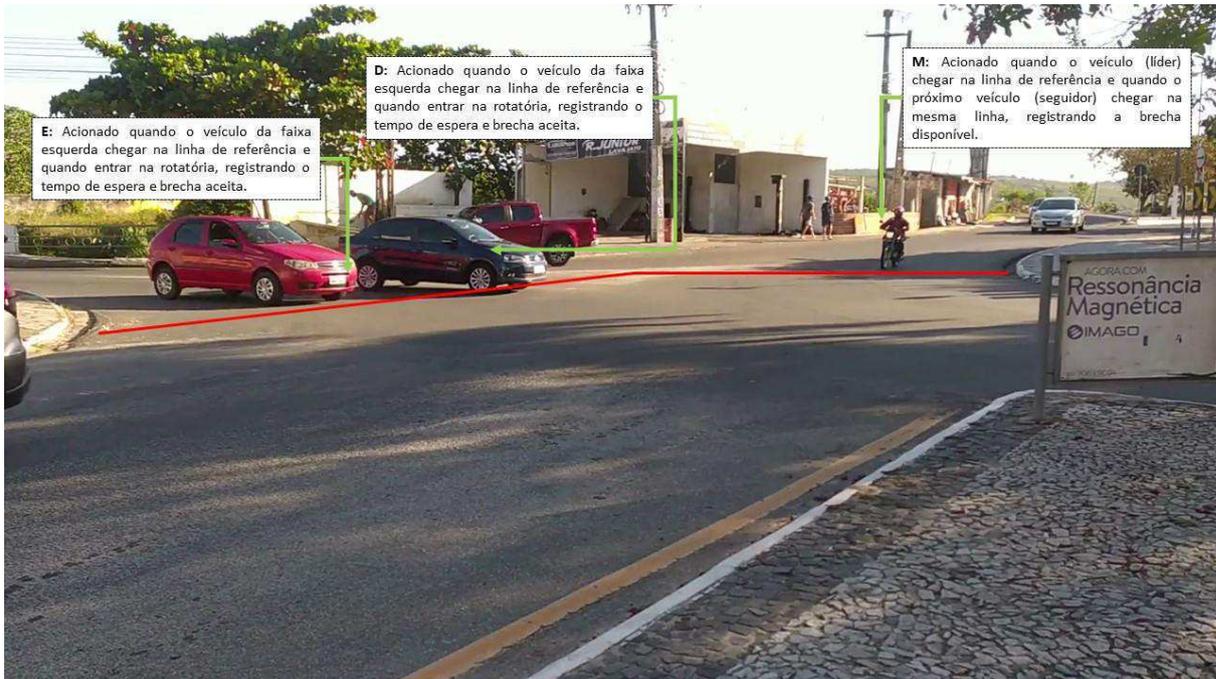
desses dados ser extremamente oneroso e cansativo optou-se pela utilização de um programa que permitisse obter as brechas oferecidas pelos veículos prioritários, as brechas aceitas e rejeitadas para cada faixa dos veículos não prioritários. Usando como base o trabalho de Vasconcelos (2014) que desenvolveu um software em VB.NET com controle total do vídeo para obtenção desses dados citados anteriormente, foi criado também, um programa com lógica semelhante em javascript (linguagem de programação).

O programa consiste em registrar simultaneamente eventos específicos como a brecha oferecida pelos veículos não prioritários e as aceitas pelos da via secundária durante a análise do vídeo em uma tabela. Ao carregar o vídeo no programa, os eventos foram obtidos e registrados na tabela quando o controlador acionava as seguintes teclas:

- **M:** Quando um veículo da faixa de circulação chega na linha de referência (localizada entre o centro da perna da rotatória e a ilha divisória) e quando o próximo veículo chega na mesma linha aciona-se a tecla novamente, registrando assim, o tempo de brecha disponível da via prioritária. O primeiro veículo é considerado líder enquanto o seguinte é o seguidor e no veículo seguinte que passar pela linha de referência, o antigo veículo seguidor passa a ser líder e esse seguidor;
- **E:** Quando o veículo da entrada da rotatória da faixa esquerda (via não prioritária) alcança a linha de retenção da interseção e quando ele entra na via de circulação aciona-se a tecla novamente, registrando então, o tempo de espera e a brecha aceita por esse veículo;
- **D:** Quando o veículo da via secundária da faixa direita (via não prioritária) chega na linha de retenção da rotatória e quando ele entra na via de circulação aciona-se a mesma tecla, para assim, registrar o tempo de espera e a brecha aceita por esse veículo;
- **X:** Para excluir um evento registrado incorretamente;
- **Espaço:** Reproduzir ou pausar o vídeo.

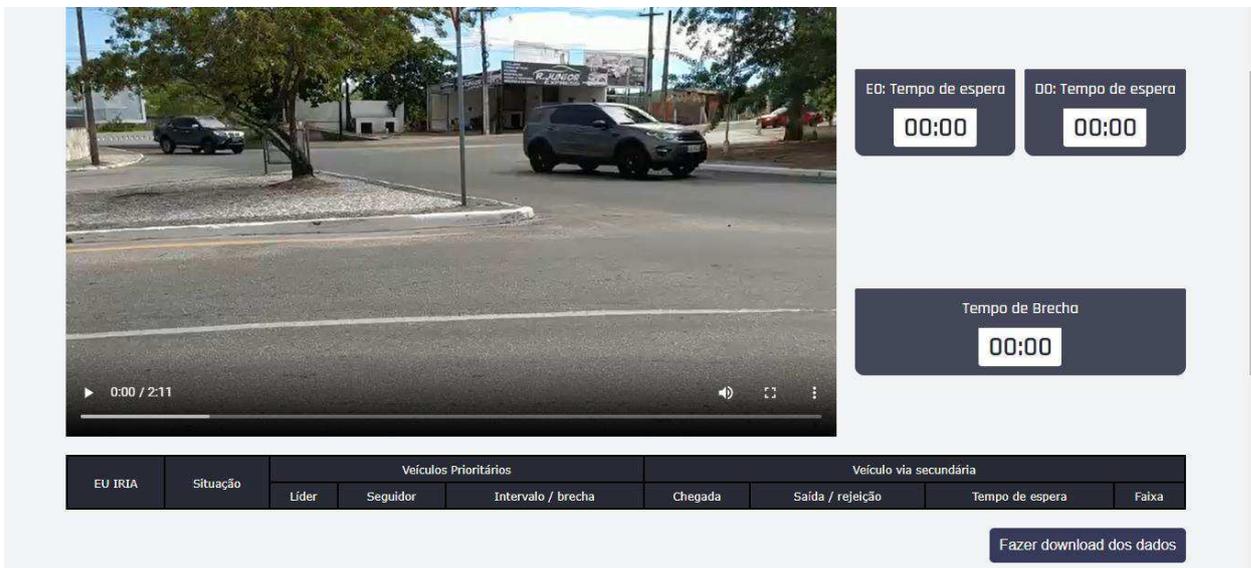
A Figura 16 apresenta as teclas que registraram os eventos e quando serão acionadas no estudo em questão e ainda na Figura 17 pode-se observar a interface do programa desenvolvido, mostrando que foi registrado: tempo de espera dos veículos da faixa esquerda e da faixa direita e intervalo de brecha, logo abaixo as colunas da tabela de interesse.

Figura 16: Instruções do funcionamento do programa para determinação da brecha.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 17: Interface do programa para determinação de brecha



Fonte: Autor, 2021.

Determinadas as brechas aceitas e rejeitadas com o programa, deu-se início a determinação do gap crítico através dos métodos determinísticos de Raff e Wu de acordo com seus procedimentos descritos na literatura.

Além desses dois métodos determinísticos, a brecha crítica da interseção pode ser determinada através da simulação, a qual foi usada nesse trabalho e com isso determinou-se o melhor método para encontrar a brecha crítica de rotatória.

A calibração consiste na variação da brecha utilizada na função regra de prioridade (RP) e tem como medida alvo o tempo de espera médio dos veículos de uma saída. O processo para calibração é o seguinte:

- Organizar todos os intervalos de tempo de espera dos veículos que aceitaram uma brecha da faixa correspondente;
- Calcular a média do tempo de espera de todos os veículos contabilizados que será a medida alvo da calibração;
- Inserir *Data collection Points* (pontos de coletas) na linha de retenção da perna referente aos dados de espera e aplicar a coleta de resultados do tempo de espera dos veículos;
- Variar o valor da brecha crítica no modelo RP a cada simulação e comparar o tempo de espera simulado com o de campo até que converjam a um valor aproximado;
- Obter o valor mais próximo do parâmetro de referência, para definir o modelo como calibrado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA E OPERACIONAL DA ROTATÓRIA

Após as informações necessárias da interseção e projeto geométrico repassado pela STTP para sua caracterização e por meio do *Google Earth Pro*® que permite medir algumas distâncias do mapa, obteve-se os seguintes dados apresentados na Quadro 8.

Quadro 8: Caracterização geométrica e operacional da rotatória.

Parâmetro	Medida	Observação
Diâmetro da ilha (m)	48,0-67,00	Rotatória em elipse com diâmetro maior de 67,0 m e o menor de 48,0 m.
Nº de faixa na rotatória	1	
Larg. da Faixa de rolamento na rotatória (m)	6,0-7,0	Largura variável
Nº de entradas	6	
Nº de saídas	6	
Maior nº de faixas por aproximação	2	Algumas aproximações acomodam apenas uma faixa de tráfego
Larg. da faixa de entrada e saída (m)	3,00-3,50	Intervalo de largura da faixa de rolamento das pernas
Inclinação transversal (%)	2	Inclinação do abaulamento do pavimento
Velocidade de operação (km/h)	40	Velocidade máxima permitida no dispositivo

Fonte: Autor, 2021.

Em relação ao diâmetro da ilha observa-se a existência de duas medidas de diâmetro, tornando a ilha central uma elipse com raio maior de 67,00 e o menor com 48,00 m ao contrário de algumas rotatórias que predomina a ilha circular. Outro fato observado da interseção é que a largura da faixa de circulação está no intervalo entre 6,00 m e 7,00 m que permitiria acomodar duas faixas de tráfego na rotatória, mas devido a utilização de apenas uma faixa com essa largura supõe-se que o veículo de projeto considerado foi do tipo SR.

Essa rotatória é um caso bem particular por possuir seis entradas e seis saídas, sendo interceptada por 5 ruas como mostrado na metodologia. Nessa interseção verificou-se que a quantidade de faixas nas aproximações divergia em função do volume de tráfego de cada via, como a Rua Aprígio Veloso e a Avenida Vinte e Sete de Julho projetadas para elevado fluxo de veículos e por isso possuem duas faixas, enquanto as outras aproximações possuem apenas uma faixa cada.

Assim como as curvas de rodovias que exigem a necessidade de superelevação que diminui o efeito força centrífuga sobre o veículo, a via de circulação da rotatória possui também uma inclinação com o mesmo objetivo, mas por falta de informações pela STTP assume-se que inclinação seja a mesma adotada para o abaulamento da via com 2% de inclinação como apresentada no Quadro 8. Além disso, tem-se que a velocidade de operação máxima permitida é baixa, o que garante a utilização da superelevação da rotatória igual ao abaulamento da via.

A partir da observação em mapa e do projeto de planta baixa pode-se classificar a rotatória da UFCG com base nas classificações do Manual de Interseções para rótulas modernas como sendo uma rótula assimétrica, mas com uma diferença, a ilha central é uma elipse ao invés de circular.

4.2. DETERMINAÇÃO DA MATRIZ OD

Nas Tabela 1, 2, 3, 4 e 5 são apresentadas as informações referentes ao fluxo de veículos na interseção, coletadas em uma sexta do dia 02 de fevereiro de 2021, considerando os tipos de veículos e destacando sua origem e destino.

Nas Tabelas são apresentadas ainda, o volume dos veículos convertidos para cada destino em unidades de carros de passeio por hora (UCP/h) de acordo com os dados do CONTRAN apresentado no Quadro 5 que especifica o fator de equivalência para cada tipo de veículo. O CONTRAN não determina uma equivalência para os veículos SR, então para efeito de análise adotou-se uma equivalência igual a três para esse tipo de veículo.

Tabela 1: Quantidade de veículos partindo da saída 01 (zona 1) - sexta feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	19	2				21
Entrada 02	19	6		1		26
Entrada 03	31	7		4		47

Continuação Tabela 1: Quantidade de veículos partindo da saída 01 (zona 1) – sexta feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 04	235	150	13	13		420
Entrada 05	64	63	1	2		120
Entrada 06	14	3				16

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 2: Quantidade de veículos partindo da saída 02 (zona 2) - sexta feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	6	1	1			10
Entrada 02						
Entrada 03						
Entrada 04	23	1	1			27
Entrada 05	25	4		1		31
Entrada 06	1					1

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 3: Quantidade de veículos partindo da saída 03 (zona 3) - sexta feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	73	35		1		102
Entrada 02						
Entrada 03						
Entrada 04	52	29		2		79
Entrada 05	166	76		2		229
Entrada 06	9	9		2		21

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 4: Quantidade de veículos partindo da saída 04 (zona 4) - sexta feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	567	329	14	18		903
Entrada 02	29	5				33
Entrada 03	27	11		3		44
Entrada 04	4					4
Entrada 05	38	27		3		67
Entrada 06	33	5				37

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 5: Quantidade de veículos partindo da saída 05 (zona 5) - sexta feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	242	155		7	1	381
Entrada 02	55	30		1		80
Entrada 03	53	26				73
Entrada 04	42	15		1		56
Entrada 05						
Entrada 06	12	9		1		22

Fonte: Autor, 2021.

Ao analisar as Tabelas 1, 2, 3, 4 e 5, observa-se o maior volume de veículos de passeio em todas as saídas e destinos. Em seguida tem a predominância das motocicletas como esperado, tendo em vista que em grandes centros urbanos o volume de motocicletas é elevado e pode até mesmo superar o de veículos devido a agilidade que proporciona ao usuário. Na maioria dos casos observados, o número de carros de passeio é superior a 50% do total de veículos contabilizados. Na Tabela 4 observa-se que a quantidade de carros alcançou 100% para o caso de retorno da saída 04 para a entrada 04 e na Tabela 3 o percurso entre a saída 03 com destino na entrada 06 apresentou um volume mais equilibrado entre carro e moto com 45% cada.

Em relação aos ônibus e veículos do tipo CO é observado um baixo volume quando comparado aos veículos de passeio e ao total de veículos por rota em todos os casos da coleta realizada na sexta feira, o volume desses veículos não ultrapassou 15% do total observado por destino. A maior quantidade contabilizada de ônibus e veículo CO é de 14 e 18 respectivamente, referente a rota entre a zona 04 e zona 01, o maior número de ônibus nesse percurso é em virtude das linhas de ônibus 263B, 0,20, 300B, 303, 903A, 903B para as quais a rota contempla a rotatória. Quanto aos veículos CO, esse número pode ser justificado em função os veículos de cargas com origem das cidades do interior da Paraíba com destino ao centro da cidade e demais bairros terem acesso mais rápido por meio da rota que utiliza a rotatória ao invés de contornar a cidade pela rodovia.

Após a classificação do fluxo por veículo e convertidos para UCP/h obteve-se a matriz OD da interseção para a coleta realizada na sexta feira mostrada na Tabela 6. Nas linhas da tabela podem ser observadas as origens e nas colunas os destinos.

Tabela 6: Matriz de Origem e Destino da rotatória - sexta feira.

ORIG./DEST.	1	2	3	4	5	6	TOTAL
1	21	26	47	420	120	16	650
2	10	0	0	27	31	1	69
3	102	0	0	79	229	21	431
4	903	33	44	4	67	37	1088
5	381	80	73	56	0	22	612
6							0
TOTAL	1417	139	164	586	447	97	2850

Fonte: Autor, 2021.

Na matriz OD da sexta feira com todos os veículos convertidos para UCP é possível analisar com maior clareza o fluxo pela rotatória e determinar as pernas mais solicitadas. Da Tabela 6 nota-se que a zona 1 e 4 possuem o maior fluxo de veículo pela interseção, sendo a zona 1 responsável por 23% do volume total observado enquanto a zona 4 por 38%, aproximadamente. Como as saídas estão em sentidos opostos e os destinos principais dos veículos não se cruzam permite um excelente nível de serviço na operação da rotatória.

Nota-se a falta de dados para a saída 06 em relação ao volume de veículos com origem nessa zona e seus respectivos destinos, isso é justificado pelo aparelho usado na coleta de dados que não permitia captar todas as pernas da rotatória simultaneamente, além disso, o volume de veículos é desprezível em relação as outras saídas, portanto, desprezada no estudo de nível de serviço da interseção.

Semelhante a coleta de dados realizadas na sexta feira com a contagem classificada por veículos, construiu-se as Tabela 7, 8, 9, 10 e 11 para os dados observados na segunda feira do dia 22 de março de 2021.

Tabela 7: Quantidade de veículos partindo da saída 01 (zona 1) - segunda feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	18	7				23
Entrada 02	34	5		1		41
Entrada 03	13	3				15
Entrada 04	219	133	14	6		375
Entrada 05	58	58		1		104
Entrada 06	10					10

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 8: Quantidade de veículos partindo da saída 02 (zona 2) - segunda feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	5	2				7
Entrada 02	0	0	0	0	0	0
Entrada 03	0	0	0	0	0	0
Entrada 04	23	20		1		41
Entrada 05	18	21		1		37
Entrada 06	1	2				3

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 9: Quantidade de veículos partindo da saída 03 (zona 3) - segunda feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	81	36				108
Entrada 02	0	0	0	0	0	0
Entrada 03	0	0	0	0	0	0
Entrada 04	43	43		1		78
Entrada 05	90	87	1	4		169
Entrada 06	10	4				13

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 10: Quantidade de veículos partindo da saída 04 (zona 4) - segunda feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	568	417	14	15		962
Entrada 02	44	17		1		60
Entrada 03	17	16			1	32
Entrada 04	7	4				10
Entrada 05	51	26		2		76
Entrada 06	23	12				32

Fonte: Autor, 2021.

Tabela 11: Quantidade de veículos partindo da saída 05 (zona 5) - segunda feira.

Destino	Veículo de passeio	Motocicleta	Ônibus	Veículo CO	Veículo SR	UCP/h
Entrada 01	274	199	2	7		448
Entrada 02	48	25				67
Entrada 03	82	46		5		131
Entrada 04	54	15		4		76
Entrada 05	0	0	0	0	0	0
Entrada 06	23	11				31

Fonte: Autor, 2021.

Análogo ao observado nas tabelas de dados coletados para a sexta feira, percebe-se que o número de carros de passeio na segunda feira ainda é superior em todas as saídas, contudo o número de motocicletas foi maior em relação a matriz da sexta feira. Algumas saídas apresentaram número de carros e motocicletas muito próximos e até mesmo igual, como por exemplo, a saída 03 com destino na entrada 04 (Tabela 9) que foram contabilizados 43 para cada veículo, representando também 49% em relação ao total. A rota entre a saída 04-entrada 01 (Tabela 10) e a rota entre a saída 05-entrada 01 (Tabela 11) exibiram o maior volume de veículos, pois como essas rotas dão acesso ao centro da cidade é natural que no horário de 07:00 às 08:00h da manhã sejam as mais solicitadas pelos usuários com que destinam-se ir ao trabalho.

Em virtude dos itinerários dos ônibus urbanos da cidade, a maior quantidade contabilizada desses veículos é para os percursos entre a saída 01-entrada 04 (Tabela 7) e saída 04-entrada 01 (Tabela 10) que inclusive tem a mesma quantidade (14 ônibus contabilizados) e representam no máximo 4% do total de veículos dessas rotas, quando convertidos em UCP representam 39 veículos de passeio aproximadamente que não representa redução significativa do nível de serviço da interseção em comparação com o total de veículos e passeio contabilizados mesmo que necessitem de brechas maiores para adentrar na rotatória. Quanto aos veículos CO, a rota da saída 04-entrada 01 (Tabela 10) possui o maior número de veículos CO assim como nos dados coletados para a sexta feira e que a razão para tal evento é a mesma já explicada para o caso da sexta.

Ao analisar em termos percentuais a influência de cada veículo por rota tem-se que os ônibus e veículos CO não ultrapassam 6% do total observado por rota enquanto os carros e as

motocicletas chegam a representar 100% e ao contrário da coleta da sexta feira, o número de motos e carros é mais equilibrado, sendo ultrapassado pelas motos apenas na rota da saída 02-entrada 05 (Tabela 8) com 52,50% das observações. Percebe-se ainda, que apesar de ser realizada a gravação em dois dias da semana determinados com maior fluxo, só houve um caso de veículo do tipo SR com rota entre a saída 04-entrada 03 (Tabela 10) que é aceitável pelo fato da interseção está em área urbana e que dificulta o tráfego desses veículos nas proximidades.

Após obter a quantidade de veículos por rota e convertê-los para UCP de acordo com o Quadro 5 obteve-se a matriz OD referente a coleta da segunda feira apresentada na Tabela 12 a seguir. Nas linhas da tabela estão indicadas as origens dos veículos e nas colunas os destinos.

Tabela 12: Matriz de Origem e destino da rotatória - segunda feira.

ORIG./DEST.	1	2	3	4	5	6	TOTAL
1	23	41	15	375	104	10	568
2	7	0	0	41	37	3	88
3	108	0	0	78	169	13	368
4	962	60	32	10	76	32	1172
5	448	67	131	76	0	31	753
6							0
TOTAL	1548	168	178	580	386	89	2949

Fonte: Autor, 2021.

Na Tabela 12 é possível identificar o fluxo total em UCP na rotatória para o horário de Pico entre 07:00 e 08:00 da manhã e determinar as zonas que mais sobrecarregam-na. O volume total obtido é de 2949 UCP/h. Quando comparada a matriz da sexta feira observa-se um aumento de 100 UCP aproximadamente, sendo considerada, portanto, a segunda feira para o horário analisado com maior impacto no nível de serviço da rotatória, produz maiores atrasos e tempo de percurso. A causa para tal evento pode ser explicada em função da população de outras cidades que trabalham em Campina Grande e retornam para o trabalho na segunda, moradores dos bairros Universitário, Pedregal, Bodocongó, Ramadinha, entre outros que se destinam ao trabalho e demais atividades fazem o percurso pela rotatória.

Ao inferir a Tabela 12 nota-se que as zonas 4 e 5 são responsáveis pelo maior volume de tráfego, apresentando 40% e 26% respectivamente, em relação ao fluxo total, ou seja, mais

de 50% dos veículos que entram na interseção saem dessas duas zonas e por isso podem ocorrer maiores formações de filas e atrasos e com nível de serviço inferior em relação as outras pernas. Observa-se também, que os principais destinos dos motoristas são as zonas 1 e 4, consideradas vias principais, em função disso, elas foram escolhidas para realizar a calibração.

Em relação ao estudo do fluxo de veículos na rotatória é verificado que o dia da coleta de dados tem influência no volume de veículos na interseção para uma hora de análise como é observado nos resultados apresentados em que segunda feira possui o maior volume. Além disso, o horário escolhido para coletar os dados é muito significativo, pois admite-se que os horários de picos que possuem maior volume de tráfego de centros urbanos estão situados nos horários em que a população precisa ir e retornar do trabalho, escola, ou seja, entre 06:00 às 08:00h ,11:00 às 14:00h e das 17:00 às 19:00h.

Escolheu-se esses dois dias atípicos para a coleta do volume de tráfego em virtude do volume reduzido de veículos nos dias típicos devido a pandemia do novo coronavírus que teve início no ano de 2020 e estendeu pelo ano de 2021, obrigando as universidades, escolas e comércios paralisarem suas atividades. Como a rotatória fica nas proximidades da UEPB e UFCG, elas têm grande influência no volume circulante que é utilizada pelo corpo discente, docente e administrativo dessas universidades, portanto, o fluxo de veículos ainda continua menor em relação aos anos anteriores.

Apesar do maior fluxo de veículos nesses dois dias atípicos escolhidos, existe a possibilidade de seu volume estar abaixo do esperado quando comparado com anos anteriores, como por exemplo, o ano de 2019 em que não houve *lockdown*, as escolas, universidades funcionavam normalmente, operando com maior fluxo por toda a cidade em especial pela rotatória da UFCG utilizada pelos discentes e docentes da UFCG e UEPB.

4.3. CALIBRAÇÃO DO MODELO DE SIMULAÇÃO

4.3.1. Calibração dos parâmetros de *Car-following* de Wiedemann

Na literatura, o modelo W74 do Vissim possui apenas três parâmetros possíveis de ajustes, então, para determinar os seus valores calibrados utilizou o caso real como base e definiu-se um intervalo para cada um. Para o parâmetro “ax” que representa a distância desejada entre dois veículos parados em fila foi definido o intervalo entre 1 e 4 e os parâmetro “bxdd” e “bxmult” que estão relacionados ao fator aditivo da distância de segurança e fator multiplicativo para a distância de segurança respectivamente foi usado o mesmo intervalo, variando de 1 a 6.

Dessa forma, foram executadas 20 simulações a fim de determinar os valores ideais, comparando o número de veículos inseridos na simulação durante os dez minutos na saída 01 e saída 04 com a quantidade contabilizada em campo para o mesmo tempo, também foi usado, os resultados de comprimento de fila e atraso médio veicular como parâmetros de escolha apesar de não possuir valores de campo. Na Tabela 13 está apresentada a quantidade de veículos já convertidos em UCP para 10 minutos de coleta usados na calibração.

Tabela 13: Quantidade de carros de passeio nas saídas 01 e 04 no intervalo de 10 minutos.

Saída 01	Saída 04
87	173

Fonte: Autor, 2021

A partir disso, elaborou-se a Tabela 14 com os resultados do comprimento médio de fila, comprimento máximo, quantidade de UCP, nível de serviço e atraso médio das saídas 01 e 04 e assim definir os valores dos parâmetros para o estudo da interseção.

Tabela 14: Resultados da simulação para calibração do modelo W74.

Simul.	Saída 01					Saída 04				
	Qlen (m)	Qlen,max (m)	Quant.	N. SERV.	Atraso médio (s)	Qlen	Qlen,max	Quant.	N. SERV.	Atraso médio (s)
1	0,43	14,24	102	A	5,21	186,08	287,64	109	E	79,81
2	0,43	14,24	102	A	5,21	186,08	287,64	109	E	79,81
3	3,15	44,51	99	A	7,16	190,12	286,30	101	F	93,84
4	6,60	40,03	102	B	11,59	193,83	286,61	93	F	101,73
5	8,27	73,22	99	B	13,34	194,49	283,76	80	F	121,43
6	1,45	20,85	100	A	5,04	180,27	290,70	112	E	75,17
7	1,13	26,95	99	A	3,56	186,55	290,69	114	E	74,83
8	2,05	23,94	103	A	7,41	174,49	290,51	140	E	60,55
9	2,05	23,94	103	A	7,41	174,49	290,51	140	E	60,55
10	1,00	20,86	102	A	4,48	159,52	252,53	144	E	56,28
11	1,62	20,28	103	A	5,66	160,86	271,72	135	E	58,36
12	1,76	32,11	101	A	3,85	175,79	289,43	135	E	53,70
13	2,28	28,22	103	A	6,75	161,85	290,61	139	E	54,27
14	3,19	19,23	100	A	6,48	159,22	286,37	135	E	49,24
15	0,94	29,12	102	A	4,67	189,63	287,10	105	F	79,61
16	5,30	35,57	102	A	8,07	130,13	257,35	149	E	40,82
17	3,00	39,26	98	A	4,82	145,82	289,84	149	E	48,27
18	2,21	34,82	103	A	4,46	142,35	257,56	147	E	54,38
19	4,09	37,65	102	A	8,32	140,98	260,32	153	E	44,33
20	1,00	19,80	102	A	5,80	176,49	290,37	135	E	60,64

Legenda: Qlen: comprimento médio de fila; Qlen,max: comprimento máximo de fila. Autor, 2021.

Ao inferir a Tabela 14 em comparação com a Tabela 13 percebe-se que os resultados da simulação 19 são os mais satisfatórios no quesito de quantidade de veículos, além disso, em termos de comprimento médio de fila e atraso médio de fila apresentam os valores mais esperados para as pernas da rotatória analisada. A partir do parâmetro EPAM tem-se um erro de apenas 14,4% com a calibração utilizando os parâmetros apresentados na Tabela 15 definidos como ideais para o estudo deste trabalho.

Tabela 15: Parâmetros calibrados para o modelo Wiedemann 74.

Descrição	Ax	Bxadd	Bxmult
Calibrado	1,3	1,0	1,0
<i>Default</i>	2,0	2,0	3,0

Fonte: Autor, 2021

Durante a calibração do modelo constatou-se a influência de cada um desses parâmetros nos resultados da simulação e principalmente na simulação do comportamento dos motoristas. Em relação ao parâmetro “ax” notou-se que à medida que aumentava seu valor, o comprimento de fila crescia proporcionalmente nas pernas com formação de fila, reduzindo assim a quantidade de veículos inseridos na simulação. Como os parâmetros “bxadd” e “bxmult” estão relacionados diretamente a distância de segurança pretendida pelo veículo seguidor eles apresentam elevada importância também no modelo como pode ser observado na simulação 5 da Tabela 14 que utilizou “bxadd” e “bxmult” iguais a 6, respectivamente, resultando em uma das menores quantidades e veículos inseridos na simulação, no maior comprimento médio de fila e atraso médio entre todos os valores analisados.

Como os três coeficientes estão ligados diretamente ao comportamento do motorista observa-se que à medida que diminui os seus valores, os motoristas se tornam mais agressivos com maiores valores de aceleração e maior tempo de reação, ou seja, é correto afirmar que os motoristas na rotatória são mais agressivos.

No intuito de determinar o modelo de *Car-following* ideal para estudo de interseções em vias urbanas decidiu-se avaliar também, o W99. Como esse modelo possui 10 parâmetros escolheu-se avaliar os parâmetros: CC0, CC1, CC2, CC3, CC4, CC5, CC6, CC7 e CC8 mesclando os parâmetros escolhidos por Medeiros (2012) e JIE *et al.*, (2013). Ao contrário do desenvolvido para W74, no modelo W99 foram necessários replicar 30 simulações para assim determinar os coeficientes e valores ideais. Na Tabela 16 estão apresentados os dados de comprimento médio e máximo de fila, quantidade de veículos e atraso médio das saídas 01 e 04 usadas como parâmetros para determinar quando a simulação estaria calibrada.

Tabela 16: Resultados da simulação para calibração do modelo W99

SIMUL.	Saída 01					Saída 04				
	Qlen	Qlen,max	Quant.	N. Serv.	Atraso	Qlen	Qlen,max	Quant.	N. Serv.	Atraso
1	0,77	17,05	100	A	3,23	179,85	291,12	125	F	68,88
2	0,23	14,62	102	A	2,7	171,09	289,08	111	F	84,3

Fonte: Autor, 2021.

Continuação Tabela 16: Resultados da simulação para calibração do modelo W99.

SIMUL.	Saída 01					Saída 04				
	Qlen	Qlen,max	Quant.	N. Serv.	Atraso	Qlen	Qlen,max	Quant.	N. Serv.	Atraso
3	0,12	101	101	A	1,86	192,6	289,42	104	F	98,4
4	0,12	14,81	101	A	1,86	191,24	288,95	107	F	88,88
5	0,79	17,36	102	A	3,4	179,11	291,09	121	E	71,9
6	1,77	29,39	102	A	4,61	163,47	291,14	141	E	58,14
7	3,11	29,64	102	A	7,34	172,85	289,35	136	E	60,42
8	0,19	11,54	103	A	2,87	171,31	289,96	134	E	56,24
9	0,23	16,28	103	A	2,36	176,16	290,89	138	E	60,55
10	0,42	18,34	102	A	3,01	154,89	290,66	150	E	51,53
11	0,46	12,2	103	A	3,72	169,38	291,1	142	E	58,29
12	1,03	20,38	102	A	3,32	140,79	254,21	149	D	46,64
13	2,05	32,4	103	A	4,86	173,24	290,78	140	E	57,65
14	1,4	22,31	103	A	3,71	158,61	291,11	145	E	55,99
15	0,59	20,62	101	A	3,75	147,44	290,86	154	E	49,35
16	1,3	25,39	103	A	3,21	169,58	291,15	137	E	54,73
17	1,73	24,96	103	A	5,54	145,64	291,13	151	E	50,51
18	1,07	23,55	102	A	4,36	134,53	257,2	153	E	46,51
19	0,52	18,23	103	A	2,52	132,77	266,72	153	E	46,84
20	1,72	27,06	103	A	3,84	124,32	246,24	157	E	47,4
21	0,314	14,64	103	A	2,65	174,18	290,79	146	E	54,63
22	1,07	23,55	102	A	4,36	134,53	257,2	153	E	46,51
23	0,99	20,16	101	A	4,57	127,34	256,26	157	E	45,9
24	0,46	18,09	103	A	2,79	147,28	279,28	148	E	51,54
25	1,83	19,33	103	A	5,76	150,09	280,18	148	E	55,27
26	1,33	19,45	103	A	4,49	126,86	253,22	159	E	51,33
27	1,19	27,15	102	A	2,45	151,69	258,96	153	E	53,17
28	0,46	13,51	103	A	3,27	114,67	258,54	164	E	47,02
29	1,19	27,14	103	A	2,45	151,69	258,96	153	E	53,17
30	0,19	11,4	103	A	2,5	154,02	251,25	149	E	52,37

Fonte: Autor, 2021.

Inicialmente foram avaliados alguns parâmetros isoladamente como o parâmetro CC7 que representa a aceleração real durante a oscilação utilizado por JIE *et al.*, (2013) em seu

trabalho para medir o desempenho da velocidade e emissão de poluentes em vias urbanas, ao modificar seu valor o desempenho da interseção se aproximou mais do esperado e após algumas avaliações determinou-se o seu valor para a interseção igual a 0,40.

O parâmetro CC1 que está relacionado ao *headway* possui apenas oito valores a serem escolhidos e ao utilizar um valor igual a dois observou-se a diminuição no número de veículos inseridos na simulação, em virtude disso, usou o menor valor permitido, CC1= 0.5, a partir da sexta simulação em diante já que valores maiores implicavam em resultados inconsistentes.

Para o CC2 usou o intervalo de valores entre 1 e 4, sendo que à medida que aumentava seu valor, os parâmetros avaliados destoavam do esperado para a interseção e o valor que melhor se ajustou ao interesse foi de CC2=1,5. Os parâmetros CC3 e CC6 mostraram grande importância nos resultados da simulação, o CC3 que simula o tempo de reação do motorista ao iniciar a desaceleração até atingir a distância de segurança foi ajustado para um tempo de -3.0 s ao invés de -8.0 s que é o valor padrão do modelo, essa escolha é justificada em função de se estar analisando via urbana e como as velocidades de tráfego são inferiores as de rodovias permite que os motoristas das vias urbanas demorem a iniciar o processo.

Em relação ao parâmetro CC6, Lacerda (2016) afirma que um elevado valor alto desse coeficiente resulta em um aumento da oscilação na velocidade e conseqüentemente aumento da distância de *following* que não é o caso de vias urbanas que possuem velocidades quase que constantes e principalmente próximo a área de estudo, então na calibração da simulação seu valor convergiu para 2,0. Os demais parâmetros são igualmente importantes, mas esses quatro citados apresentaram maior importância para calibrar o modelo com base, principalmente na quantidade de veículos. Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros calibrados e seus respectivos valores encontrados obtidos na simulação 28 que tem seus resultados apresentados na Tabela 16.

Tabela 17: Parâmetros calibrados para o modelo W99

Descrição	CC0	CC1	CC2	CC3	CC6	CC7
Calibrado	1,0	0,5	1,5	-3,0	2,0	0,40
Default	1,5	0,9	4,0	-8,0	11,44	0,25

Fonte: Autor, 2021.

Ao avaliar o coeficiente EPAM no W99 tem-se um valor igual a 11,8%, pois a saída 04 obteve o número de veículos mais próximo do contabilizado com um erro de apenas 5,20%,

sem contar que nos parâmetros de comprimento de fila e atraso médio obteve os dados mais próximo do real.

Analisando os resultados identificar que a simulação com a utilização do modelo W99 na rotatória é o mais adequado para estudar o desempenho e avaliar o nível de serviço porque obteve o menor erro de veículos inseridos nas duas saídas de referência, dessa forma, a rotatória foi avaliada nos três casos mencionados na metodologia com o uso do W99.

4.3.2. Determinação da brecha crítica da interseção

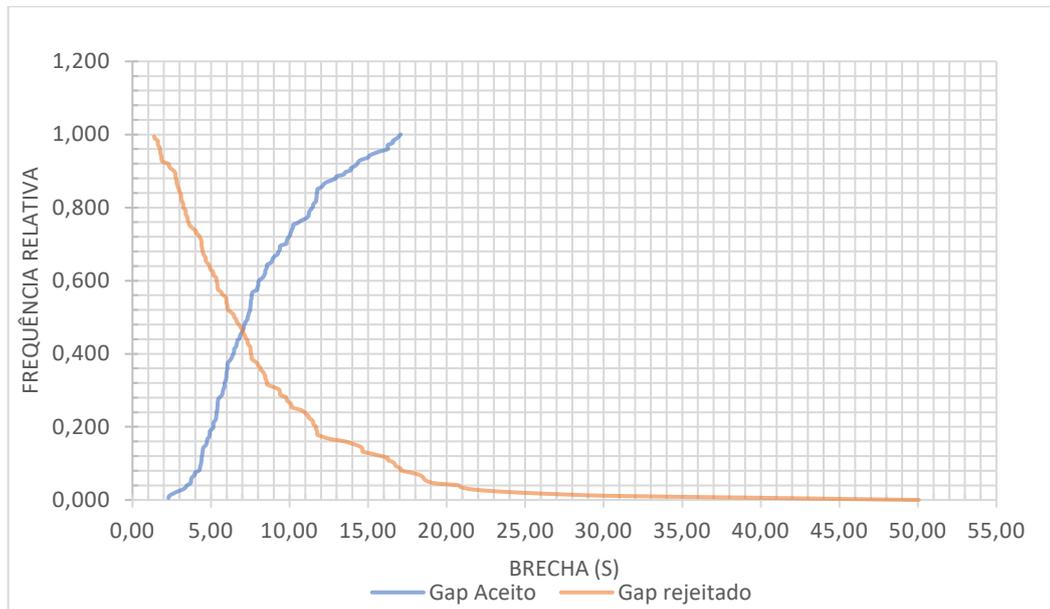
Após a construção da matriz OD pôde-se observar o fluxo total circulante na rotatória e com isso determinar no estudo anterior que a segunda feira no horário de pico das 07:00h às 08:00h da manhã teve o maior volume. Portanto, para a determinação da brecha crítica da interseção foi definido o mesmo dia para coleta do *gap* e assim obter mais representatividade no estudo da interseção. A filmagem das brechas aceitas e rejeitadas foi feita na saída 04 no dia 02 de agosto de 2021.

Com o auxílio do software desenvolvido para estudo do *gap* crítico que permite determinar as brechas aceitas e rejeitadas e o tempo de espera dos veículos não prioritários na saída 04. Para esse estudo foi desconsiderado os intervalos de *Lag*, ou seja, considerou apenas os veículos que foram obrigados a parar na linha de retenção e aguardar por uma brecha que é o requisito de ambos os modelos escolhidos para determinação do *gap* crítico. No Anexo C são mostrados parte dos resultados obtidos com o programa que mostra a contagem de veículos para cada faixa, brechas da via de circulação, e o tempo de espera dos veículos não prioritários.

Foram identificados 174 veículos que aceitaram e rejeitaram ao menos uma brecha na faixa esquerda que serão utilizados para determinar a brecha crítica dessa faixa. Já na faixa direita observou-se apenas 72 veículos para determinação do *gap* crítico.

Para determinar o *gap* crítico tanto da faixa direita como esquerda no método de Raff foi necessária a ordenação das brechas aceitas e rejeitadas em ordem decrescente. Nos anexos D e F são mostrados os dados e o modelo de tabela que facilita a determinação do gráfico. Na Figura 18 é apresentada o gráfico que determina o *gap* crítico da rotatória para a faixa da esquerda pelo método de Raff.

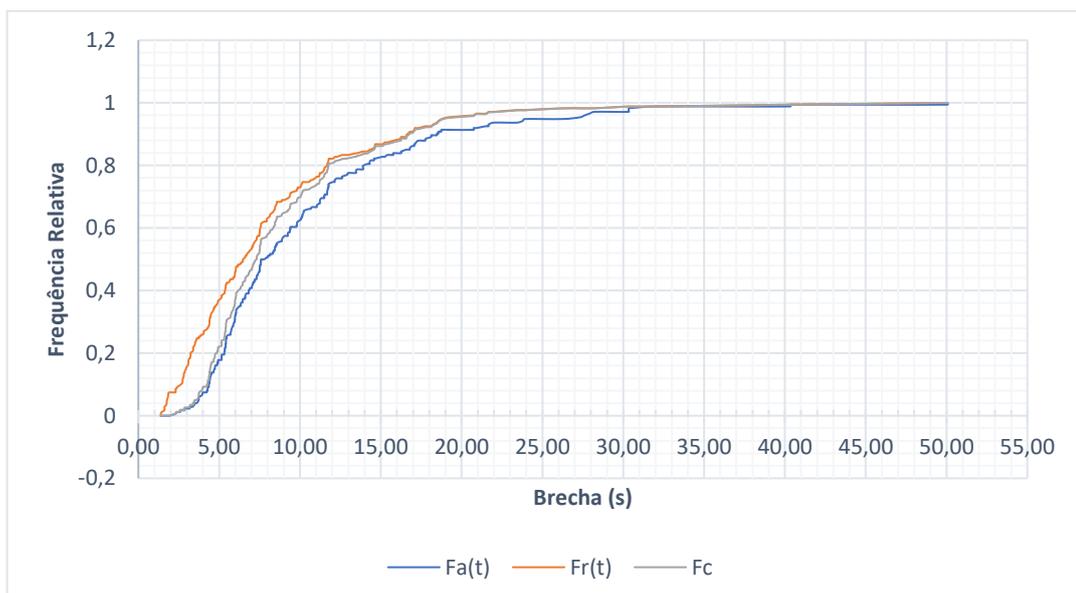
Figura 18: *Gap* crítico da faixa esquerda determinado pelo método de Raff.



Fonte: Autor, 2021.

O *gap* crítico pelo método de Raff é obtido a partir da interseção das curvas de função de frequência acumulada e a sua inversa, obtendo assim, $t_c = 7,09s$ na faixa esquerda da saída 04. Na Figura 19 está apresentado o gráfico com a frequência de *gap* aceitos, rejeitados e dos intervalos críticos estimados para o método de Wu, mas o resultado desse método é calculado, sendo $t_c = 9,05s$, obtendo-se dessa forma um *gap* crítico médio entre os dois métodos igual a $8,07s$.

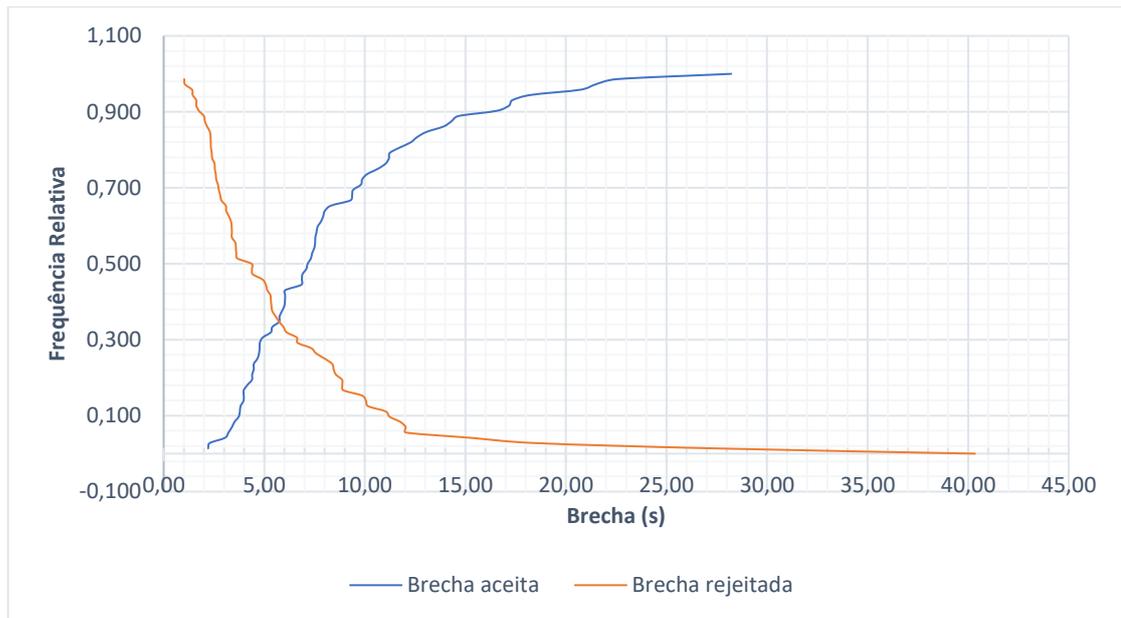
Figura 19: Frequência acumulada de brechas aceitas e rejeitadas pelo método de Wu - faixa esquerda.



Fonte: Autor, 2021.

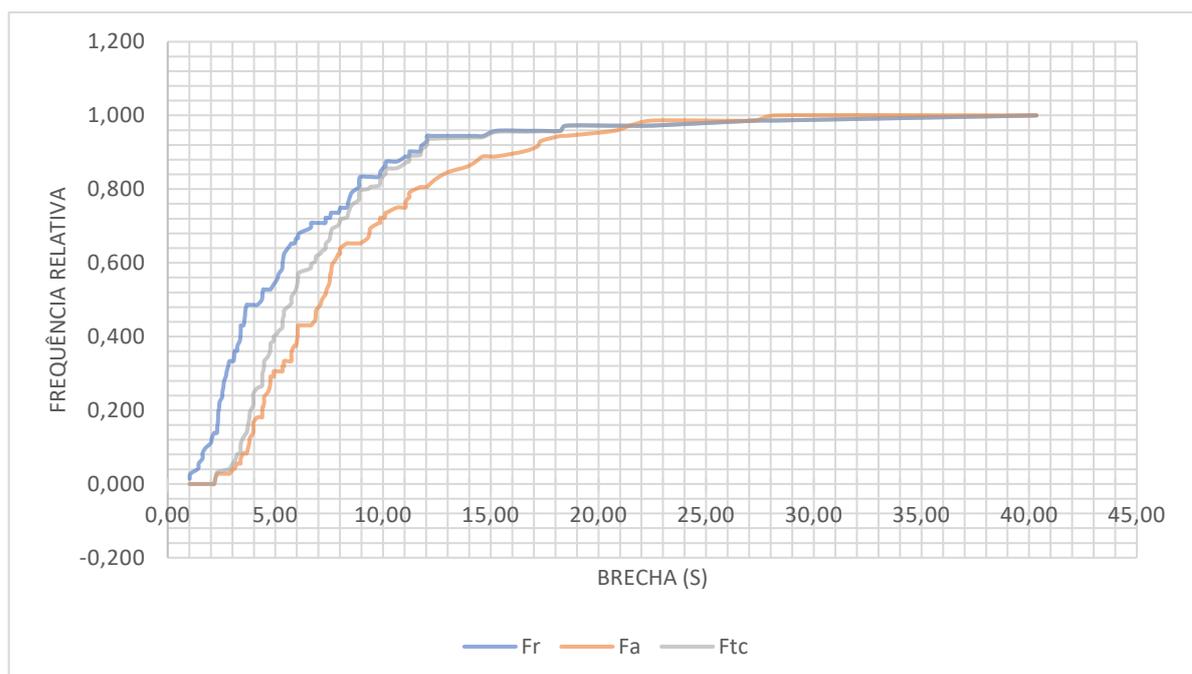
Visto que alguns pesquisadores obtiveram valores diferentes para cada faixa como nas pesquisas de Vasconcelos (2014) e Neris (2018), determinou-se também o *gap* crítico dos veículos da faixa direita, isto posto, tem-se na Figura 20 o gráfico para determinação da brecha direita da saída 04 pelo método de Raff e na Figura 21 as funções de frequência acumulada para a mesma faixa pelo método de Wu.

Figura 20: Determinação do *gap* crítico pelo método de Raff - faixa direita.



Fonte: Autor, 2021.

Figura 21: Frequência acumulada do método de WU - faixa direita.



Fonte: Autor, 2021.

Do gráfico da Figura 20 determina-se que o *gap* crítico igual a 5,74s pelo método de Raff enquanto o calculado no método do WU é de 7,14s, resultando em um valor médio de 6,44s para a saída 04 e que é utilizado como referência para toda a interseção.

Nota-se que os valores de cada faixa são diferentes, sendo o da direita o menor assim como observado pelos autores citados anteriormente, essa diferença está associada principalmente a geometria da rotatória que permite um melhor campo de visão para condutor determinar se entra ou não. Além disso, os veículos avançam mais que os da faixa esquerda. Neris (2018) afirma que os condutores da faixa da direita têm o costume de avançar a linha de retenção sem que haja uma brecha necessária, forçando sua entrada o que também foi observado na interseção em análise.

Percebe-se que a brecha crítica determinada para a rotatória é um valor bem elevado que pode estar associado a geometria da rotatória já que a mesma é um tanto quanto peculiar por possuir seis pernas que distribui ainda mais o volume dos veículos e aumenta o intervalo entre os veículos em algumas saídas, além disso, na matriz OD da segunda feira mostrada na Tabela 12 as saídas 04 e 05 que possuem elevado fluxo de veículos têm como principal destino a entrada 01 e já a saída 01 tem como destino principal a entrada 04.

Os *gaps* para a origem 4 são disponibilizados principalmente pelos veículos das saídas 01, 02 e 03 que têm como destino as entradas 01 e 05, mas o fluxo de veículos nessas rotas é interrompido e bem inferior as de maiores fluxo, pois quando somadas resultam em 474 veículos em UCP, ou seja, 16% do volume total na interseção que disponibiliza a brecha para a saída 04. Além disso, a chegada dos veículos da saída 04 coincidia com a passagem dos veículos da via prioritária durante uma brecha maior que é rejeitada. Observou-se elevado número de motoristas que rejeitaram grande intervalos de brechas em virtude da concomitância de chegada entre os veículos da saída 04 com os da via de circulação.

Ao analisar o valor médio do *gap* crítico obtido para as duas faixas que possuem valor superior a 5,0s seria correto afirmar que o comportamento dos motoristas na rotatória é mais cauteloso já que quanto menor o valor do *gap*, mais agressivo é o condutor, entretanto, não é o caso do comportamento observado em campo porque muitos veículos adentravam a interseção em uma mesma brecha, logo o uso dos métodos determinísticos para determinar o *gap* crítico não é adequado para a rotatória.

A fim de determinar o *gap* crítico com uso da simulação, usando o tempo de espera como parâmetro calculou-se seu valor médio a partir de todas as brechas aceitas para faixa direita e esquerda referente a saída 04 que são apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18: Tempo de espera médio na saída 04 de cada faixa.

Faixa Esquerda	Faixa Direita
4,34s	3,77s

Fonte: Autor, 2021.

Posteriormente, foram realizadas 15 simulações em que alterou o valor do *gap* crítico no modelo RP e com isso obter os resultados do atraso médio, velocidade média e quantidade de veículos inseridos por simulação, na Tabela 19 estão apresentados os resultados obtidos em cada simulação com o *gap* adotado.

Tabela 19: Resultados das simulações para calibração do *gap* crítico.

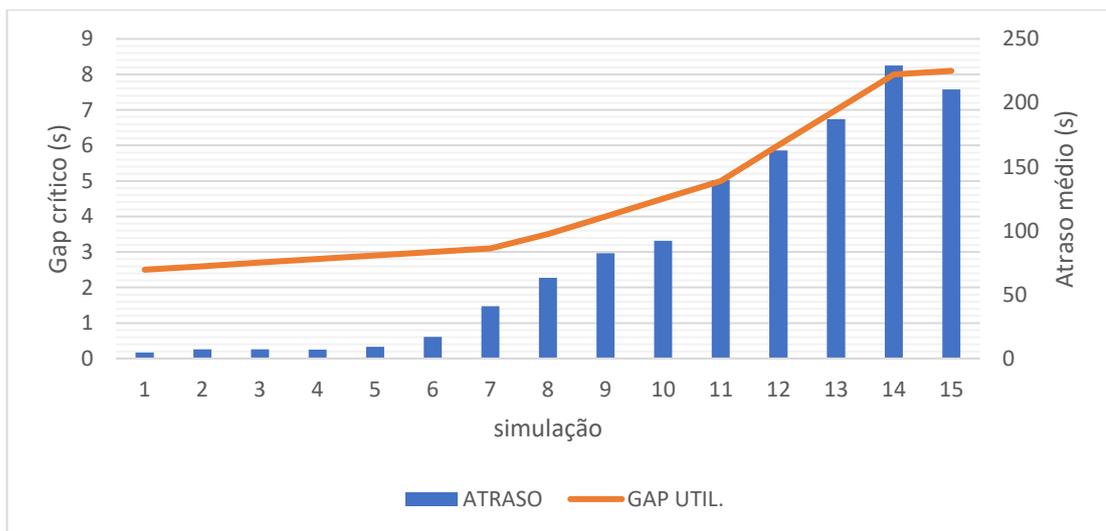
Simulação	Brecha crítica (s)	Velocidade (km/h)	Atraso (s)	Quant. Veíc.
1	2,9	19,67	9,28	174
2	2,8	22,11	6,98	174
3	2,7	23,01	7,28	174
4	2,6	21,64	7,27	175
5	2,5	26,99	4,64	174
6	3	13,16	16,95	110
7	3,1	13,16	40,98	110
8	3,5	13,16	63,09	110
9	4	13,16	82,45	110
10	4,5	15,19	92,03	110
11	5	15,77	139,67	54
12	6	15,77	162,77	54
13	7	15,77	187,35	54
14	8	15,77	229,21	54
15	8,1	15,77	210,44	54

Fonte: Autor, 2021.

Nota-se na Tabela 19 que o valor do *gap* igual a 2,5s inserido na simulação 5 forneceu o resultado mais próximo do atraso médio de referência com valor de 4,64 s enquanto o calculado para a faixa esquerda é igual 4,34s, isso representa um erro de apenas 7,0% o que torna o valor utilizado do *gap* bastante representativo e justifica sua utilização nos modelos de simulação para estudo de melhoria da rotatória.

Além do atraso obtido nessa simulação, ao conferir a quantidade de veículos que partiram da saída 04 na simulação com o mostrado na Tabela 13 tem-se um erro de 0,6% que dá mais confiabilidade ao modelo calibrado. Outro fator preponderante para esse estudo é a velocidade média da simulação igual a 27 km/h enquanto a de campo é 31,37 km/h que também são valores muito próximos. De modo a visualizar melhor o comportamento do *gap* crítico utilizado em relação ao atraso médio construiu-se o gráfico da Figura 22.

Figura 22: Relação do *gap* crítico com o atraso médio na saída 04.



Fonte: Autor, 2021.

Obteve-se, na Figura 22, que à medida em que aumenta o valor do *gap*, o atraso também aumenta distanciando cada vez mais do valor de referência. Na última simulação foi utilizado o *gap* crítico obtido pelos métodos determinísticos que resultou em um atraso de 210,44s que é quase 50 vezes maior que o coletado de campo.

Tendo definido o *gap* crítico, $t_c = 2,50s$, observa-se que os motoristas na rotatória da UFCG, e mais precisamente, da Rua Engenheiro Lourival Andrade são mais agressivos ao entrarem na interseção e quando comparado com o encontrado por Neris (2018) para rotatórias no estado de São Paulo. Conclui-se que esse parâmetro é essencial para estudo de simulação com rotatórias e pode variar de cidade para cidade e até mesmo no horário de análise.

4.4. ESTUDOS DE CASOS

Após calibrar os modelos *car-following* e determinar que o modelo W99 apresentou os melhores resultados na calibração com um erro de 11,80% em relação a quantidade de veículos simulados e com resultados de comprimento de fila mais próximo da realidade. Com isso, utilizou-se esse modelo e executou-se 15 simulações para cada caso: caso A (modelo real); caso B (prioridade para via principal) e caso C (semáforo na via principal).

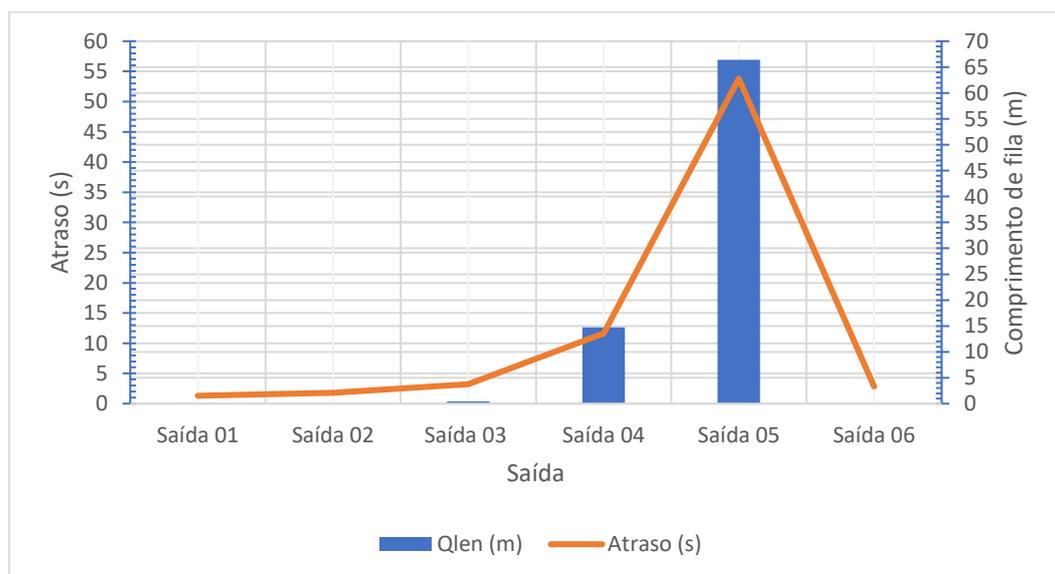
O caso A simula o comportamento real da rotatória em que os veículos da faixa de circulação têm prioridade sobre as vias de interseção e permite determinar o nível de serviço atual. Na Tabela 20 estão apresentados os resultados obtidos para o comprimento médio de fila, atraso e nível de serviço de cada saída e na Figura 23 pode-se observar esses dados graficamente.

Tabela 20: Resultados da simulação no caso A.

Parâmetros	Saída 01	Saída 02	Saída 03	Saída 04	Saída 05	Saída 06
Qlen (m)	0,01	0	0,4	14,76	66,44	0
Atraso (s)	1,31	1,82	3,21	11,61	53,8	2,86
N. Serviço	A	A	A	B	D	A

Fonte: Autor, 2021.

Figura 23: Relação entre o atraso e comprimento de fila por saída - Caso A.



Fonte: Autor, 2021.

Inferindo a Tabela 20 e o gráfico da Figura 23 percebe-se que a saída 05 é mais prejudicada em termos de atraso e comprimento de fila que resulta no nível de serviço D que é

o mais baixo entre elas. A entrada dos veículos na rotatória por essa entrada é limitada principalmente pela zona 4 que possui o maior volume de veículos e tem como destino principal a zona 1, o funcionamento do dispositivo com prioridade da via de circulação é bastante eficaz para a matriz OD utilizada, mas para o caso do aumento desse volume, o nível de serviço pode ser bastante prejudicado.

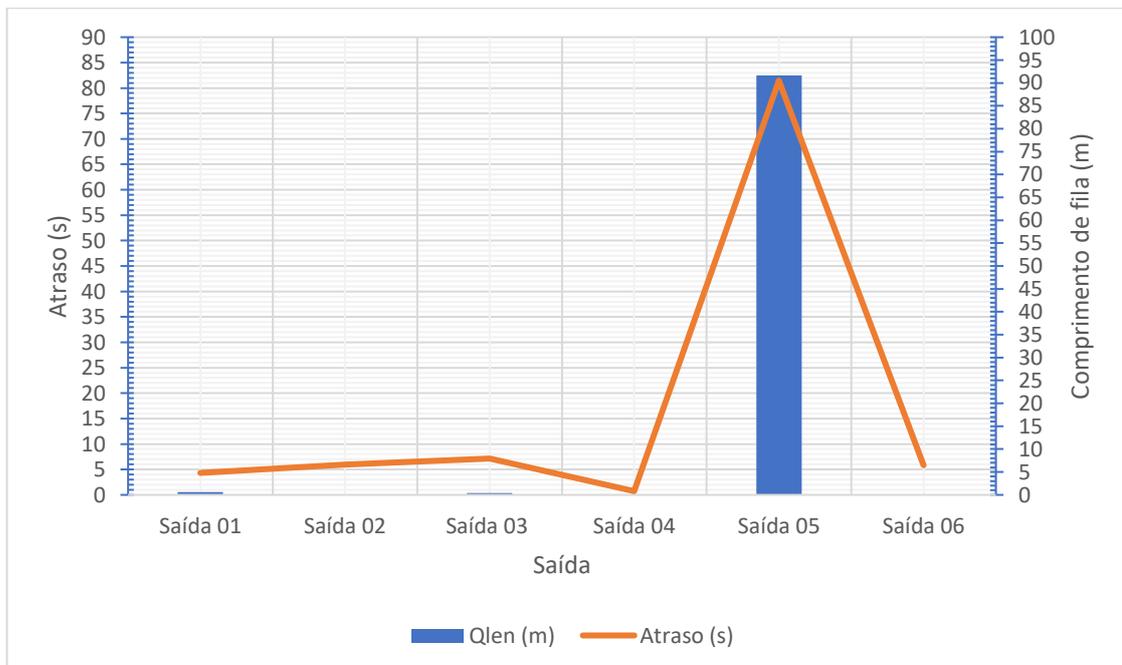
O Caso B tem como característica a prioridade das zonas 1 e 4 consideradas vias principais do local por possuírem grande fluxo de veículos e serem paralelas, permitindo assim, o uso desse caso. Na Tabela 21 e Figura 24 são apresentados os resultados das simulações em cada saída para o caso B para avaliar a eficiência do modelo.

Tabela 21: Resultados da simulação no caso B.

Parâmetros	Saída 01	Saída 02	Saída 03	Saída 04	Saída 05	Saída 06
Qlen (m)	0,61	0	0,37	0,083	91,64	0
Atraso (s)	4,34	5,93	7,17	0,73	81,46	5,83
N. Serviço	A	A	A	A	E	A

Fonte: Autor, 2021.

Figura 24: Relação entre o atraso e comprimento de fila por saída - caso B.



Fonte: Autor, 2021.

Analisando a Tabela 21 e Figura 24 nota-se uma redução do atraso e comprimento de fila na saída 4, ou seja, melhora do seu nível de serviço enquanto a saída 05 ainda apresenta os piores níveis de serviço. Ao comparar com o caso A tem-se uma piora no nível de serviço da saída 05 com atraso 51% mais alto que o do caso A e que ultrapassa um minuto, portanto, o uso desse modelo na operação da rotatória não traz benefícios.

O caso C consiste em inserir semáforos nas vias com maiores volumes (vias principais) e assim formar pelotões, permitindo intervalos de entrada de veículos das demais vias. Considerou-se as mesmas vias principais do caso B que também têm prioridade sobre o fluxo circulante, inserindo-se apenas semáforos com um ciclo de 40,0s e distante a 20,0m da faixa de retenção, essa distância foi definida com base no estudo desenvolvido por Neris e Ferraz (2019) que determinaram uma distância ótima do semáforo entre 10,0m e 25,00m para um fluxo de 900 veículos/hora nas vias principais que é próximo do obtido para a rotatória da UFCG. Na Figura 25 consta o local de instalação dos semáforos no modelo da simulação representada pelas linhas vermelhas circuladas.

Figura 25: Modelo de simulação com semáforos nas zonas 1 e 4 - caso C.



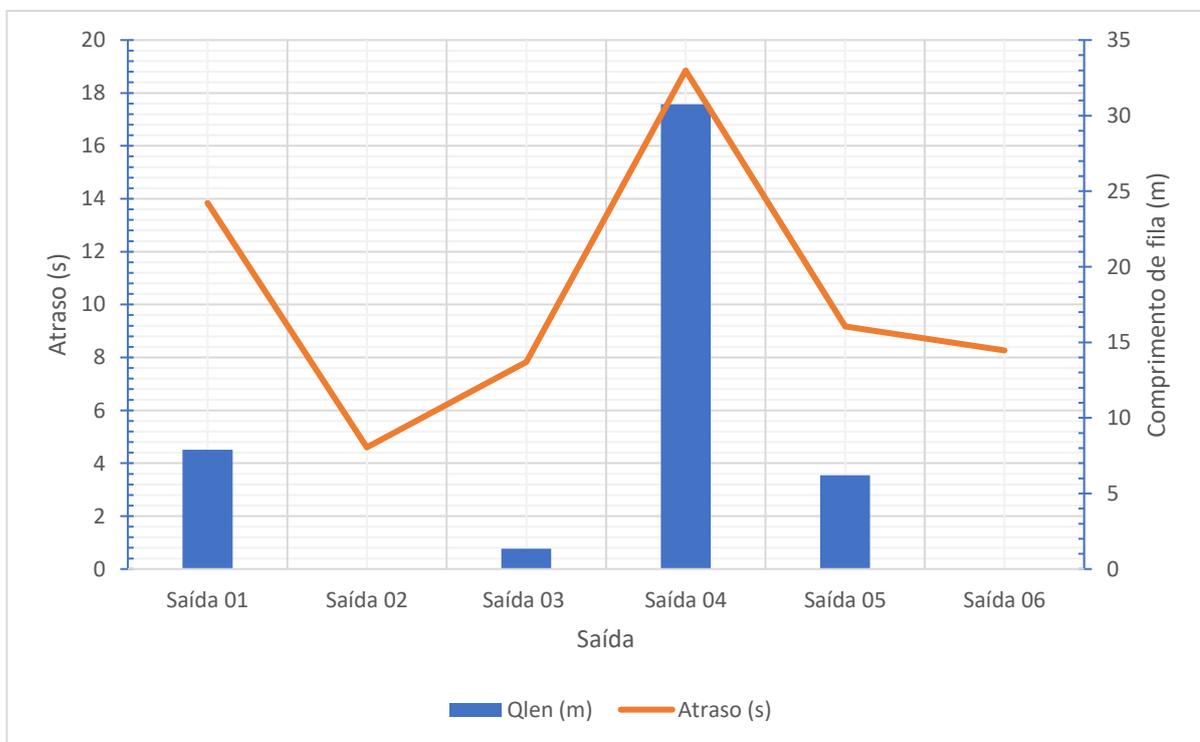
Fonte: Vissim, 2021.

Dessa forma, construiu-se a Tabela 22 e o gráfico da Figura 26 que apresenta os resultados de interesse para avaliar a eficiência nas pernas da rotatória em relação ao demais modelos já apresentados.

Tabela 22: Resultados da simulação no caso C.

Parâmetros	Saída 01	Saída 02	Saída 03	Saída 04	Saída 05	Saída 06
Qlen (m)	7,9	0	1,35	30,75	6,21	0
Atraso (s)	13,84	4,6	7,83	18,85	9,17	8,26
N. Serviço	B	A	A	B	A	A

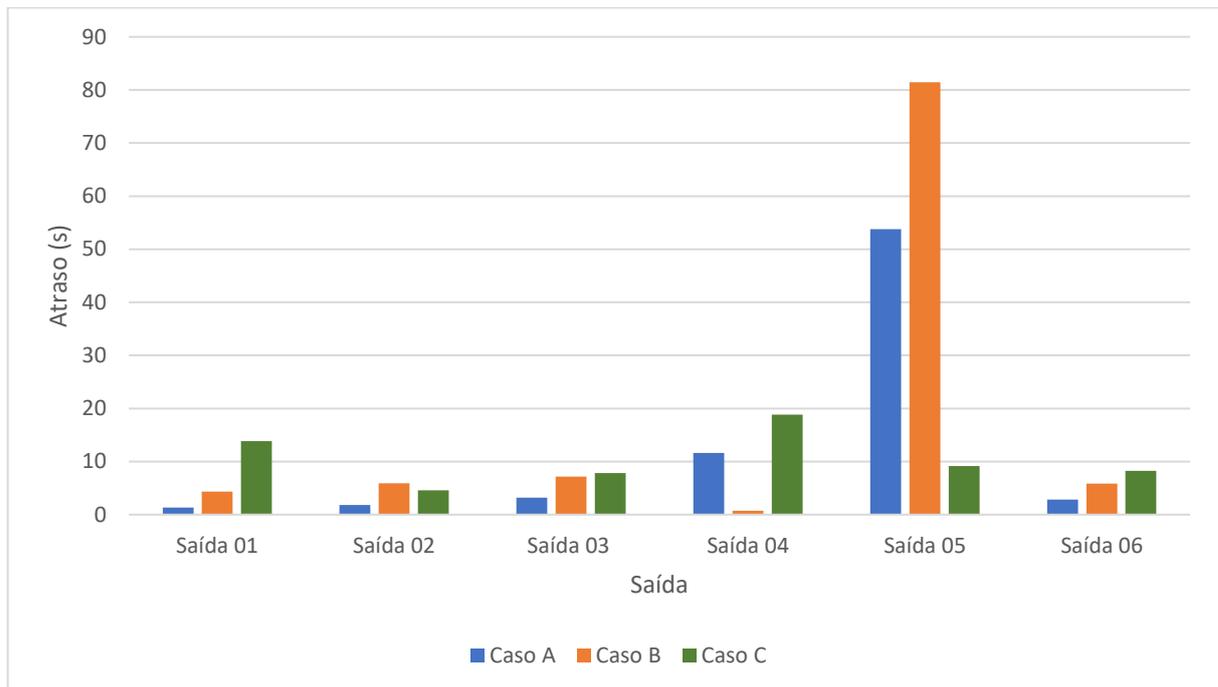
Fonte: Autor, 2021

Figura 26: Relação entre o atraso e comprimento de fila por saída - Caso C.

Fonte: Autor, 2021.

A partir dos resultados obtidos da Tabela 22 e do gráfico da Figura 26 pode-se perceber que a operação da rotatória com esse modelo eleva o atraso e comprimento de fila nas saídas 1 e 4, mas ainda fornece níveis de serviço bastante satisfatórios, com uma distribuição mais igualitária do atraso entre as saídas e permitiu ainda, a melhora do nível de serviço na saída 05 com um atraso médio de apenas 9,17s, ou seja, melhora de 83% do atraso em relação ao caso A. Na Figura 27 está apresentado o gráfico que compara o valor de atraso em cada saída nos três casos estudados e permite avaliar visualmente o modelo mais ideal para o funcionamento da rotatória.

Figura 27: Comparação do atraso médio nas zonas em cada modelo.



Fonte: Autor, 2021.

Inferindo o gráfico nota-se que as saídas 1, 2, 3, 4 e 6 tiveram valores de atrasos bem próximos nos três casos enquanto a saída 5 é a mais crítica nos casos A e B. O Caso B traz um aumento de 41% no atraso médio de todas as saídas quando comparado ao modelo real do caso A, já o caso C melhora o atraso e conseqüentemente o nível geral da interseção em 10,42%, portanto, ao usar esse modelo no funcionamento da rotatória irá melhorar o seu fluxo total em que o nível de serviço mais baixo será o B para as zonas 1 e 4 que serão controlados pelo semáforo.

5. CONCLUSÕES

No estudo de caracterização geométrica e operacional verifica-se que é uma interseção fora dos padrões usuais de rotatórias por possuir seis vias que se interceptam, pois é comum o uso de rotatória em locais que existam a interseção de três ou quatro vias e também por sua ilha central ser semelhante a uma elipse. Apesar da largura da faixa de circulação permitir dois veículos de passeio lado a lado, ela não foi projetada para duas faixas de tráfego, pois assume-se que o veículo de projeto seja do tipo SR. Em função da geometria e operação a rotatória é classificada como como rótula assimétrica com ilha central em elipse.

A escolha do dia da semana para construção da matriz de origem-destino é extremamente importante, pois os tipos de veículos e seu fluxo variam entre os dias da semana como observado nos resultados em que a quantidade de veículos CO é maior na sexta feira. No caso, escolher outro dia como a quarta, por exemplo, é provável que se obtenha uma quantidade menor. O horário de coleta também é determinante na determinação do maior volume porque em centros urbanos tem-se maior tráfego nas vias nos horários que a população usa para ir e voltar do trabalho, ou seja, o horário de pico da rotatória da UFCG está situado entre 07:00h e 08:00h e das 17:00h às 19:00h, dessa forma, determinou-se que a segunda feira possui o maior volume de veículos na interseção.

Apesar de em grandes centros urbanos existir a predominância da quantidade de motocicletas em relação aos carros de passeio em um estudo de volume, essa situação não foi observada nessa interseção, pois a quantidade de carros de passeio ultrapassou até de motocicletas com uma média de 50% em todas as rotas, ou seja, no dispositivo predomina-se o tráfego de veículos urbanos e leves.

A coleta de dados com uso de um celular para filmar os movimentos dos veículos não é ideal para a construção da matriz OD, pois a visualização dos veículos no outro extremo da rotatória torna-se difícil por existir muitas obstruções que atrapalham a visualização e identificação dos veículos. Além disso, tem o problema causado pelos veículos de maior porte como ônibus e veículo CO que são mais altos e impedem também a visualização dos veículos nas outras saídas. O ideal é que seja feita a coleta acima da rotatória para que seja possível captar todas as vias, permitindo observar sem nenhuma dificuldade o movimento e tipo do veículo.

Em virtude da coleta e dados ter sido feita em período fora do considerado padrão devido a pandemia do novo Corona vírus acredita-se que o volume obtido seja menor se obtido

no ano de 2019, por exemplo, pois as escolas e universidades não voltaram a sua normalidade em que os principais usuários são os frequentadores desses locais, ou seja, espera-se que o fluxo na interseção seja maior após a normalização de todas as atividades e como sugestão para futuros trabalhos pode ser construída uma nova matriz OD após pleno funcionamento da universidade e analisar a influência dos universitários e seu corpo docente no nível de serviço da rotatória.

A calibração da simulação é imprescindível para obtenção de resultados satisfatórios e reais já que o comportamento do tráfego é determinado pelos condutores e que esses variam de país, cidade, tipo de interseção e até mesmo horário. No caso de utilizar os valores padrões do software que é definido com valores de outro país seriam obtidos resultados não representativos e que não trariam soluções para os problemas levantados.

Ao calibrar a rotatória com o parâmetro de quantidade de veículos no modelo W74 foi possível obter a simulação com EPAM de 14,4% que já seria suficiente para coleta de dados, mas ao calibrar a simulação com o uso do W99 obteve-se um EPAM de apenas 11,8% e que melhor se ajusta ao estudo. Portanto, o uso do W99 é o mais apropriado para estudo da rotatória da UFCG apesar do próprio desenvolvedor do software recomendar o uso para rodovias. A vantagem desse modelo é porque possui mais parâmetros que determinam o comportamento dos motoristas e assim é possível se aproximar ainda mais da situação real.

A escolha de outro parâmetro como comprimento médio de fila, tempo de viagem e velocidade média para calibrar os dois modelos poderia ser mais eficaz por estarem ligados diretamente ao comportamento dos motoristas em uma interseção ao invés da quantidade de veículos, fornecendo resultados mais promissores e fidedignos.

Como a brecha crítica está relacionada ao comportamento dos condutores ao entrar na interseção e está ligada diretamente ao nível de serviço, o uso desse parâmetro da rotatória em simulações é essencial para análise de nível de serviço e demais parâmetros. O seu uso nas simulações forneceu resultados mais promissores ao comparar com os parâmetros de referência como quantidade de veículos que apresentou um erro de 11,8% com seu valor padrão e quando utilizado seu valor calibrado o erro reduziu para 3,47%. Além da quantidade de veículos, o atraso médio obtido nas simulações mostrou ser mais próximo do real.

A partir da brecha crítica média entre os dois métodos obtida de 8,07s e 6,44s para as faixas esquerda e direita com os métodos determinísticos conclui-se os motoristas têm comportamento diferente de acordo com a faixa que utilizam, ou seja, os veículos da faixa

direita aceitam brechas menores que os da esquerda, e isso está associado ao fato de que nessa faixa os veículos costumam avançar a linha de retenção, forçando sua entrada na rotatória.

O elevado valor obtido com esses métodos está relacionado com o baixo fluxo e interrompido dos veículos das zonas 1,2 e 3 que realizam o retorno para a zona 1 e determinam as brechas aceitas e rejeitadas pela zona 4. Além disso, o fato de a rotatória possuir 6 pernas aumenta o tempo de brecha disponível. Conclui-se que esse *gap* não é representativo por aumentar o tempo de espera dos veículos e comprimento da fila na simulação, isto é, o uso dos métodos determinísticos para obtenção do *gap* crítico na rotatória não é ideal quando se tem fluxo interrompido enquanto a determinação com uso do tempo de espera dos veículos na simulação comparado com o obtido de campo é mais eficiente e mais real.

Conclui-se que para a rotatória da UFCG, mais precisamente para a Rua Engenheiro Lourival Andrade que a brecha crítica é 2,5s o que torna os condutores mais agressivos no trânsito que os de Araraquara determinado por Neris (2018) em que o *gap* determinado por ele foi de 3,55s e 3,07 para a faixa esquerda e direita respectivamente. Com isso, pode-se afirmar que a determinação desse parâmetro se torna ainda mais necessária para estudo de melhoria e análise de uma interseção não semaforizada.

A determinação do *gap* crítico é um processo bastante complicado já que não é algo observado em campo e depende do comportamento dos motoristas, então para sua determinação foi necessário a utilização de um software que possibilitasse a determinação das brechas aceitas e rejeitadas de forma mais rápida, pois o processo manual seria muito demorado e enfadonho de se determinar.

Com o estudo de casos da rotatória observou-se que a rotatória opera com nível de serviço médio igual a B onde o atraso é entre 10s e 15s, mas a saída 5 possui o nível de serviço mais baixo (nível D) em relação as outras saídas da interseção com atraso médio de aproximadamente 58s. A utilização da rotatória igual ao caso C que tem semáforo nas vias principais que forma pelotões e possui prioridade sobre as outras saídas irá melhorar seu funcionamento já que reduz o atraso da saída mais crítica em 84% e o nível de serviço médio de todas as saídas aumenta para A com atraso de até 10s.

O caso B é o menos indicado para seu funcionamento, pois resulta na piora do nível de serviço e maiores valores de atraso para saída 05, pois aumenta em 51% com relação ao caso A.

Como sugestão para futuros trabalhos pode-se avaliar a melhoria da rotatória com uso de duas faixas de tráfego nas vias principais e faixa de circulação em comparação com o caso real e determinar as brechas críticas com uso da simulação para as outras saídas.

6. REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. M. Estimação da brecha crítica em interseções não semaforizadas utilizando simulação microscópica de tráfego. 2018. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes, área de concentração: Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes.) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

ARIOTTI, P.; ARAÚJO, D. R. C.; MOSCARELLI, F. C. e CYBIS, H. B. B. (2004) Associação de Modelos Macroscópicos e Microscópicos de Tráfego para Estudo de Circulação. Anais do XVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Florianópolis, SC.

ALMEIDA, E. S. Simulação do fluxo de veículos de uma rotatória localizada na cidade de Manaus: Propostas para fluidez do tráfego. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Amazonas. Manaus. 2009.

BALVEDI, G. A. Microsimulação de tráfego aplicada a avaliação do desempenho da segurança viária em rotatórias: Um estudo de caso na rótula da UFSC/ Trindade. 2018. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial – PPGTG, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2018.

BLOOMBERG, L. E J. DALE (2000) Comparison of VISSIM and CORSIM Traffic Simulation Models on a Congested Network. Transportation Research Record 1727, TRB, National Research Council, Washington D.C. pp. 52-60.

BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. Manual de projeto de interseções. 2º ed. – Rio de Janeiro, 2005.

COELHO, M. D. Análise e sugestões para projetos geométricos de rótulas modernas em vias urbanas. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes.) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

CONTRAN (2007a) - Conselho Nacional de Trânsito (Brasil). Sinalização horizontal/ Contran-Denatran. 1º Edição – Brasília: Contran. 128 p.: il. (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito;4).

CONTRAN (2007b) – Conselho Nacional de Trânsito (Brasil). Sinalização vertical de regulamentação/ Contran-Denatran. 2º edição – Brasília: Contran. 220 p.: il. (Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito; 1).

CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO – CONTRAN. Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito: Sinalização Semafórica. Brasília, 2014.

COSTA, J. B. Mini-rotatórias: Contribuição na redução de conflitos em interseções urbanas. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2010.

FHWA. Roundabouts: Na Informational Guide – U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration – Publication n° RD-00-067, Virginia, USA, June, 2000.

FHWA – Federal Highway Administration (2004a). Traffic Analysis Toolbox. Vol I: Traffic Analysis Tools Primer, Washington D.C., 2004.

HCM – Highway Capacity Manual (2000) – High Capacity Manual. Transportation Research Board (TRB). National Research Council. In:
<https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/08/highway_capacital_manual.pdf >.

Hourdakis, J.; P. G. Michalopoulos e J. Kottommannil (2003) Practical Procedure for Calibrating Microscopic Traffic Simulation Models. Transportation Research Record, n. 1852, p. 130-139.

JIE, L.; ZUYLEN, H., V.; CHEN, Y.; VITI, F.; WILMINK, I. Calibration of a microscopic simulation model for emission calculation. Transportation Research Part C, no. 31, p. 172-184, 2013.

Kansas Roundabout Guide, A supplement to FHWA's Roundabouts: An Informational Guide <http://www.ksu.edu/roundabouts/ada/photos/manhattantrafficcircle.htm>: Exhibit 1-7 (upper left, upper right). 2003.

Laboratório de Sistemas de Transporte - LASTRAN (2009) Interseções. Porto Alegre: UFRGS. 83 diapositivos. Disponível em:
<http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/420_14intersecoes.pdf>.

LACERDA, V. M.; NETO, M. M. C. Considerações sobre a calibração do modelo de car-following do Vissim para vias arteriais urbanas. ANPET, Congresso de Pesquisa e ensino em Transportes, Curitiba, v. 28, p. 1-13, [2014].

LACERDA, V. M. Estimação da velocidade média em vias urbanas com uso do microssimulador Vissim. 2016. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes com Concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Programa de pós-graduação em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2016.

LIMA, E. P.; B, B. V.; G, M. L. Estudo do Uso de Rotatórias na Redução da Concentração de Monóxido de Carbono de Origem Veicular, Artigo do Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Maringá, Brasil, 2009. 12 p.

MAIA, F. V. B. Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microsimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana. 2007. 104 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2007.

MATHEW, T. V. Transportation Engineering. Vol. 1. Transportation Systems Engineering, Civil Engineering Department, Indian Institute of Technology Bombay, Mumbai, India, 2006.

MEDEIROS, A. L. Aplicabilidade de algoritmos genéticos para calibração de redes viárias urbanas microsimuladas. 2012. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

MEDEIROS, A. L. et al. Calibração de redes viárias urbanas microsimuladas com o uso de algoritmos genéticos. ANPET, XXVII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Belém, p. 1-12, 2013.

MOITA, M. H. V.; ALMEIDA, E. S. Aplicação de simulação para obtenção de soluções ao tráfego em rotatória da cidade de Manaus. *Jornal of Transport Literature*, vol. 6, n. 1, pp. 93-109. 2012.

NERIS, D. F. Melhoria do desempenho do tráfego em rotatórias com o emprego de semáforos próximos na via principal. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transportes) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Escola de Engenharias de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

_____. Análise de desempenho do tráfego em rotatórias com alto e desequilibrado fluxo de veículos empregado semáforo na via principal. 2018. 143 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes com concentração em Planejamento e Operação de Sistemas de Transporte) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

NERIS, D. F.; FERRAZ, A. C. P. Análise operacional de fluxo em pelotão em interseções do tipo rotatória. *INGENIERÍA DE TRANSPORTE* Vol. 18, N° 01: 17-23. (2014).

NERIS, D. F.; FERRAZ, A. C. P.; LAROCCA, A. P. C. Aplicação de métodos determinísticos para a obtenção de gap crítico em rotatórias urbanas brasileiras. *Associação nacional de pesquisa em transportes – ANPET*, [São Carlos], v. 27, 2019.

NETO, J. T. B. Avaliação da proposta de readequação da rotatória Av. Aguanambi x BR-116 utilizando microssimulação. 2013. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Ceará – UFC, Fortaleza, 2013.

OLIVEIRA, M. L.; CYBIS, H. B. Revisão da Experiência de Calibração do Software Vissim Aplicado a um Estudo de Caso de Autoestrada Brasileira. VIII SEPROSUL – Bento Gonçalves, Brasil, 2008.

OLIVEIRA, S. F. G. Calibração de modelos de microssimulação de tráfego para análise de interseções urbanas. 2016. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção e Reabilitação) – Instituto Politécnico de Viseu, Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu, Viseu, 2016.

PORTO, A. B. B. Análise do tráfego na rotatória da praça Edson Abdlla localizada na cidade universitária do Rio de Janeiro por meio de simulação computacional. 2018. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2018.

PORTUGAL, L. S. (2005) Simulação de Tráfego: Conceitos e Técnicas de Modelagem, Ed. Interciência, Rio de Janeiro.

RUBIM, B.; LEITÃO, S. O plano de mobilidade urbana e o futuro das cidades. Estudos Avançados, v. 27, n. 79, 2013.

SCHUSTER, F. P. O uso adequado de rotatórias como agente redutor da acidentalidade no trânsito. Jaú, SP. [2012].

SGARBI, B. B.; BARTELES, G. W. C. Análise de interseções no centro de Pato Branco-PR: um estudo de caso para melhoria do tráfego. Trabalho de conclusão de curso. 2018.

SILVA, A. B.; VASCONCELOS, L.; SANTOS, S. Moving from Conventional Roundabouts to Turbo-roundabouts. Procedia - Social and Behavioral Sciences 111, p. 137-146. 2014.

SOUZA, G. M. F. et al. Microssimulação para análise de projeção do tráfego rodoviário no entorno de um campus universitário. Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP, Maceió, v. 38, 2018.

SOUZA, J. V. Segurança de pedestres em rotatórias urbanas. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos. 2015.

SOUZA, M. V. J. Análise de desempenho de uma interseção não semaforizada em nível (rotatória) utilizando microssimulação – estudo de caso: Anel viário da UFRJ. 2014. 102 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil) – Escola politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2014.

TAEKRATOK, T. Modern Roudabouts for Oregon. Report n° OR-RD-98-17. Oregon Department of Transportation, Research Unit, Salem, Oregon, USA, 1998.

TRB (2000). Highway Capacity Manual. Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., U.S.A.

TRB. (2010). *HCM 2010: Highway Capacity Manual*. 5th Edition. Washington, D.C., Transportation Research Board - National Research Council.

VASCONCELOS, A. L. P. Avaliação do desempenho operacional de rotundas: Modelos e aplicações. 2014. 239 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil com área de concentração em urbanismo, ordenamento do território e transportes) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2014.

WADDELL, E. Evolution of Roudabout Technology: A History – Based Literature Rewiew. Transportation Planner Michigan Department of Transportation Michigan, 2000.

_____. Evolution Of roundabout technology: history-based literature review. In: Institute of Transportation Engineers 67th annual Meeting. 1997.

WANG, Y.; PREVEDOUROS, P. D. (1998) Comparison of INTEGRATION, TSIS/CORSIM, and WATSim in Replicating Volumes and Speeds on Three Small Networks. Transportation Research Record, n. 1644, p. 80-92.

PENSADOR. FRASES DE ALBERT EINSTEIN. DISPONÍVEL EM:
<https://www.pensador.com/frase/MzMyNA/>. ACESSO EM: 16 DE SETEMBRO DE 2021.

7. ANEXOS

ANEXO A – FOTOGRAFIAS DA ROTATÓRIA EM ESTUDO E LOCALIZAÇÃO DOS PONTOS PARA COLETA DE DADOS DA MATRIZ OD E BRECHA.





ANEXO B – MODELO DE FOLHA PARA CONTAGEM DE VEÍCULOS

COLETA DE VEÍCULOS

MATRIZ DA SEGUNDA FEIRA

SAÍDA 01

SAÍDA 01 – ENTRADA 01						
VEÍCULO	VEIC. PASSEIO	MOTOCICLETA	ÔNIBUS	VEIC. CO	VEÍC. SR	UCP
QUANT.						

SAÍDA 01 – ENTRADA 02						
VEÍCULO	VEIC. PASSEIO	MOTOCICLETA	ÔNIBUS	VEIC. CO	VEÍC. SR	UCP
QUANT.						

SAÍDA 01 – ENTRADA 03						
VEÍCULO	VEIC. PASSEIO	MOTOCICLETA	ÔNIBUS	VEIC. CO	VEÍC. SR	UCP
QUANT.						

SAÍDA 01 – ENTRADA 04						
VEÍCULO	VEIC. PASSEIO	MOTOCICLETA	ÔNIBUS	VEIC. CO	VEÍC. SR	UCP
QUANT.						

SAÍDA 01 – ENTRADA 05						
VEÍCULO	VEIC. PASSEIO	MOTOCICLETA	ÔNIBUS	VEIC. CO	VEÍC. SR	UCP
QUANT.						

SAÍDA 01 – ENTRADA 06						
VEÍCULO	VEIC. PASSEIO	MOTOCICLETA	ÔNIBUS	VEIC. CO	VEÍC. SR	UCP
QUANT.						

OBSERVAÇÕES						

ANEXO C – PARTE DOS RESULTADOS DE BRECHAS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA.

ID	Situação	Veículos Prioritários			Veículos Via Secundária			
		Líder (s)	Seguidor (s)	Intervalo/brecha (s)	Chegada (s)	Saída/rejeição (s)	Tempo de espera (s)	Faixa
E0	Rejeitado	3,57	7,18	3,61	5,21	7,18	1,98	Esquerda
D0	Rejeitado	3,57	7,18	3,61	1,23	7,18	5,95	Direita
E0	Rejeitado	7,18	8,7	1,51	5,21	8,7	3,49	Esquerda
D0	Rejeitado	7,18	8,7	1,51	1,23	8,7	7,46	Direita
D0	Aceito	8,7	17,01	8,31	1,23	10,04	8,81	Direita
E0	Aceito	8,7	17,01	8,31	5,21	11,37	6,17	Esquerda
D1	Rejeitado	8,7	17,01	8,31	15,57	17,01	1,43	Direita
D1	Aceito	17,01	21,31	4,31	15,57	19,67	4,1	Direita
D2	Rejeitado	21,31	23,9	2,58	22,13	23,9	1,77	Direita
D2	Aceito	23,9	32,4	8,51	22,13	26,01	3,88	Direita
D3	Rejeitado	23,9	32,4	8,51	30,51	32,4	1,89	Direita
D3	Aceito	32,4	44,17	11,77	30,51	35,21	4,7	Direita
E1	Rejeitado	32,4	44,17	11,77	43,82	44,17	0,36	Esquerda
D4	Rejeitado	32,4	44,17	11,77	43,46	44,17	0,71	Direita
E1	Aceito	44,17	51,07	6,9	43,82	45,09	1,28	Esquerda
D4	Aceito	44,17	51,07	6,9	43,46	45,74	2,28	Direita
D5	Rejeitado	44,17	51,07	6,9	49,75	51,07	1,32	Direita
D5	Aceito	51,07	56,51	5,44	49,75	53,25	3,49	Direita
E2	Rejeitado	59,45	62,19	2,74	60,03	62,19	2,16	Esquerda
D6	Rejeitado	59,45	62,19	2,74	59,8	62,19	2,4	Direita
E2	Rejeitado	62,19	63,69	1,5	60,03	63,69	3,66	Esquerda
D6	Rejeitado	62,19	63,69	1,5	59,8	63,69	3,89	Direita
E2	Aceito	63,69	75,97	12,28	60,03	65,63	5,6	Esquerda
D6	Aceito	63,69	75,97	12,28	59,8	66,05	6,26	Direita
D7	Rejeitado	75,97	81,62	5,65	80,63	81,62	0,99	Direita
E3	Aceito	81,62	97,39	15,77	82,31	82,66	0,36	Esquerda
D7	Aceito	81,62	97,39	15,77	80,63	83,11	2,48	Direita
D8	Rejeitado	81,62	97,39	15,77	97,12	97,39	0,28	Direita
E4	Rejeitado	97,39	99,93	2,53	98,59	99,93	1,34	Esquerda
D8	Rejeitado	97,39	99,93	2,53	97,12	99,93	2,81	Direita
E4	Aceito	99,93	107,24	7,32	98,59	101,92	3,34	Esquerda
D8	Aceito	99,93	107,24	7,32	97,12	102,29	5,17	Direita
D9	Rejeitado	99,93	107,24	7,32	106,71	107,24	0,53	Direita
E5	Rejeitado	107,24	110,8	3,56	109,2	110,8	1,6	Esquerda
D9	Rejeitado	107,24	110,8	3,56	106,71	110,8	4,09	Direita

CONTINUAÇÃO ANEXO C - PARTE DOS RESULTADOS DE BRECHAS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA.

ID	Situação	Veículos Prioritários			Veículo Via Secundária			
		Líder (s)	Seguidor (s)	Intervalo/brecha (s)	Chegada (s)	Saída/rejeição (s)	Tempo de espera (s)	Faixa
E5	Rejeitado	110,8	112,79	1,99	109,2	112,79	3,6	Esquerda
D9	Rejeitado	110,8	112,79	1,99	106,71	112,79	6,08	Direita
E5	Aceito	112,79	120,32	7,53	109,2	114,72	5,52	Esquerda
D9	Aceito	112,79	120,32	7,53	106,71	115,09	8,38	Direita
D10	Rejeitado	112,79	120,32	7,53	119,08	120,32	1,25	Direita
D10	Aceito	120,32	129,2	8,88	119,08	121,84	2,76	Direita
E6	Rejeitado	120,32	129,2	8,88	128,85	129,2	0,35	Esquerda
D11	Rejeitado	120,32	129,2	8,88	128,52	129,2	0,68	Direita
D11	Aceito	129,2	136,29	7,09	128,52	130,96	2,44	Direita
E6	Aceito	129,2	136,29	7,09	128,85	131,24	2,39	Esquerda
D12	Rejeitado	129,2	136,29	7,09	134,78	136,29	1,51	Direita
D12	Rejeitado	136,29	138,3	2,01	134,78	138,3	3,52	Direita
D12	Aceito	138,3	142,04	3,74	134,78	139,62	4,84	Direita
D13	Rejeitado	138,3	142,04	3,74	140,99	142,04	1,05	Direita
D13	Rejeitado	142,04	143,23	1,19	140,99	143,23	2,24	Direita
D13	Aceito	143,23	155,39	12,15	140,99	145,09	4,1	Direita
D14	Rejeitado	143,23	155,39	12,15	154,69	155,39	0,7	Direita
E7	Rejeitado	155,39	160,72	5,33	156,14	160,72	4,58	Esquerda
D14	Rejeitado	155,39	160,72	5,33	154,69	160,72	6,04	Direita
D14	Aceito	160,72	165,49	4,77	154,69	163,54	8,86	Direita
E7	Aceito	160,72	165,49	4,77	156,14	164,08	7,94	Esquerda
E8	Rejeitado	165,49	166,52	1,02	165,99	166,52	0,52	Esquerda
E8	Aceito	166,52	173,9	7,38	165,99	167,19	1,2	Esquerda
D15	Aceito	166,52	173,9	7,38	167,81	169,56	1,75	Direita
D16	Rejeitado	166,52	173,9	7,38	173,09	173,9	0,81	Direita
E9	Rejeitado	173,9	177,57	3,67	176,17	177,57	1,4	Esquerda
D16	Rejeitado	173,9	177,57	3,67	173,09	177,57	4,48	Direita
E9	Aceito	177,57	182,35	4,78	176,17	178,5	2,33	Esquerda
D16	Rejeitado	177,57	182,35	4,78	173,09	182,35	9,25	Direita
D16	Rejeitado	182,35	183,86	1,51	173,09	183,86	10,77	Direita
D16	Rejeitado	183,86	185,68	1,82	173,09	185,68	12,59	Direita
D16	Aceito	185,68	191,03	5,36	173,09	186,56	13,46	Direita
E10	Rejeitado	185,68	191,03	5,36	190,7	191,03	0,33	Esquerda
D17	Rejeitado	185,68	191,03	5,36	190,05	191,03	0,99	Direita
E10	Aceito	191,03	212,5	21,47	190,7	193,05	2,35	Esquerda
D17	Aceito	191,03	212,5	21,47	190,05	193,34	3,29	Direita
D18	Rejeitado	212,5	214,42	1,92	213,22	214,42	1,2	Direita
E11	Aceito	214,42	216,73	2,31	215,41	216,13	0,72	Esquerda

ANEXO D – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DE BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE RAFF PARA FAIXA DIREITA

Gap Crítico - Faixa direita				
N	Aceitas		Rejeitadas	
	t (s)	freq.	t (s)	1-freq.
1	2,29	0,006	1,38	0,994
2	2,35	0,011	1,44	0,989
3	2,58	0,017	1,61	0,983
4	2,86	0,023	1,62	0,977
5	3,2	0,029	1,62	0,971
6	3,39	0,034	1,73	0,966
7	3,47	0,040	1,75	0,960
8	3,7	0,046	1,76	0,954
9	3,73	0,052	1,78	0,948
10	3,74	0,057	1,82	0,943
11	3,82	0,063	1,84	0,937
12	3,97	0,069	1,85	0,931
13	3,98	0,075	1,92	0,925
14	4,24	0,080	2,3	0,920
15	4,29	0,086	2,31	0,914
16	4,31	0,092	2,41	0,908
17	4,36	0,098	2,58	0,902
18	4,37	0,103	2,7	0,897
19	4,4	0,109	2,74	0,891
20	4,4	0,115	2,74	0,885
21	4,43	0,121	2,77	0,879
22	4,44	0,126	2,81	0,874
23	4,47	0,132	2,81	0,868
24	4,48	0,138	2,85	0,862
25	4,52	0,144	2,89	0,856
26	4,66	0,149	2,95	0,851
27	4,72	0,155	2,98	0,845
28	4,74	0,161	3,06	0,839
29	4,77	0,167	3,09	0,833
30	4,87	0,172	3,1	0,828
31	4,91	0,178	3,11	0,822
32	4,92	0,184	3,17	0,816
33	4,94	0,190	3,22	0,810
34	5,1	0,195	3,24	0,805
35	5,15	0,201	3,24	0,799
36	5,15	0,207	3,38	0,793
37	5,17	0,213	3,39	0,787
38	5,28	0,218	3,39	0,782

Gap Crítico - Faixa direita				
N	Aceitas		Rejeitadas	
	t (s)	freq.	t (s)	1-freq.
39	5,32	0,224	3,47	0,776
40	5,33	0,230	3,51	0,770
41	5,35	0,236	3,52	0,764
42	5,36	0,241	3,59	0,759
43	5,4	0,247	3,61	0,753
44	5,4	0,253	3,74	0,747
45	5,42	0,259	3,88	0,741
46	5,42	0,264	4,05	0,736
47	5,44	0,270	4,05	0,730
48	5,46	0,276	4,23	0,724
49	5,57	0,282	4,29	0,718
50	5,7	0,287	4,36	0,713
51	5,74	0,293	4,39	0,707
52	5,76	0,299	4,4	0,701
53	5,8	0,305	4,4	0,695
54	5,86	0,310	4,43	0,690
55	5,86	0,316	4,44	0,684
56	5,88	0,322	4,48	0,678
57	5,94	0,328	4,52	0,672
58	5,96	0,333	4,6	0,667
59	5,98	0,339	4,66	0,661
60	5,98	0,345	4,66	0,655
61	6	0,351	4,74	0,649
62	6,03	0,356	4,87	0,644
63	6,04	0,362	4,92	0,638
64	6,05	0,368	4,94	0,632
65	6,06	0,374	5,08	0,626
66	6,15	0,379	5,15	0,621
67	6,26	0,385	5,15	0,615
68	6,33	0,391	5,31	0,609
69	6,38	0,397	5,35	0,603
70	6,45	0,402	5,36	0,598
71	6,47	0,408	5,4	0,592
72	6,48	0,414	5,4	0,586
73	6,6	0,420	5,42	0,580
74	6,62	0,425	5,46	0,575
75	6,66	0,431	5,65	0,569
76	6,69	0,437	5,7	0,563

CONTINUAÇÃO ANEXO D - DADOS PARA DETERMINAÇÃO DE BRECHA CRÍTICA
PELO MÉTODO DE RAFF PARA FAIXA DIREITA

Gap Crítico - Faixa direita				
N	Aceitas		Rejeitadas	
	t (s)	freq.	t (s)	1-freq.
77	6,82	0,443	5,88	0,557
78	6,84	0,448	5,96	0,552
79	6,9	0,454	5,98	0,546
80	6,97	0,460	5,98	0,540
81	7,03	0,466	6,03	0,534
82	7,08	0,471	6,04	0,529
83	7,09	0,477	6,05	0,523
84	7,16	0,483	6,16	0,517
85	7,22	0,489	6,33	0,511
86	7,32	0,494	6,45	0,506
87	7,33	0,500	6,48	0,500
88	7,38	0,506	6,6	0,494
89	7,4	0,511	6,62	0,489
90	7,48	0,517	6,72	0,483
91	7,49	0,523	6,82	0,477
92	7,51	0,529	6,9	0,471
93	7,52	0,534	7,03	0,466
94	7,53	0,540	7,03	0,460
95	7,54	0,546	7,09	0,454
96	7,58	0,552	7,16	0,448
97	7,58	0,557	7,22	0,443
98	7,6	0,563	7,32	0,437
99	7,66	0,569	7,32	0,431
100	7,93	0,575	7,38	0,425
101	7,94	0,580	7,49	0,420
102	8	0,586	7,51	0,414
103	8,01	0,592	7,52	0,408
104	8,02	0,598	7,53	0,402
105	8,14	0,603	7,57	0,397
106	8,31	0,609	7,58	0,391
107	8,38	0,615	7,6	0,385
108	8,45	0,621	7,79	0,379
109	8,45	0,626	7,94	0,374
110	8,51	0,632	8	0,368
111	8,56	0,638	8,14	0,362
112	8,57	0,644	8,16	0,356
113	8,82	0,649	8,31	0,351
114	8,88	0,655	8,38	0,345
Gap Crítico - Faixa direita				

N	Aceitas		Rejeitadas	
	t (s)	freq.	t (s)	1-freq.
115	8,94	0,661	8,45	0,339
116	9,05	0,667	8,45	0,333
117	9,24	0,672	8,51	0,328
118	9,28	0,678	8,56	0,322
119	9,37	0,684	8,57	0,316
120	9,39	0,690	8,88	0,310
121	9,42	0,695	9,24	0,305
122	9,79	0,701	9,37	0,299
123	9,81	0,707	9,39	0,293
124	9,85	0,713	9,42	0,287
125	9,92	0,718	9,76	0,282
126	10,03	0,724	9,81	0,276
127	10,06	0,730	9,87	0,270
128	10,12	0,736	10,06	0,264
129	10,16	0,741	10,12	0,259
130	10,23	0,747	10,16	0,253
131	10,24	0,753	10,66	0,247
132	10,55	0,759	10,92	0,241
133	10,73	0,764	11,04	0,236
134	11,04	0,770	11,2	0,230
135	11,18	0,776	11,23	0,224
136	11,23	0,782	11,44	0,218
137	11,24	0,787	11,5	0,213
138	11,32	0,793	11,52	0,207
139	11,44	0,799	11,67	0,201
140	11,5	0,805	11,68	0,195
141	11,52	0,810	11,73	0,190
142	11,68	0,816	11,77	0,184
143	11,69	0,822	11,78	0,178
144	11,72	0,828	12,15	0,172
145	11,73	0,833	12,6	0,167
146	11,73	0,839	13,46	0,161
147	11,77	0,845	13,9	0,155
148	11,78	0,851	14,31	0,149
149	12,04	0,856	14,58	0,144
150	12,15	0,862	14,65	0,138
151	12,28	0,868	14,66	0,132
152	12,6	0,874	15,25	0,126
153	12,92	0,879	15,77	0,121
154	12,98	0,885	16,25	0,115

ANEXO E – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE WU – FAIXA DIREITA

Nº	Gap (s)	Acei/ rej.	Nr	Na	Fr	Fa	Ftc	Ptc	Tdj (s)	Ptc*tdj
1	1,38	r	1	0	0,0057	0,0000	0,0000		0,69	0,0000
2	1,44	r	2	0	0,0115	0,0000	0,0000	0,000	1,41	0,0000
3	1,61	r	3	0	0,0172	0,0000	0,0000	0,000	1,525	0,0000
4	1,62	r	4	0	0,0230	0,0000	0,0000	0,000	1,615	0,0000
5	1,62	r	5	0	0,0287	0,0000	0,0000	0,000	1,62	0,0000
6	1,73	r	6	0	0,0345	0,0000	0,0000	0,000	1,675	0,0000
7	1,75	r	7	0	0,0402	0,0000	0,0000	0,000	1,74	0,0000
8	1,76	r	8	0	0,0460	0,0000	0,0000	0,000	1,755	0,0000
9	1,78	r	9	0	0,0517	0,0000	0,0000	0,000	1,77	0,0000
10	1,82	r	10	0	0,0575	0,0000	0,0000	0,000	1,8	0,0000
11	1,84	r	11	0	0,0632	0,0000	0,0000	0,000	1,83	0,0000
12	1,85	r	12	0	0,0690	0,0000	0,0000	0,000	1,845	0,0000
13	1,92	r	13	0	0,0747	0,0000	0,0000	0,000	1,885	0,0000
14	2,29	a	13	1	0,0747	0,0057	0,0062	0,006	2,105	0,0130
15	2,3	r	14	1	0,0805	0,0057	0,0062	0,000	2,295	0,0001
16	2,31	r	15	1	0,0862	0,0057	0,0063	0,000	2,305	0,0001
17	2,35	a	15	2	0,0862	0,0115	0,0124	0,006	2,33	0,0144
18	2,41	r	16	2	0,0920	0,0115	0,0125	0,000	2,38	0,0002
19	2,58	r	17	2	0,0977	0,0115	0,0126	0,000	2,495	0,0002
20	2,58	a	17	3	0,0977	0,0172	0,0188	0,006	2,58	0,0159
21	2,7	r	18	3	0,1034	0,0172	0,0189	0,000	2,64	0,0003
22	2,74	r	19	3	0,1092	0,0172	0,0190	0,000	2,72	0,0003
23	2,74	r	20	3	0,1149	0,0172	0,0191	0,000	2,74	0,0003
24	2,77	r	21	3	0,1207	0,0172	0,0192	0,000	2,755	0,0003
25	2,81	r	22	3	0,1264	0,0172	0,0194	0,000	2,79	0,0003
26	2,81	r	23	3	0,1322	0,0172	0,0195	0,000	2,81	0,0004
27	2,85	r	24	3	0,1379	0,0172	0,0196	0,000	2,83	0,0004
28	2,86	a	24	4	0,1379	0,0230	0,0260	0,006	2,855	0,0182
29	2,89	r	25	4	0,1437	0,0230	0,0261	0,000	2,875	0,0005
30	2,95	r	26	4	0,1494	0,0230	0,0263	0,000	2,92	0,0005
31	2,98	r	27	4	0,1552	0,0230	0,0265	0,000	2,965	0,0005
32	3,06	r	28	4	0,1609	0,0230	0,0267	0,000	3,02	0,0005
33	3,09	r	29	4	0,1667	0,0230	0,0268	0,000	3,075	0,0006
34	3,1	r	30	4	0,1724	0,0230	0,0270	0,000	3,095	0,0006
35	3,11	r	31	4	0,1782	0,0230	0,0272	0,000	3,105	0,0006
36	3,17	r	32	4	0,1839	0,0230	0,0274	0,000	3,14	0,0006
37	3,2	a	32	5	0,1839	0,0287	0,0340	0,007	3,185	0,0211
38	3,22	r	33	5	0,1897	0,0287	0,0342	0,000	3,21	0,0007

CONTINUAÇÃO ANEXO E - DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA
PELO MÉTODO DE WU – FAIXA DIREITA

Nº	Gap (s)	Acei/ rej.	Nr	Na	Fr	Fa	Ftc	Ptc	Tdj (s)	Ptc*tdj
39	3,24	r	34	5	0,1954	0,0287	0,0345	0,000	3,23	0,0008
40	3,24	r	35	5	0,2011	0,0287	0,0347	0,000	3,24	0,0008
41	3,38	r	36	5	0,2069	0,0287	0,0350	0,000	3,31	0,0008
42	3,39	r	37	5	0,2126	0,0287	0,0352	0,000	3,385	0,0008
43	3,39	r	38	5	0,2184	0,0287	0,0355	0,000	3,39	0,0008
44	3,39	a	38	6	0,2184	0,0345	0,0423	0,007	3,39	0,0230
45	3,47	r	39	6	0,2241	0,0345	0,0426	0,000	3,43	0,0010
46	3,47	a	39	7	0,2241	0,0402	0,0493	0,007	3,47	0,0234
47	3,51	r	40	7	0,2299	0,0402	0,0496	0,000	3,49	0,0012
48	3,52	r	41	7	0,2356	0,0402	0,0500	0,000	3,515	0,0012
49	3,59	r	42	7	0,2414	0,0402	0,0504	0,000	3,555	0,0013
50	3,61	r	43	7	0,2471	0,0402	0,0507	0,000	3,6	0,0013
51	3,7	a	43	8	0,2471	0,0460	0,0576	0,007	3,655	0,0250
52	3,73	a	43	9	0,2471	0,0517	0,0643	0,007	3,715	0,0250
53	3,74	r	44	9	0,2529	0,0517	0,0647	0,000	3,735	0,0017
54	3,74	a	44	10	0,2529	0,0575	0,0714	0,007	3,74	0,0250
55	3,82	a	44	11	0,2529	0,0632	0,0780	0,007	3,78	0,0249
56	3,88	r	45	11	0,2586	0,0632	0,0786	0,001	3,85	0,0021
57	3,97	a	45	12	0,2586	0,0690	0,0851	0,007	3,925	0,0256
58	3,98	a	45	13	0,2586	0,0747	0,0915	0,006	3,975	0,0256
59	4,05	r	46	13	0,2644	0,0747	0,0922	0,001	4,015	0,0026
60	4,05	r	47	13	0,2701	0,0747	0,0929	0,001	4,05	0,0027
61	4,23	r	48	13	0,2759	0,0747	0,0935	0,001	4,14	0,0028
62	4,24	a	48	14	0,2759	0,0805	0,1000	0,006	4,235	0,0274
63	4,29	r	49	14	0,2816	0,0805	0,1007	0,001	4,265	0,0031
64	4,29	a	49	15	0,2816	0,0862	0,1071	0,006	4,29	0,0276
65	4,31	a	49	16	0,2816	0,0920	0,1135	0,006	4,3	0,0272
66	4,36	r	50	16	0,2874	0,0920	0,1143	0,001	4,335	0,0035
67	4,36	a	50	17	0,2874	0,0977	0,1206	0,006	4,36	0,0274
68	4,37	a	50	18	0,2874	0,1034	0,1268	0,006	4,365	0,0270
69	4,39	r	51	18	0,2931	0,1034	0,1277	0,001	4,38	0,0039
70	4,4	r	52	18	0,2989	0,1034	0,1286	0,001	4,395	0,0040
71	4,4	r	53	18	0,3046	0,1034	0,1295	0,001	4,4	0,0041
72	4,4	a	53	19	0,3046	0,1092	0,1357	0,006	4,4	0,0274
73	4,4	a	53	20	0,3046	0,1149	0,1418	0,006	4,4	0,0270
74	4,43	r	54	20	0,3103	0,1149	0,1429	0,001	4,415	0,0045
75	4,44	r	55	20	0,3161	0,1149	0,1439	0,001	4,435	0,0046
76	4,44	a	55	21	0,3161	0,1207	0,1500	0,006	4,44	0,0272
77	4,47	a	55	22	0,3161	0,1264	0,1560	0,006	4,455	0,0269
78	4,48	r	56	22	0,3218	0,1264	0,1571	0,001	4,475	0,0050

ANEXO F – DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE RAFF – FAIXA ESQUERDA.

Gap Crítico - Faixa esquerda				
N	Aceitas		Rejeitadas	
	t (s)	freq.	t (s)	1-freq.
1	2,21	0,014	1,02	0,986
2	2,29	0,028	1,06	0,972
3	3,05	0,042	1,41	0,958
4	3,22	0,056	1,44	0,944
5	3,39	0,069	1,62	0,931
6	3,52	0,083	1,62	0,917
7	3,73	0,097	1,75	0,903
8	3,79	0,111	2	0,889
9	3,82	0,125	2,05	0,875
10	3,97	0,139	2,16	0,861
11	3,98	0,153	2,3	0,847
12	3,98	0,167	2,33	0,833
13	4,16	0,181	2,34	0,819
14	4,39	0,194	2,35	0,806
15	4,4	0,208	2,39	0,792
16	4,48	0,222	2,41	0,778
17	4,48	0,236	2,53	0,764
18	4,66	0,250	2,54	0,750
19	4,74	0,264	2,59	0,736
20	4,77	0,278	2,61	0,722
21	4,78	0,292	2,7	0,708
22	4,92	0,306	2,74	0,694
23	5,33	0,319	2,81	0,681
24	5,4	0,333	2,87	0,667
25	5,74	0,347	3,09	0,653
26	5,76	0,361	3,11	0,639
27	5,88	0,375	3,24	0,625
28	6	0,389	3,35	0,611
29	6,03	0,403	3,38	0,597
30	6,04	0,417	3,39	0,583
31	6,05	0,431	3,39	0,569
32	6,84	0,444	3,56	0,556
33	6,87	0,458	3,59	0,542
34	6,9	0,472	3,61	0,528
35	7,09	0,486	3,67	0,514
36	7,16	0,500	4,37	0,500
37	7,32	0,514	4,39	0,486

Gap Crítico - Faixa esquerda				
N	Aceitas		Rejeitadas	
	t (s)	freq.	t (s)	1-freq.
38	7,38	0,528	4,43	0,472
39	7,49	0,542	4,92	0,458
40	7,53	0,556	5,08	0,444
41	7,54	0,569	5,15	0,431
42	7,6	0,583	5,31	0,417
43	7,65	0,597	5,33	0,403
44	7,82	0,611	5,36	0,389
45	7,93	0,625	5,4	0,375
46	8,01	0,639	5,57	0,361
47	8,31	0,653	5,74	0,347
48	9,28	0,667	5,96	0,333
49	9,37	0,681	6,11	0,319
50	9,42	0,694	6,62	0,306
51	9,81	0,708	6,66	0,292
52	9,87	0,722	7,33	0,278
53	10,12	0,736	7,58	0,264
54	10,65	0,750	8,01	0,250
55	11,04	0,764	8,38	0,236
56	11,2	0,778	8,45	0,222
57	11,24	0,792	8,56	0,208
58	11,72	0,806	8,87	0,194
59	12,28	0,819	8,88	0,181
60	12,6	0,833	8,94	0,167
61	13,07	0,847	9,87	0,153
62	13,9	0,861	10,06	0,139
63	14,31	0,875	10,16	0,125
64	14,65	0,889	11,04	0,111
65	16,57	0,903	11,23	0,097
66	17,18	0,917	11,77	0,083
67	17,33	0,931	12,04	0,069
68	18,24	0,944	12,04	0,056
69	20,74	0,958	15,25	0,042
70	21,47	0,972	18,47	0,028
71	22,52	0,986	27,29	0,014
72	28,22	1,000	40,34	0,000

ANEXO G – PARTE DOS DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA
PELO MÉTODO DE WU – FAIXA ESQUERDA

N	Gap (s)	Ace/rej	Nr	Na	Fr	Fa	Ftc	Ptc	Tdj (s)	Ptc.tdj
8	1,02	r	1	0	0,014	0,000	0,000		0,51	0,000
66	1,06	r	2	0	0,028	0,000	0,000	0,0000	1,04	0,000
12	1,41	r	3	0	0,042	0,000	0,000	0,0000	1,235	0,000
70	1,44	r	4	0	0,056	0,000	0,000	0,0000	1,425	0,000
15	1,62	r	5	0	0,069	0,000	0,000	0,0000	1,53	0,000
63	1,62	r	6	0	0,083	0,000	0,000	0,0000	1,62	0,000
47	1,75	r	7	0	0,097	0,000	0,000	0,0000	1,685	0,000
37	2	r	8	0	0,111	0,000	0,000	0,0000	1,875	0,000
52	2,05	r	9	0	0,125	0,000	0,000	0,0000	2,025	0,000
30	2,16	r	10	0	0,139	0,000	0,000	0,0000	2,105	0,000
110	2,21	a	10	1	0,139	0,014	0,016	0,0159	2,185	0,035
122	2,29	a	10	2	0,139	0,028	0,031	0,0154	2,25	0,035
34	2,3	r	11	2	0,153	0,028	0,032	0,0005	2,295	0,001
55	2,33	r	12	2	0,167	0,028	0,032	0,0005	2,315	0,001
16	2,34	r	13	2	0,181	0,028	0,033	0,0005	2,335	0,001
67	2,35	r	14	2	0,194	0,028	0,033	0,0005	2,345	0,001
65	2,39	r	15	2	0,208	0,028	0,034	0,0006	2,37	0,001
45	2,41	r	16	2	0,222	0,028	0,034	0,0006	2,4	0,001
4	2,53	r	17	2	0,236	0,028	0,035	0,0006	2,47	0,001
39	2,54	r	18	2	0,250	0,028	0,036	0,0006	2,535	0,002
41	2,59	r	19	2	0,264	0,028	0,036	0,0006	2,565	0,002
68	2,61	r	20	2	0,278	0,028	0,037	0,0007	2,6	0,002
53	2,7	r	21	2	0,292	0,028	0,038	0,0007	2,655	0,002
3	2,74	r	22	2	0,306	0,028	0,038	0,0007	2,72	0,002
28	2,81	r	23	2	0,319	0,028	0,039	0,0008	2,775	0,002
17	2,87	r	24	2	0,333	0,028	0,040	0,0008	2,84	0,002
134	3,05	a	24	3	0,333	0,042	0,059	0,0188	2,96	0,056
13	3,09	r	25	3	0,347	0,042	0,060	0,0012	3,07	0,004
27	3,11	r	26	3	0,361	0,042	0,061	0,0012	3,1	0,004
140	3,22	a	26	4	0,361	0,056	0,080	0,0188	3,165	0,059
58	3,24	r	27	4	0,375	0,056	0,082	0,0016	3,23	0,005
71	3,35	r	28	4	0,389	0,056	0,083	0,0017	3,295	0,006
56	3,38	r	29	4	0,403	0,056	0,085	0,0018	3,365	0,006
26	3,39	r	30	4	0,417	0,056	0,087	0,0019	3,385	0,006
62	3,39	r	31	4	0,431	0,056	0,089	0,0019	3,39	0,007
135	3,39	a	31	5	0,431	0,069	0,109	0,0198	3,39	0,067
83	3,52	a	31	6	0,431	0,083	0,128	0,0190	3,455	0,066

CONTINUAÇÃO ANEXO G - PARTE DOS DADOS PARA DETERMINAÇÃO DA BRECHA CRÍTICA PELO MÉTODO DE WU – FAIXA ESQUERDA

N	Gap (s)	Ace/rej.	Nr	Na	Fr	Fa	Ftc	Ptc	Tdj (s)	Ptc.tdj
5	3,56	r	32	6	0,444	0,083	0,130	0,0028	3,54	0,010
44	3,59	r	33	6	0,458	0,083	0,133	0,0029	3,575	0,010
1	3,61	r	34	6	0,472	0,083	0,136	0,0030	3,6	0,011
9	3,67	r	35	6	0,486	0,083	0,140	0,0032	3,64	0,012
106	3,73	a	35	7	0,486	0,097	0,159	0,0196	3,7	0,072
103	3,79	a	35	8	0,486	0,111	0,178	0,0187	3,76	0,070
102	3,82	a	35	9	0,486	0,125	0,196	0,0179	3,805	0,068
99	3,97	a	35	10	0,486	0,139	0,213	0,0171	3,895	0,067
96	3,98	a	35	11	0,486	0,153	0,229	0,0164	3,975	0,065
124	3,98	a	35	12	0,486	0,167	0,245	0,0157	3,98	0,063
144	4,16	a	35	13	0,486	0,181	0,260	0,0151	4,07	0,061
38	4,37	r	36	13	0,500	0,181	0,265	0,0053	4,265	0,023
64	4,39	r	37	13	0,514	0,181	0,271	0,0055	4,38	0,024
131	4,39	a	37	14	0,514	0,194	0,286	0,0149	4,39	0,065
90	4,4	a	37	15	0,514	0,208	0,300	0,0143	4,395	0,063
42	4,43	r	38	15	0,528	0,208	0,306	0,0061	4,415	0,027
91	4,48	a	38	16	0,528	0,222	0,320	0,0139	4,455	0,062
142	4,48	a	38	17	0,528	0,236	0,333	0,0133	4,48	0,060
93	4,66	a	38	18	0,528	0,250	0,346	0,0128	4,57	0,059
105	4,74	a	38	19	0,528	0,264	0,358	0,0123	4,7	0,058
79	4,77	a	38	20	0,528	0,278	0,370	0,0119	4,755	0,056
81	4,78	a	38	21	0,528	0,292	0,382	0,0114	4,775	0,055
14	4,92	r	39	21	0,542	0,292	0,389	0,0071	4,85	0,034
85	4,92	a	39	22	0,542	0,306	0,400	0,0111	4,92	0,055
61	5,08	r	40	22	0,556	0,306	0,407	0,0074	5	0,037
49	5,15	r	41	22	0,569	0,306	0,415	0,0077	5,115	0,039
24	5,31	r	42	22	0,583	0,306	0,423	0,0080	5,23	0,042
7	5,33	r	43	22	0,597	0,306	0,431	0,0083	5,32	0,044
114	5,33	a	43	23	0,597	0,319	0,442	0,0109	5,33	0,058
10	5,36	r	44	23	0,611	0,319	0,451	0,0087	5,345	0,046
22	5,4	r	45	23	0,625	0,319	0,460	0,0090	5,38	0,049
120	5,4	a	45	24	0,625	0,333	0,471	0,0106	5,4	0,057
60	5,57	r	46	24	0,639	0,333	0,480	0,0094	5,485	0,052
59	5,74	r	47	24	0,653	0,333	0,490	0,0098	5,655	0,055
137	5,74	a	47	25	0,653	0,347	0,500	0,0102	5,74	0,059
104	5,76	a	47	26	0,653	0,361	0,510	0,0098	5,75	0,056
87	5,88	a	47	27	0,653	0,375	0,519	0,0094	5,82	0,055
54	5,96	r	48	27	0,667	0,375	0,529	0,0102	5,92	0,060
88	6	a	48	28	0,667	0,389	0,538	0,0090	5,98	0,054