



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E  
GESTÃO TERRITORIAL

Gustavo Benetti

**Uma proposta para avaliar nível de serviço e emissões veiculares em rotatórias  
aplicando simulação computacional**

Florianópolis

2024

Gustavo Benetti

**Uma proposta para avaliar nível de serviço e emissões veiculares em rotatórias  
aplicando simulação computacional**

Dissertação submetida ao Programa de pós-graduação  
em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da  
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção  
do título de mestre em Engenharia de Transportes  
Orientador: Prof. Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

BENETTI, Gustavo

Uma proposta para avaliar nível de serviço e emissões  
veiculares em rotatórias aplicando simulação computacional /  
Gustavo BENETTI ; orientador, Ricardo Dávalos, 2024.  
99 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial,  
Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2.  
Engenharia de tráfego. 3. Simulação computacional. 4.  
Emissão de poluentes. 5. Nível de serviço viário. I.  
Dávalos, Ricardo . II. Universidade Federal de Santa  
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de  
Transportes e Gestão Territorial. III. Título.

Gustavo Benetti

**Uma proposta para avaliar nível de serviço e emissões veiculares em rotatórias  
aplicando simulação computacional**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca  
examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof.(a) Joao Carlos Souza, Dr.(a)

Instituição UFSC

Prof.(a) Arnaldo Debatin Neto, Dr.(a)

Instituição UFSC

Prof.(a) Oscar C. López, Dr.(a)

Instituição UFSC

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi  
julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia de Transportes e Gestão  
Territorial.

---

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof.(a) Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.(a)

Orientador(a)

Florianópolis SC, 2024.

Dedico este trabalho à minha família.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço ao meu orientador, aos professores e equipe do PPGTG pelo apoio nessa caminhada. Como também aos meus pais e irmãos. Pelo apoio significativo da bolsa da CAPES e a UFSC pela oportunidade de ampliar as minhas visões sistêmicas a respeito da cultura, sociedade e ciência.

“Predição é muito difícil, especialmente se for sobre o futuro.” (Bohr, 1910)

## RESUMO

As rotatórias são recursos utilizados por gestores para apoiar a mobilidade e o controle de tráfego conflitante, operando conforme o fluxo de veículos que chegam e são atendidos em um nível de serviço. Assim, falhas são comuns nesses sistemas, principalmente devido ao crescimento no número de veículos de maneira não prevista, ocasionando congestionamentos que afetam a mobilidade urbana com o aumento de filas. Outro problema, que surge do aumento no número da frota, é a consequente emissão de poluentes que conforme os períodos de aceleração e frenagem oriundos da formação de filas, ficará maior. Para lidar com esses problemas, a utilização de dados provenientes de sistemas de monitoramento de tráfego e modelos matemáticos pode auxiliar gestores na avaliação de questões relacionadas à mobilidade e ao meio ambiente. Um exemplo é o uso de técnicas de simulação estocástica, como o Método de Simulação Monte Carlo via Cadeias de Markov (Monte Carlo Markov Chain Method - MCMC), que serve para parametrizar amostras de dados, eliminando discrepâncias. Aliado a ferramentas estatísticas existem programas que podem ser desenvolvidos em linguagens livres orientados a contagem veicular e estimação de poluentes emitidos por veículos automotores, como o COPERT (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport). Este trabalho tem como objetivo propor um sistema para apoiar a avaliação do nível de serviço e das emissões veiculares em rotatórias, utilizando desenvolvimento de um contador de veículos em Python, análise viária pelo método DNIT (2006), simulação computacional embasado nos princípios do MCMC e avaliação da carga poluidora pelo COPERT. Aplicou-se esta proposta numa rotatória com grande demanda, em uma cidade média em crescimento acelerado, e constatou-se que a mesma apresenta falhas no controle de tráfego de veículos com nível de serviço igual a E. Ocasionalmente a emissão dos poluentes de CO<sub>2</sub> representando cerca de 91,72% e CO com 8,02% mais emitidos, originados principalmente de veículos de uso individual: automóveis e motocicletas. Redimensionando e simulando a frota para uma nova taxa de ônibus, com possibilidade de redução dos veículos de uso individual, obteve-se uma redução do nível de serviço de E para A e mitigação na taxa dos níveis de CO<sub>2</sub> e CO em 12,51% e 24,75%, respectivamente. A adoção de sistemas de corredores de ônibus, veículos menos poluidores e melhor uso da infraestrutura urbana sugerem possibilidades que beneficiam a mobilidade e o meio ambiente.

**Palavras-chave:** Rotatórias, Simulação Computacional, Sistema de Contagem Veicular, Emissão de Poluentes.

## ABSTRACT

Roundabouts are resources used by managers to support mobility and conflicting traffic control, operating according to the flow of vehicles that arrive and are served at a service level. Therefore, failures are common in these systems, mainly due to the unforeseen growth in the number of vehicles, causing congestion that affects urban mobility with an increase in queues. Another problem, which arises from the increase in the number of the fleet, is the consequent emission of pollutants which, depending on the periods of acceleration and braking resulting from the formation of queues, will become greater. To deal with these problems, the use of data from traffic monitoring systems and mathematical models can help managers in evaluating issues related to mobility and the environment. One example is the use of stochastic simulation techniques, such as the Monte Carlo Simulation Method via Markov Chains (Monte Carlo Markov Chain Method - MCMC), which serves to parameterize data samples, eliminating discrepancies. Combined with statistical tools, there are programs that can be developed in free languages aimed at vehicle counting and estimation of pollutants emitted by motor vehicles, such as COPERT (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport). This work aims to propose a system to support the assessment of the level of service and vehicle emissions at roundabouts, using the development of a vehicle counter in Python, road analysis using the DNIT method (2006), computer simulation based on the principles of MCMC and assessment of the pollution load by COPERT. This proposal was applied to a roundabout with high demand, in a medium-sized city experiencing rapid growth, and it was found that it presents flaws in vehicle traffic control with a service level equal to E. Causing the emission of CO<sub>2</sub> pollutants representing around 91.72% and CO with 8.02% more emitted, mainly originating from vehicles for individual use: cars and motorcycles. By resizing and simulating the fleet for a new bus rate, with the possibility of reducing vehicles for individual use, a reduction in the level of service from E to A was obtained and a mitigation in the rate of CO<sub>2</sub> and CO levels by 12.51% and 24.75%, respectively. The adoption of bus lane systems, less polluting vehicles and better use of urban infrastructure suggest possibilities that benefit mobility and the environment.

**Keywords:** Roundabouts, Computer Simulation, Vehicle Counting System, Pollutant Emissions.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sinop MT .....	15
Figura 2 – Relação de ônibus por carro em cidades .....	27
Figura 3 – Número de ônibus por mil habitantes em cidades .....	27
Figura 4 – Modelo de fluxo de tráfego em UCP .....	29
Figura 5 – Padrão de uma rotatória .....	31
Figura 6 – Classes e objetos POO .....	33
Figura 7 – Etapas YOLO .....	35
Figura 8 – Processo de classificação de YOLO .....	35
Figura 9 – Bounding Box .....	36
Figura 10 – Oclusão veicular .....	36
Figura 11 – Padrão de uma rotatória .....	38
Figura 12 – Fluxo de pedestres .....	40
Figura 13 – Tempo de espera .....	41
Figura 14 – Generalização para o Método de Monte Carlo .....	48
Figura 15 – Etapas metodológicas para estudo de caso .....	56
Figura 16 – Delimitação da área .....	58
Figura 17 – Proposta do Estudo .....	60
Figura 18 – Padrões de Origem e Destino .....	63
Figura 19 – Contagem sendo executada .....	64
Figura 20 – Modelo do contador desenvolvido .....	65
Figura 21 – Incidência de veículos na via .....	68
Figura 22 – Capacidade viária DNIT .....	68
Figura 23 – Convergência da distribuição de chegada de veículos pela via .....	70
Figura 24 – Processo implementado para o MCMC .....	71
Figura 25 – Distribuição amostral extraída .....	72
Figura 26 – Distribuição Posterior .....	73
Figura 27 – Gráfico das iterações geradas por distribuição .....	74
Figura 28 – Histograma das distribuições .....	75
Figura 29 – Gráfico de tendência para o desvio padrão da distribuição beta .....	76
Figura 30 – Gráfico de tendência para o desvio padrão da distribuição normal .....	76

Figura 31 – Distribuições amostrais .....	77
Figura 32 – Distribuição acumulada Beta .....	78
Figura 33 – Distribuição acumulada Gama .....	79
Figura 34 – Distribuição acumulada Normal .....	79
Figura 35 – Taxa de poluição analisada .....	83
Figura 36 – Variação no tempo de espera pelo aumento no número de ônibus .....	85
Figura 37 – Novo MCMC para o aumento no número de ônibus .....	87

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 – Características da mobilidade urbana em megacidades do Brasil.....	26
---	----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dissertações similares PPGTG .....	21
Tabela 2 – Fatores de equivalência em unidades de carros de passeio (UCP).....	39
Tabela 3 – Nível de serviço .....	41
Tabela 4 – Composição do fluxo de veículos na via rotular .....	66
Tabela 5 – Dados levantados pelo Método DNIT .....	67
Tabela 6 – Distribuições e valores resultantes.....	80
Tabela 7 – Poluentes na microrregião .....	82
Tabela 8 – Nova composição do fluxo de veículos na via rotular.....	85
Tabela 9 – Nova composição dos tempos de espera por braço .....	86
Tabela 10 – Atualizada taxa de poluentes na microrregião.....	88

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

AASHTO	Association of State Highway and Transportation Officials
CDF	Curva de Distribuição de Probabilidade
COCO	Common Objects in Context
COPERT	Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport
CDF	Curva de Distribuição de Probabilidade
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FDP	Função de Distribuição de Probabilidade
KS	Kolmogorov-Sminorv
MCMC	Método de Monte Carlo via Cadeias de Markov
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
POO	Programação Orientada a Objetos
PPGTG	Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial
UPH/hora	Unidades de Carros de Passeio por Hora
VMD	Volumes Médios Diários
VHP	Volumes Horários de Projeto
YOLO	You Only Look Once

## LISTA DE SÍMBOLOS

$s$  ou  $\sigma$  – Desvio Padrão

$\Sigma$  - Somatório

$x$  – Um dos Valores do Conjunto

$\bar{x}$  – Média Aritmética

$n$  – Número de Valores Dentro do Conjunto

VAR ou  $s^2$  - Variância

$\Delta$  - Discrepância

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	18
<b>1.2.1</b>	<b>Objetivo Geral.....</b>	<b>18</b>
<b>1.2.2</b>	<b>Objetivos Específicos .....</b>	<b>18</b>
1.3	JUSTIFICATIVA .....	18
1.4	ADERÊNCIA AO PPGTG.....	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>24</b>
2.1	MOBILIDADE URBANA .....	24
2.2	SISTEMAS DE CONTROLE E PROJETO DE TRÁFEGO.....	28
2.3	ROTATÓRIAS.....	30
2.4	SISTEMAS PARA CONTROLE DE TRÁFEGO VEICULAR.....	32
2.5	SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO VEICULAR EM VIAS .....	34
2.6	CAPACIDADE VIÁRIA E NÍVEL DE SERVIÇO EM ROTATÓRIAS – DNIT38	
2.7	IMPACTOS DA POLUIÇÃO.....	42
2.8	EMIÇÃO DE POLUENTES .....	43
2.9	INFERÊNCIA BAYESIANA .....	45
2.10	MÉTODO DE MONTE CARLO.....	47
2.11	CADEIAS DE MARKOV.....	49
2.12	MÉTODO DE MONTE CARLO VIA CADEIAS DE MARKOV .....	50
2.13	ALGORITMO DE METROPOLIS HASTING .....	52
2.14	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO.....	54
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>55</b>

3.1	TIPO DE PESQUISA .....	55
3.2	PROCEDIMENTO METODOLÓGICO .....	55
3.3	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	58
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>60</b>
4.1	PROPOSTA PARA AVALIAR EMISSÕES .....	60
4.2	COLETA DE DADOS .....	62
4.3	IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA PROPOSTO .....	65
4.4	IMPLEMENTAÇÃO METODOLOGIA DNIT .....	65
4.5	MÉTODOS DE MONTE CARLO VIA CADEIAS DE MARKOV (MCMC) ....	69
4.6	DISTRIBUIÇÕES PELO MCMC .....	71
4.7	TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV .....	77
4.8	QUANTIFICAÇÃO DA POLUIÇÃO VEICULAR .....	81
4.9	SOLUÇÕES VIÁVEIS NA REDUÇÃO DOS TEMPOS DE ESPERA E DAS EMISSÕES.....	83
4.10	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	88
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>89</b>
5.1	CONCLUSÕES .....	89
5.2	TRABALHOS FUTUROS .....	90
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>
	<b>APÊNDICE A – Códigos Compilados .....</b>	<b>98</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O tráfego tem sido um problema recorrente na maioria das médias e grandes cidades brasileiras, com a problemática sendo apontado, principalmente, pelo aumento no número de veículos que circulam no ambiente urbano e o acúmulo de gases poluentes veiculares. A questão, em si, reside em políticas públicas que são, na maioria dos cenários urbanísticos, voltadas ao transporte privado, desconsiderando medidas que poderiam valorizar os interesses públicos, como melhores acessos a ônibus, metrô ou ciclovias.

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA DE PESQUISA

Segundo um estudo realizado pelo Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getúlio Vargas (IBRE/FGV), o tempo perdido pelos brasileiros no deslocamento para o trabalho nas regiões metropolitanas gera um custo adicional de R\$ 62,1 bilhões às cidades. Valor que poderia ser reduzido com investimentos de infraestrutura adequada ao transporte viário, a partir de tomada de decisão embasada em dados e soluções mitigadoras voltadas as altas demandas construtivas (ESTADÃO, 2023).

As questões climáticas também tem sido pauta de discussões na organização das cidades, com as emissões oriundas do tráfego de veículos de uso individual responsáveis por cerca de 73% das emissões totais. Sendo a formação de engarrafamentos e de filas as principais causadoras do acúmulo de poluentes lançados, que podem formar regiões com níveis de impactos ambientais maiores que outras. Assim, pensar na infraestrutura urbana demonstra a necessidade de modos mais eficientes para contrapor tais problemas (LOBATO, RODRIGUES, SANTOS, 2021).

O estudo da participação de veículos particulares nos engarrafamentos não é novidade, principalmente quando se trata muitas vezes sobre distâncias entre trabalho e moradia, e na ausência de um transporte público eficiente e integrador. O resultado é traduzido em desperdício de tempo do usuário, acidentes, saturação da infraestrutura urbana e o acúmulo de gases poluentes que acarretam ilhas de calor nos centros, afetam a camada de ozônio e causam doenças respiratórias (FERRAZ et al, 2020).

Como os problemas apontados acima refletem altos investimentos, mudanças na infraestrutura condizendo com as necessidades de espaço, possíveis desapropriações de terra e

mesmo efeitos culturais, decorrentes da redução do transporte privado pela necessidade de um modelo de locomoção urbana com maior foco em ônibus, ciclovias ou metrô. Assim, muitas cidades ainda favorecem a escolha de modelos tradicionais de controle de tráfego, que podem não incorporar adequadamente o crescente número de pessoas ou as demandas sustentáveis.

Uma escolha recorrente em projeto de vias, principalmente em cidades de médio porte, tem sido o uso de rotatórias (rótulas) como mecanismo de controlar o tráfego em intersecções. Conectando diferentes partes da cidade, tais estruturas seguem dimensionamento proposto em manuais e critérios de incidência de tráfego, bem como modelos probabilísticos que refletem a situação da capacidade viária. A intersecção escolhida deve atender a circulação, a capacidade e o nível de serviço da via, de maneira a garantir a segurança e a locomoção sem grandes atrasos (COELHO, 2012).

O padrão de entrada de veículos em rotatórias serve de base no cálculo de análise de serviço da mesma. Com as chamadas lacunas ('gaps') entre os veículos, na qual os carros entram na via de modo a acessar o seu destino, desempenhando o principal fator na mensuração do tempo de espera dos condutores. Porém, com o aumento nas filas de espera de acesso, ocorrem sucessivos períodos de parada e aceleração, acarretando maiores emissões de poluentes devido ao maior uso do acelerador. No caso de a fila aumentar, a poluição evoluirá a níveis que podem interferir nos níveis de qualidade do ar local (COELHO, FARIAS & ROUPHAIL, 2006).

O princípio de estudo de tráfego em rotatórias envolve uma contextualização dos diversos elementos incluídos neste sistema, sendo o número de veículos e o tempo de espera atrelados diretamente ao nível de serviço disponível. Para entender esses processos, compatibilizar estudos estatísticos e de simulação computacional são essenciais para a verificação e previsão da ocorrência de congestionamentos, acidentes e medição dos níveis de poluentes emitidos (GRANA, GRANÀ, TUMMINELLO, 2017).

Os efeitos negativos da emissão de poluentes, engarrafamentos e perda da mobilidade levam em conta processos de crescimento urbano e infelizmente, são naturais nas médias e grandes cidades. Porém são fatores que podem ser estimados por ferramentas matemáticas, bem como por simulações computacionais, tendo em vista levantamento de dados, parâmetros estatísticos e investimentos adequados.

Considerando que os dados são estocásticos na previsão de tráfego, ou seja, com valores com tendências aleatórias, torna-se difícil de encontrar previsões ou mesmo formular ajustes embasados nos valores coletados. Com isso, são úteis modelos matemáticos que estão presentes na Teoria das Filas, formulada exclusivamente para sistemas com fluxo de chegada, atendimento e saída. A aplicação dos Métodos de Monte Carlo, das Diferenças Finitas, da Distribuição de Poisson e de Cadeias de Markov poderão auxiliar nos padrões de confiabilidade, de acordo com a amostragem inicialmente observada (CHOUDHARY, DWIVEDI, UMANG, 2020).

O Método de Monte Carlo é fundamentado no princípio das incertezas, em que são definidas as amostras com base na aleatoriedade, como uma forma numérica de buscar um padrão determinístico para estas. Muitas vezes empregando uma aproximação independente da variância, na qual são geradas amostras em uma distribuição parametrizada, pelo uso de modelos criados em computador para automatizar o processo de entrada e saída de dados (GRANA, GIUFFRE, TUMMINELLO, 2017).

O Método de Monte Carlo, quando implementado junto às Cadeias de Markov (Monte Carlo Markov Chain – MCMC), pode ser um recurso importante na geração de números e amostras determinísticas quanto ao padrão distributivo, aproximando os dados reais e idealizando cenários futuros para o comportamento da amostra original. Outro procedimento útil na avaliação amostral é o teste Kolmogorov-Sminorv (KS), comparando distribuições de probabilidade (SALMAN, ALASWAD; 2018).

Diversos países enfrentam as questões ambientais e focam em como o tráfego urbano influi na temática, principalmente quanto às ilhas de calor. Modelos desenvolvidos por instituições públicas e privadas focam em quantificar os poluentes gerados da queima de combustíveis fósseis emitidos por veículos automotores. O sistema COPERT (*Computer Program to calculate Emissions from Road Transport*) foi concebido como uma calculadora que equaciona tempo de espera, capacidade viária, tipologia veicular e questões de infraestrutura de maneira a estimar quais poluentes são lançados em regiões de estudo analisadas (MAĐZIEL et al., 2022).

Neste trabalho é proposto o uso de algoritmos modelados pelo Método de Simulação de Monte Carlo via Cadeias de Markov, aplicado à uma rotatória no centro de Sinop (MT), utilizando dados obtidos pela STU por aproximadamente quatro meses, referentes a períodos diversificados no ano de 2021. Foram úteis, neste processo, a implementação de um código

em Python auxiliado em Open CV, visando a identificação e contagem veicular, avaliação do nível de serviço viário e os principais poluentes emitidos pelo método COPERT.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Avaliar o nível de serviço e emissões veiculares em rotatórias aplicando simulação computacional.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Implementar um sistema de contagem veicular;
- Modelar e simular o tráfego veicular em rotatórias baseado no MCMC (Monte Carlo Markov Chain Method - MCMC);
- Calcular a emissão de poluentes emitidos conforme método COPERT (Computer Program to Calculate Emissions from Road Transport);
- Realizar uma avaliação comparativa da carga poluidora e nível de serviço viário, visando alcançar um padrão adequado.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Muitas cidades apresentam investimentos em centrais de monitoramento voltadas à segurança pública ou análise do trânsito, com câmeras instaladas em pontos centrais que podem incluir vias de interesse na observação de como os veículos estão fluindo. As informações obtidas nesses vídeos podem ser acessadas em tempo real ou ficam gravadas por um certo período de tempo, a depender do nível de investimento contido. Tais vídeos podem ser lidos, gravados e convertidos para estimar características de tráfego.

Assim, de posse das informações contidas em vídeos, pode se desenvolver um algoritmo visando entender o que está ocorrendo: número e tipo de veículos, formação de filas com congestionamentos e até mesmo a velocidade. Receber esses dados é de extrema importância na avaliação do tráfego atual viário como também para estimativas futuras pelo

aumento de veículos, afim de serem definidas medidas de infraestrutura condizentes com a malha urbana.

O uso de uma rotatória visa reduzir os níveis de interferências viárias presentes nas cidades com tráfego médio, possibilitando passagem aos usuários de maneira ordenada na qual o veículo ao abordar a via realiza a parada, verifica a possibilidade de passagem nos chamados ‘gaps’ e prossegue acelerando. Nessas etapas podem ocorrer múltiplas paradas e aceleradas, a depender do tamanho das filas presentes o que representa maiores gastos energéticos e da poluição emitida (COULLON, POKERN, 2022).

Caracterizar os problemas e viabilizar soluções práticas requer aplicação de modelos matemáticos que trabalhem com dados levantados através da contagem veicular. Servindo de base para verificar convergências e eventuais divergências numéricas, simulando e estimando com base em normativas de tráfego os tempos de espera para acessar vias, estudar cenários de possíveis sinistros, estimar eventos futuros e medidas para melhorar o tráfego urbano (GRANA, GIUFFRE, TUMMINELLO, 2017).

O Método MCMC é bastante útil para apoiar pesquisas nas diferentes áreas Engenharia, com uma gama de aplicações que permeiam a base da teoria bayesiana. A partir de dados amostrais pode-se prever, com ferramentas matemáticas, padrões populacionais e, desta forma, garantir a viabilidade na verificação dos dados. Sua aplicação em Engenharia de tráfego visa entender se os valores tratados estão de acordo com a população, tendo em vista evitar modelos sub ou super dimensionados. O algoritmo de Metrópolis é implementado junto a esta metodologia e servirá para garantir a convergência adequada dos dados, eliminando discrepâncias e também acelerando o processo de simulação amostral (MAURO et al, 2020).

De posse de uma grande quantidade amostral, gerada na etapa do MCMC, é possível ter uma visão mais específica de cenários com precisão e estimar problemas urbanísticos. Assim, certos modelos matemáticos são bastante usados por países europeus na mensuração precisa dos poluentes lançados por veículos, servindo de parâmetros na adoção de ferramentas para mitigar as consequências ambientais embasado em dados analisados. O modelo COPERT é creditado como uma metodologia de simulação de quais gases estão sendo gerados pela combustão e é aplicado em estudos macro e micro regionais, servindo de referência para análises de ilhas de calor (COELHO; FARIAS & ROUPHAIL, 2006).

No estudo realizado por Maźziel et al. (2022) é destacado que as emissões de poluentes em rotatórias ocorrem devido as filas formadas e a geração dos períodos de paradas,

ocasionando altas taxas de liberação principalmente de CO<sub>2</sub> e CO entre veículos automotores. Coelho; Farias & Roupail (2006) identificaram em rotatórias presentes em Portugal que a formação de filas gera conflitos viários, discrepâncias nas velocidades e a alta taxa de emissão dos poluentes CO<sub>2</sub>, CO, NO e HC. Demonstrando que variações nos padrões de aceleração veiculares geram maiores taxas de poluentes emitidos.

No Brasil, diversos estudos vêm sendo desenvolvidos no intuito de entender os efeitos danosos das emissões de poluentes, com o foco em grandes cidades como São Paulo, Rio de Janeiro e Porto Alegre. Com uso de simulações oriundas de modelos europeus, como o citado COPERT, servindo de base para identificação de zonas urbanas com alto potencial de estratégias de descarbonização (LOBATO, RODRIGUES, SANTOS, 2021).

Trabalhos de diversos autores já abordaram a temática do uso de contador de veículos com câmeras amadoras (MEMON et al, 2018), uso de MCMC aplicado em rotatórias objetivando identificar falhas (GIUFFRÈ, GRANÀ & TUMMINELLO, 2017), avaliação de emissão de poluentes em vias públicas pelo COPERT (COELHO; FARIAS & ROUPHAIL, 2006) e como o aumento no número de veículos causam questões relativas a atrasos, acidentes e danos ambientais (CRUZ, 2019). Elencar todos esses fatores e aplicar é importante na composição de um material de apoio na tomada de decisões para projetos futuros, aplicação em outras localidades e mitigação de danos.

Entender como os modelos auxiliam os pesquisadores na previsão de eventos futuros é vital para que autoridades encontrem soluções eficientes na mitigação dos problemas que o tráfego urbano desencadeia. Utilizando dados, simulações e metodologias normatizadas, é possível elaborar propostas úteis no desenvolvimento de melhorias nos sistemas de transporte e logística urbana, buscando a melhora nos índices ambientais.

#### 1.4 ADERÊNCIA AO PPGTG

Esta dissertação trata de uma proposta para avaliar emissões veiculares em rotatórias aplicando o Método de simulação Monte Carlo via Cadeias de Markov. Como tal, está inserida na área de concentração Sistemas de Transportes e na linha de pesquisa Avaliação e Gerência de Projetos de Transportes. No PPGTG, esta linha trata de uma área de estudo que visa adequar as necessidades de transporte de uma região ao seu desenvolvimento de acordo

com suas características estruturais. Isto significa implantar novos sistemas ou melhorar os existentes.

No histórico do PPGTG, foram encontradas 02 dissertações que guardam afinidade com o tema deste trabalho. Na Tabela 1, a seguir, estão destacados os trabalhos considerados de contexto mais próximo ao desta dissertação.

Tabela 1: Dissertações similares PPGTG

Ano	Autor	ABNT	Observação
2017	Bortolazzo, Shadia S. A.	Bortolazzo, Shadia S. A. Contribuição metodológica para planejamento de transporte urbano uma proposta sob a ótica da sustentabilidade ambiental/ Shadia Silveira Assaf Bortolazzo; orientador, Amir Mattat Valente, coorientador, João Eugênio Cavallazzi, 2017. UFSC.	Desenvolver um indicador de sustentabilidade para o transporte coletivo em São José SC.
2018	Balvedi, Guilherme Arpini	Balvedi, Guilherme Arpini Microsimulação de tráfego aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em rotatórias: um estudo de caso na	Uso de simulação computacional afim de modelar o tráfego existente em rotatória.

		rótula da UFSC/Trindade / Guilherme Arpini Balvedi; orientadora, Lenise Grando Goldner, 2018. 136 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2018	
--	--	---	--

Fonte: Autor, 2023

Pode-se perceber que há trabalhos que têm contexto de aplicação no mesmo setor da presente dissertação. No primeiro, por Bortolazzo (2017) é constatado a necessidade do uso de transporte coletivo eficiente e como isso impacta nas demandas urbanas. Já no trabalho de Balvedi (2018) é destacado a importância da simulação computacional afim de estimar o tráfego em rotatórias.

Observando-se o histórico de trabalhos do PPGTG, nota-se que a presente dissertação traz como contribuição específica a aplicação de um sistema para contagem veicular, bem como um modelo útil na avaliação de tráfego, convergência de dados, simulação estocástica e da carga poluidora emitida por veículos automotores em rotatórias. Nesse sentido, esta dissertação pode vir a ser subsídio para novas pesquisas em ferramentas que avaliam o tráfego e que possibilitem averiguar as emissões no cenário urbano ou

rodoviário em sistemas livres, afim de auxiliar gestores na tomada de decisões quanto a mobilidade.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, que serão descritos a seguir. O primeiro capítulo traz a introdução, com a contextualização da temática e os objetivos geral e específico, justificativa e aderência ao programa de mestrado. No segundo está contida a revisão de literatura com estudos na área. Para o terceiro capítulo é abordada a metodologia, descrevendo o modelo de estudo desenvolvido. No quarto capítulo é elencada a coleta de dados, modelagem e simulação, bem como a análise de resultados necessária nesta pesquisa. O quinto capítulo apresenta a discussão dos resultados, com descrição prática destes e reflexos do modelo aplicado. E no sexto capítulo está a conclusão, onde procurou-se validar os resultados obtidos frente às análises empreendidas e auxiliar em estudos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta-se a pesquisa bibliográfica em relação aos temas de planejamento urbano, sistemas de contagem veicular, emissões veiculares e o Método de Simulação Monte Carlo via Cadeias de Markov. Além de normativas, critérios de cálculo e estatística considerados aqui e que foram ordenadas para enfatizar a problemática, organização, simulação de dados, correlação estatística e descrição de possíveis soluções práticas.

### 2.1 MOBILIDADE URBANA

Na metade do século XX as cidades brasileiras tiveram um forte e acelerado crescimento econômico ligado à uma série de políticas públicas, com boa parte da população, antes rural, agora a ocupar regiões urbanas. Aumentaram-se as áreas periféricas e forçou-se o direcionamento urbano para zonas distantes dos centros e das regiões industriais, de tal modo que junto com essa política de expansão, também houve um aumento na frota de veículos (CARVALHO, 2016).

A mobilidade representa para as grandes cidades a principal forma de passagem de serviços e bens, conectando áreas de diversos níveis econômicos, culturais e sociais. Servindo ao desenvolvimento humano e de capitais, sendo praticamente impossível imaginar as grandes economias mundiais sem suas vias de trânsito que cortam e costuram o emaranhado das construções. A perda na mobilidade urbana traz consigo reflexos negativos, como a desestabilização econômica regional, impactos ambientais e sociais (REIS, 2014).

Sistemas de mobilidade não preparados e mal otimizados não apenas oneram os serviços urbanos prestados, como também afetam os mais pobres. Incidindo sobre o deslocamento urbano, uso do solo, segregação do espaço, impactos sobre renda etc. Por isso, gestores devem se ater ao planejamento e aplicação de recursos sob a perspectiva de toda a população regional e periférica (CARVALHO, 2016).

Tamanha é a importância da temática que o governo federal criou a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU – Lei 12.587/2012), voltada aos municípios com mais de 20 mil habitantes poderem criar estratégias relacionadas a criação e revisão periódica do plano

diretor. Sendo um requisito vital na obtenção de recursos federais para investimentos em infraestrutura urbana.

Incidindo negativamente nos problemas viários, o aumento no número de veículos motorizados individuais tem acarretado um expressivo agravamento das questões que envolvem o tráfego. Podendo, em diferentes níveis, ser um empecilho para a infraestrutura, com perda de espaço e geração de conflitos, acidentes e eventuais mortes. Nos planos de mobilidade é importante um enfoque na redução dos veículos motorizados, enfatizando em possibilidades para o transporte coletivo (BARBOSA et al, 2018).

O processo de movimentação de mercadorias e pessoas está interligado aos custos envolvidos na escolha do sistema. Também em paralelo está o fator tempo, que reflete diretamente no uso da infraestrutura focada ao deslocamento urbano, regional ou inter-regional e continental. Para tanto, são direcionados investimentos na construção de novas vias, criação de sistemas mais rápidos e eficientes, como trens de alta velocidade, alargamento de faixas e etc. Tudo de modo a desafogar os tradicionais caminhos buscando dar vazão ao fluxo de capitais que circulam pela sociedade (REIS, 2014).

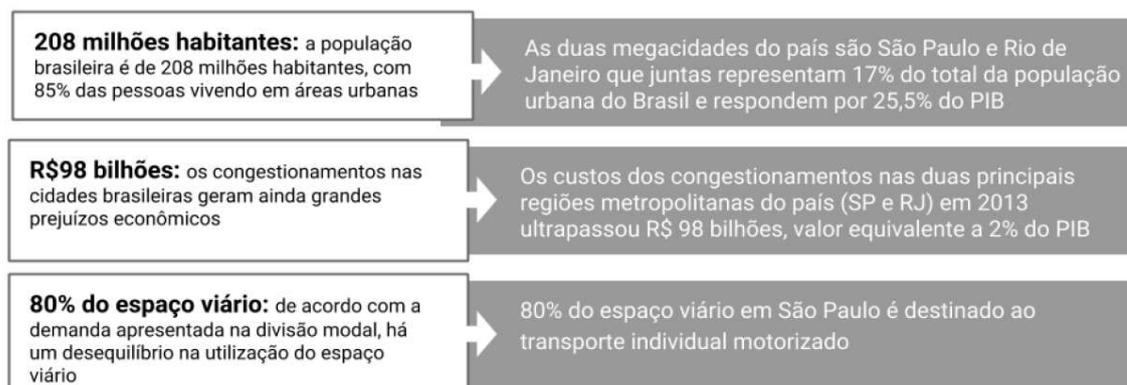
Um dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentáveis (ODS) é o de tornar as cidades e sua infraestrutura de modos resilientes e sustentáveis. As metas estabelecidas condizem com o transporte público adequado para todos, enfatizando sistemas de ônibus ou metrô acessíveis (ou outros sistemas de trilhos), sustentáveis, seguros e eficientes. Outras medidas discutidas envolvem a ideia de mobilidade ativa, que é relacionada ao ato do movimento por esforço humano seja por meio de bicicleta ou por caminhada, enfatizando que sejam reduzidas as emissões de gases poluentes (CRUZ, PAULINO, 2019).

Ao tratarmos da mobilidade sustentável, existe uma variada gama de definições e fatores ligados ao tópico. Mas a principal questão é que o transporte não pode ser tratado de maneira isolada das demais atividades humanas, como trabalho, educação e lazer. O que impõe o significado da mobilidade urbana como parte da mudança em todo o sistema socioeconômico e das diretrizes locais, buscando atender as demandas atuais focadas em desenvolvimento e meio ambiente, sem interferência nas necessidades humanas envolvidas (CRUZ, PAULINO, 2019).

É importante frisar nas políticas para um desenvolvimento sustentável que seja estabelecido por meio da governança urbana, enfatizado em políticas habitacionais, uso e

ocupação do solo, saneamento e aos planos diretores (Di Giulio et al, 2018). O Quadro 1 abaixo ilustra esse contexto nas duas maiores cidades do Brasil.

Quadro 1 - Características da mobilidade urbana em megacidades do Brasil



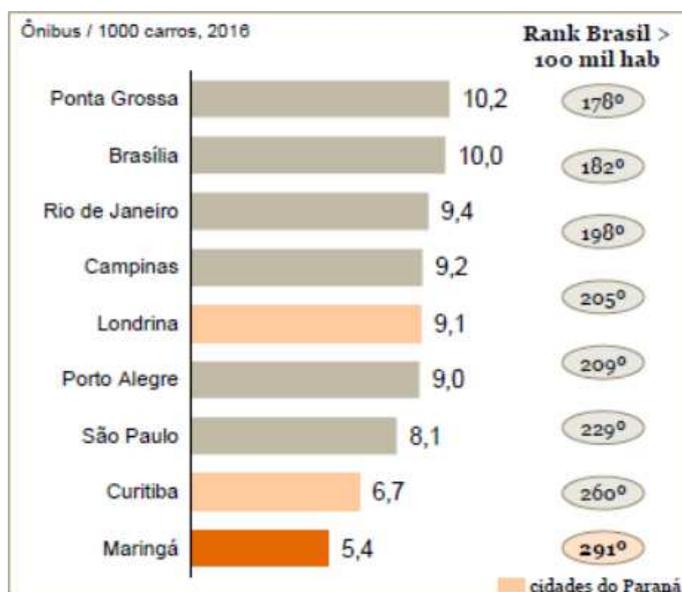
Fonte: CRUZ, PAULINO (2019)

Assim, para mitigar as adversidades resultantes da natureza humana em expandir e conquistar espaço, podemos tomar medidas ativas na elucidação da crise no transporte urbano. Como por exemplo, tratando de fatores ambientais, as viagens por uso de ônibus representam uma significativa redução na emissão de gases causadores do efeito estufa. Com boa parte da população brasileira utilizando o deslocamento ativo, em 2016, 43% das viagens foram realizadas a pé ou bicicleta, 29% por transporte motorizado individual e 28% por transporte público (ônibus ou metrô) (ANTP, 2018).

O tempo que o brasileiro perde no trânsito reflete em gastos com combustíveis, emissão de ruídos sonoros, questões psicológicas, ambientais e mesmo de segurança. Com a expansão do meio urbano, a infraestrutura se torna obsoleta e requer novos sistemas de transporte ou adaptações construtivas. A partir de um planejamento integrado, gestores devem buscar mesurar as incidências no conjunto urbano e assim, tomar decisões com base em critério técnicos e sociais (FERRAZ et al, 2020).

Muitas cidades brasileiras já adotaram como forma de contornar os problemas de mobilidade urbana o uso de sistemas de transporte coletivo municipal, tais como ônibus, metrô ou bondes. Tais sistemas servem na conexão de diversas partes urbanas e facilitam o tráfego de pessoas, reduzindo congestionamentos e reduzindo os impactos ambientais, Figura 2.

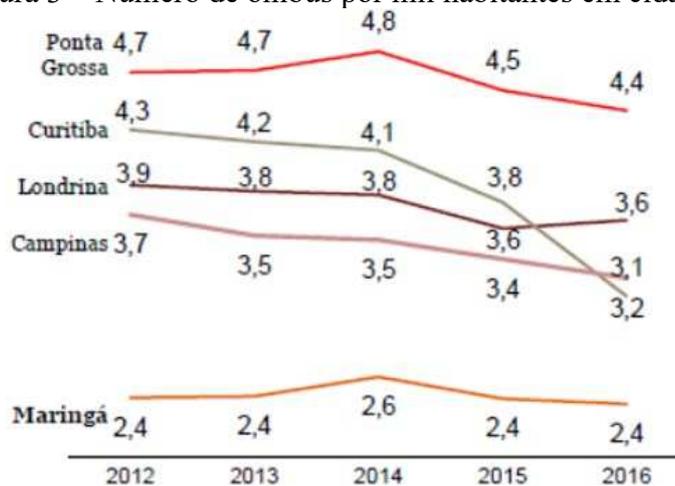
Figura 2 – Relação de ônibus por carro em cidades



Fonte: Paraná (2023)

A Figura 3 denota algumas cidades brasileiras com relação ao número de ônibus para mil habitantes, com ênfase nas localizadas no estado do Paraná. Contando com uma frota veicular com 37 ônibus de transporte de passageiros, Sinop (MT), apresenta uma taxa de cerca de 3,2 ônibus para cada mil habitantes. Tal valor é inferior que cidades como Ponta Grossa - PR (4,8 ônibus/hab), Curitiba - PR (4,3 ônibus/hab) ou Campinas - SP (3,7 ônibus/hab).

Figura 3 – Número de ônibus por mil habitantes em cidades



Fonte: Paraná (2023)

## 2.2 SISTEMAS DE CONTROLE E PROJETO DE TRÁFEGO

O controle do tráfego visa, no contexto das grandes cidades, ajustar as inúmeras variáveis que interferem no trânsito e propor medidas estratégicas auxiliares para condições apropriadas de trafegabilidade. De maneira a serem atendidas satisfatoriamente tais condições, podemos elencar as seguintes estratégias: de forma isolada, coordenada, manipulativa e adaptativa. Em qualquer uma das formas os responsáveis devem compreender os aspectos inerentes ao desempenho viário, forma de interação entre os elementos (motoristas *versus* infraestrutura), questões climatológicas e eventuais restrições, como gabaritos (POLUS et al, 2005).

Congestionamentos são um problema na maioria das cidades brasileiras, tanto que em grandes metrópoles existem centrais de monitoramento e ação conjunta diretamente voltada ao tráfego, como em Porto Alegre (RS) e São Paulo (SP). Em que são levantados dados que possibilitem ações mais diretas e visando atenuação dos eventos adversos, citando aqui os acidentes e engarrafamentos. Para tanto, algumas alternativas de controle de tráfego podem ser compostas pelo tipo de interferência, em que o volume de veículos será totalmente parado em uma direção em um dado cruzamento até o fluxo ser liberado, como ocorre em semáforos e sinaleiras. Ou em vias nas quais os motoristas circulam baseado em sistemas de preferência, como rótulas ou sinalizadas apenas. Existem, também, as interseções em níveis e as de cruzamentos mistos, com semáforos e rótulas, que podem ser mais onerosas e de difícil construção (SAUSEN, MACHADO, 2016).

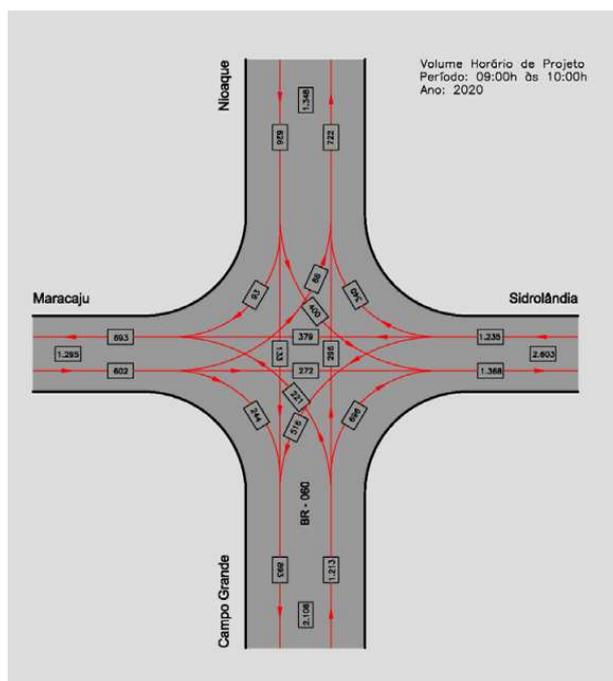
A decisão na escolha do sistema de tráfego a ser implantado dependerá de análises do conjunto de dados levantados de maneira quantitativa, como volume de veículos, interferências construtivas, geometria, custos e eventos climáticos. Outros fatores que devem ser ponderados refletem quanto a eventos qualitativos, oriundos de aspectos psicológicos em que a forma de comportamento do motorista é vital. Os modelos de projeto rodoviários e urbanos devem ser modelados em auxílio dos determinados pelas legislações e manuais técnicos disponíveis com critérios regionais e nacionais (DNIT, 2006).

Com o crescimento dos núcleos urbanos, a infraestrutura tem a tendência de se tornar obsoleta para os casos não previstos por projetistas e gestores. Utilizando fatores como geometria da via, condições de tráfego e manutenção, são levantados dados que servem de parâmetros de maneira a garantir graus de serventia adequados a utilização viária. Com

metodologias de cálculo sugeridas por órgãos públicos, como Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) no Brasil ou *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) nos EUA, que focam em proporcionar condições mínimas de serviço e operação (BARBOSA et al, 2018).

Para tanto, vamos entender melhor algumas características básicas em um projeto de uma via com intersecção, após isso existem metodologias orientativas quanto ao tipo, formato e modelo para o controle do tráfego, bem como dos níveis de interferência determinísticos. Nos dados de tráfego são incluídos os Volumes Médios Diários (VMD) e os Volumes Horários de Projeto (VHP) são calculados e disponibilizados em fluxogramas e tabelas, em que os dados são expressos em Unidades de Carros de Passeio por Hora (UCP/hora), conforme Figura 4 indica (DNIT, 2006).

Figura 4 - Modelo de fluxo de tráfego em UCP



Fonte: DNIT, 2006

Para estudos de tráfego são necessários dados levantados, visando previsão para eventos futuros:

- a) Determinação dos períodos de pico com maior tráfego;
- b) Identificação dos tipos de veículos incidentes;
- c) Execução padronizada com leituras realizadas semanalmente ou mensalmente;
- d) Levantar eventuais elementos causadores de conflito;

e) Estudar taxas de crescimento populacional, com eventual aumento de veículos.

Os controladores de tráfego são decisivos na diminuição dos tempos de viagem, paradas, consumo e emissão de gases poluentes. Além de gerenciar os congestionamentos, tais mecanismos também servem na redução do número de acidentes. Eles estão presentes em pontos de encontro de duas ou mais vias, as chamadas interseções que são responsáveis por canalizar os sistemas de origem e destino veiculares (DNIT, 2006).

### 2.3 ROTATÓRIAS

No Brasil o principal sistema de controlar o tráfego, sem causar danos significativos ao dinamismo viário, são as rotatórias. Presentes na maioria das cidades pequenas, médias e regiões metropolitanas, na forma de uma ilha central na qual os veículos circulam sob velocidade controlada em uma configuração com tendência circular, de preferência pela ordenação e sistematização para quem chega e sai, conforme as normas de trânsito (MOITA, ALMEIDA, 2012).

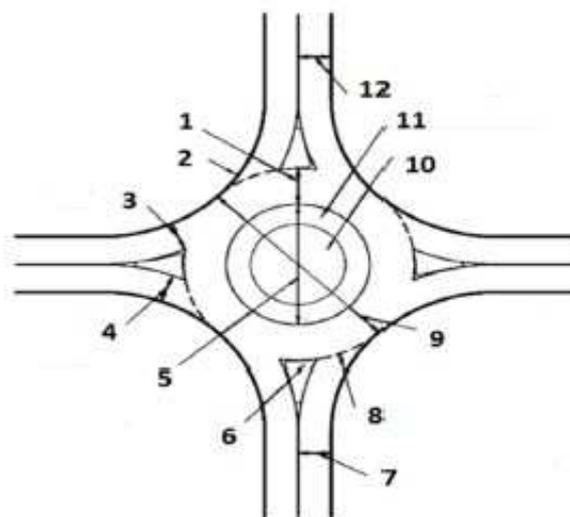
Os veículos trafegam pelos núcleos urbanos sob o prisma do uso do espaço disponível. Enquanto existem aberturas, haverá possibilidade de fluxo e assim passagem dos condutores. Neste ambiente de disputa por acesso, os motoristas conduzem seguindo os critérios viários, ambientais e psicológicos dos mesmos. Com parâmetros que são somados e resultam na serventia viária, como condições da pista, dos condutores e eventos climáticos (MOITA, ALMEIDA, 2012).

O conflito no trânsito advém de observações em que dois ou mais usuários se aproximam um do outro, em um curto intervalo de tempo com distância significativamente reduzida e sob o prisma de fatores determinísticos, como os relativos ao padrão viário e a velocidade de deslocamento. Em relação às rotatórias, existem elementos que visam reduzir a margem de possibilidade de acidentes, buscando dar flexibilidade no fluxo incidente com menos interferências possíveis (CRUZ et al, 2021).

A dimensão da largura na entrada está relacionada com a velocidade de acesso do veículo, Figura 5, influenciando de maneira geral no funcionamento da rótula. O número de faixas de entrada está associado a capacidade, sendo a faixa central a mais importante na condução de rolagem. As larguras de entrada devem possuir valores de 4,0 a 5,0 m, para

acesso com faixa única, e 6,0 m para faixas duplas, para faixa de circulação o valor é 20% maior que a largura de entrada (FWHA, 2000).

Figura 5 - padrão de uma rotatória



Fonte: AASHTO (2001)

Em que: 1 - Largura da pista rotatória; 2 - Raio de entrada; 3 - Largura da saída; 4 - Largura da entrada; 5 - Diâmetro da ilha central; 6 - Ilha divisória; 7 - Largura do ramo de entrada; 8 - Faixa "Dê a preferência"; 9 - Diâmetro do círculo inscrito; 10 - Ilha central; 11 - Setor para acomodar caminhões; 12 - Largura do ramo de saída (AASHTO, 2001).

Consideradas como dispositivos com elevado grau de segurança, as rótulas ajustam a circulação continuada em um controle que é feito pelos próprios usuários, proporcionando condições satisfatórias para uma capacidade de dar vazão ao tráfego incidente com relativa eficiência. Ou seja, deixando menores lacunas durante o fluxo em horários de pico, desenvolvendo uma movimentação mais dinâmica entre os veículos, e com atraso global menor comparado às intersecções com semáforos e similares (MOITA, ALMEIDA, 2012).

Mas ainda existem questões de interesse, como as atitudes com que cada motorista tende a estabelecer ao trafegar em rotatórias, como obediência as regras de trânsito, respeito a prioridade de passagem, adequação da geometria da via e sinalização. Como também a eficiência das mesmas com relação a passagem de veículos, em períodos críticos de grande movimentação no cenário urbano (DNIT, 2006).

## 2.4 SISTEMAS PARA CONTROLE DE TRÁFEGO VEICULAR

Sistemas para contagem de tráfego e processamento de informação foram desenvolvidos no intuito de facilitar o trabalho de gestores que lidam diretamente com diretrizes envolvendo velocidade veicular, tempo de espera, formação de filas, etc. Para tanto, existem *softwares* e *hardwares* pagos que desempenham tais atividades eficientemente, porém com custos muitas vezes elevados para determinadas atividades envolvendo estudos de certos cenários e avaliações de pouca duração (REDMON, FARHADI, 2018).

Baseado em critérios de análise de vídeo, existem estudos que através de câmeras diversas, como vigilância, fiscalização ou mesmo amadoras, adquirem tais informações e permitem a análise de fatores envolvendo trafegabilidade urbana e rodoviária. Tais vídeos geralmente são obtidos e guardados para que pessoas possam fazer os estudos de contagem. Mas existem alternativas que focam na automatização destes processos, direcionando à programação computacional tal serviço (YANG, 2012).

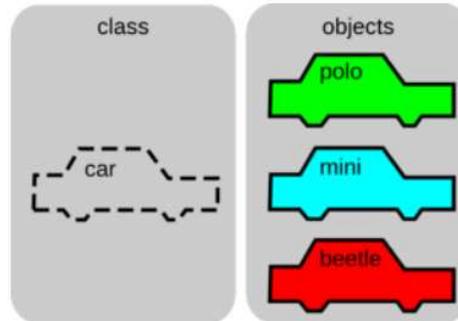
O objetivo de sistemas de monitoramento de tráfego é o de detectar, rastrear e classificar veículos. Para realizar tarefas mais complexas como na contagem, cálculos de engenharia de tráfego e em estimativas volumétricas são necessários estudos relacionados com uso de programação e processamento de dados. Também servindo de base na detecção de anomalias, tendências e comportamentos de sistemas urbanos, auxiliando na tomada de decisão por autoridades (MEMON et al, 2018).

Dentro do sistema que compõe o sistema de monitoramento existe a parte de *hardware* que é a câmera estática instalada na via, que captura o vídeo, e a do *software*, que é responsável por processar e analisar a informação recebida. Estes sistemas variam de acordo com a composição de atividades que podem desempenhar, como processamento em tempo real, rastreamento ou detecção da velocidade, o que também variará o preço do equipamento (LIU, KOENIG, 2010).

A funcionalidade desempenhada por *hardwares* e *softwares* é a de simular as redes neurais que o ser humano utiliza: quando vemos um carro, por exemplo, e diferenciamos este pelo seu modelo, marca, cor etc. Isso pode ser elaborado em termos do que é chamado de Programação Orientada a Objetos (POO), que basicamente entende algo real e transmite a ideia em linguagem computacional. Sendo focada em funções escritas que servem de procedimentos voltados a operação de dados. Subdividida em classes, que são dados pré-

definidos; objetos, instâncias da classe; métodos, funções que descrevem o comportamento de um determinado objeto; e os atributos, definidos na classe e armazenam as informações dos objetos, Figura 6 (MEMON et al, 2018).

Figura 6 - Classes e objetos POO



Fonte: REDMON, FARHADI (2018)

Existem elementos presentes em um POO que serão úteis para agilizar, automatizar e auxiliar no processamento da informação obtida. Na programação estruturada, fundamentada nas classes e objetos definidos, cabem ainda os conceitos de encapsulamento, relacionada a abstrair determinadas informações; herança, sobre capturar dados de outros códigos; interface, referente a implementação dada as classes; polimorfismo, suas várias formas estruturadas em código; e também o *Design Patterns*, relacionado aos padrões estabelecidos (MEMON et al, 2018).

A linguagem de programação Python é simples e prática para determinadas atividades. Porém, em tarefas mais avançadas, são necessárias à implementação de bibliotecas e plataformas de trabalho mais sofisticadas. De modo a agilizar processos que antes só poderiam ser executados em linguagens de programação como C++ ou Java. Para tanto, a biblioteca Open CV tem mostrado boa eficiência na execução de atividades envolvendo vídeos e extração de informação de imagens, aplicada em Python garantindo a eficiência dos resultados e a facilidade na elaboração dos códigos.

Basicamente, Python é uma linguagem que é modelada na Programação Orientada ao Objeto (POO). Utilizando uma função ou método que receberá parâmetros, no qual a orientação ao objeto é sistematizada por um grande conjunto de classes que irão comunicar e delegar atividades a quem tiver a atribuição. Sendo baseada nas etapas de encapsulamento, na qual caberá a tarefa de juntar os objetos; abstração, na ideia de se esmaecer determinadas

informações sendo geralmente opcional; e herança, reaproveita classes ou componentes de outros códigos (ANDRADE, 2020).

Segundo o DNIT, a contagem de tráfego é de fundamental importância, de modo a garantir condições aos estudos de planejamento em geral, que são essenciais para o cumprimento de variadas finalidades: planejamento do sistema rodoviário; estabelecimento das tendências de tráfego no futuro, medição da demanda atual de serviços por via rodoviária, etc. De modo a fortalecer esses elos, algumas medidas tem sido aplicadas visando cobrir o máximo possível da malha viária brasileira e garantir que as demandas sejam atendidas (DNIT, 2022).

## 2.5 SISTEMA DE CLASSIFICAÇÃO VEICULAR EM VIAS

Implementado junto ao Python, existem bibliotecas e metodologias de rastreamento de objetos que servem de auxílio na identificação dos mesmos. Uma destas é YOLO (*You Only Look Once*), sendo um algoritmo de reconhecimento de objetos em tempo real. Considerada rápida e simplista, tal metodologia usa de blocos pré-estabelecidos que serão agrupados e gerarão uma figura definida, como uma pessoa, carro e qualquer objeto registrado em sua biblioteca. Funciona amparada em processos de rastreamento das feições geométricas (comprimento, largura, altura) na manipulação e identificação em vídeos e imagens (BOCHKOVSKIY et al, 2020).

YOLO é implementada sob a perspectiva de alguns processos de divisão e agrupamento de *frames* (quadros), sendo as principais etapas descritas a seguir:

*Residual Boxes*: divide o *frame* em  $N \times N$  malhas;

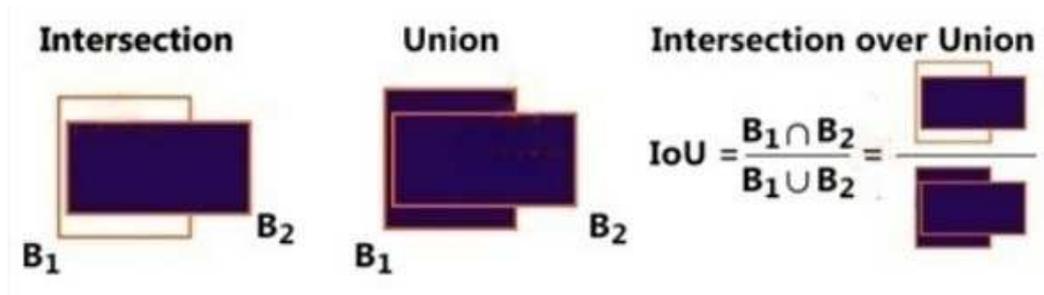
*Bounding Box regression*: cada célula da malha é lida, então YOLO determinará probabilisticamente qual objeto é.

*Intersection Over Union (IOU)*: realiza uma intersecção entre blocos diversos, como uma pessoa em cima de uma moto e distingue o que é o que;

*Non-maximum suppression*: delimitação da malha e separação dos objetos, trabalha em conjunto com IOU.

A Figura 7 representa um quadro resumo das etapas.

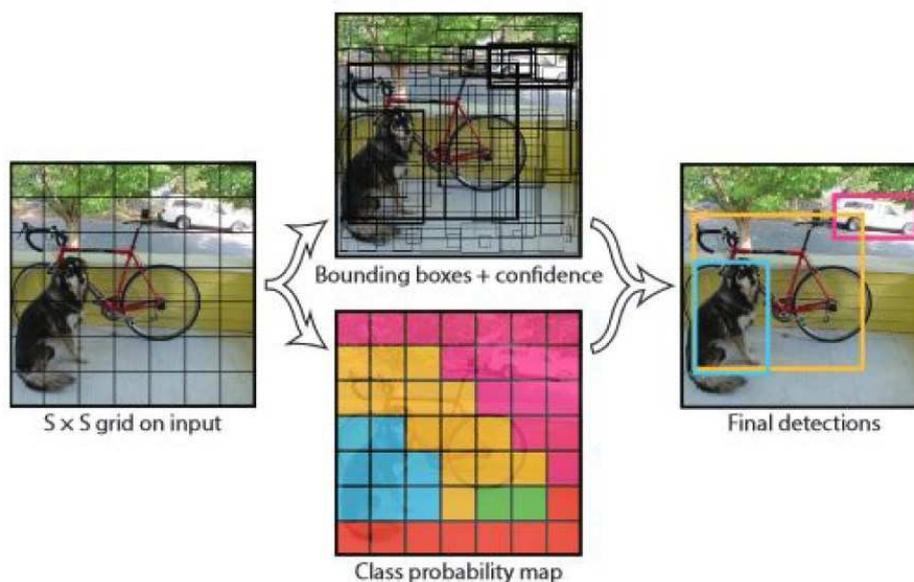
Figura 7 - Etapas YOLO



Fonte: REDMON, FARHADI (2018)

Conforme visto, cada etapa trabalha de acordo a identificar os objetos que surgem nos *frames*, possibilitando uma ação dinâmica e que não seja repetitiva. Ou seja, o mesmo objeto não será contado duas vezes seguidas. Sendo importante ressaltar que muitas imagens ou vídeos apresentam diversos elementos sobrepostos, com geração de sombras ou agrupamentos (por exemplo um carro rebocando um barco), assim são feitos diversos estudos de redes neurais objetivando minimizar tais interferências que podem causar erros significativos em contadores de tráfego, Figura 8 (LIN, 2017).

Figura 8 - Processo de classificação de YOLO

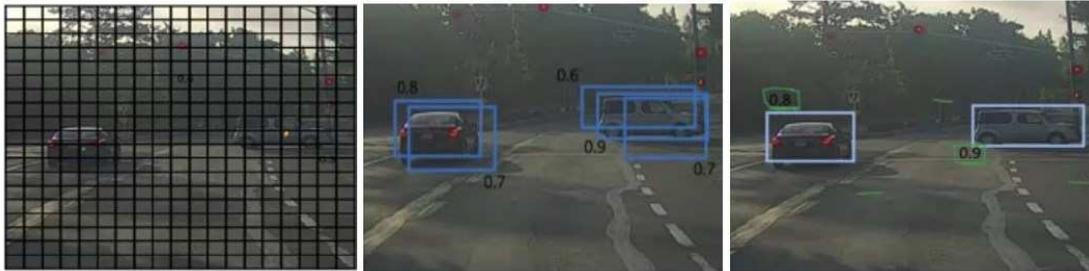


Fonte: REDMON, FARHADI (2018)

Junto a YOLO existe o chamado processo de *Non - Maximum Suppression* que consiste em como cada imagem será formada através do *grid*. Cada *frame* ficará encarregado

de detectar se existe um objeto novo a ser designado e, assim, reconhecido. Os limites de cada objeto são definidos pelos *anchors* em que as diferenciações resultantes culminarão em um ou mais elementos: como um carro ou uma pessoa em cima de uma moto que representa apenas uma motocicleta. Assim, o melhor formato do *bounding box* é escolhido e configurado de modo a não sobrepor inadequadamente o que é visto na tela, Figura 9 (LIN, 2017).

Figura 9 - Bounding Box



Fonte: ANDRADE (2020)

Desta maneira caberá o recurso da *non-maximal suppression* que ficará encarregado de escolher, dentro dos variados blocos dinâmicos sobrepostos, qual encaixará na melhor resolução possível no quesito *bounding box*. Nesta fase de determinação do objeto, entra em cena a *Intersection Over Union* para impedir que a sobreposição de múltiplos objetos apareçam e haja recontagem de itens já contabilizados, Figura 10 (LIN, 2017).

Figura 10 - oclusão veicular



Fonte: ANDRADE (2020)

O rastreamento do que é passado na tela é feito ao longo da execução do vídeo, ou seja, o objeto é mapeado por todo o trecho existente. Com os principais problemas que podem

surgir neste processo: oclusão veicular, mudança de perspectiva ou movimentação da câmera. Existe uma probabilidade mínima estimada conforme estes se aproximam da linha identificadora, com estimativa de pelo menos 10% para uma boa contabilização e acerto do que é visto. Para tanto, configurar as linhas de contagem é um passo importante nesta etapa, bem como escolher bem o local de posicionamento das câmeras utilizadas (BOCHKOVSKIY et al, 2020).

A contagem de veículos que circulam em uma via se dará pela demarcação de uma região de interesse, no caso serão linhas divisórias acessórias implantadas no vídeo, que indicam um início, dado pela entrada do veículo, e fim da contagem com a saída do objeto almejado. Nesta etapa o veículo só é contabilizado uma única vez, independente de quantas vezes este surgiu no vídeo, e a informação é guardada conforme a classe do mesmo (MEMON et al, 2018).

A biblioteca Open CV – Python auxilia na construção de um modelo de acesso ao YOLO, trabalhando em parceria na modelagem de cada *frame* ativo. Para isso, são de grande utilidade os módulos internos chamados de *Deep Neural Network* (DNN), que funcionam como um algoritmo que modela atividades de reconhecimento interno de *frame* por *frame*. Ou seja, trata se de reconhecer padrões previamente definidos por usuários (REDMON, FARHADI, 2018).

Quando é trabalhado com compatibilidade entre plataformas ou bibliotecas, é importante ressaltar questões como funcionalidade e tempo de espera para obtenção de respostas. Como, por exemplo, quanto demorará para ser realizada a leitura de um vídeo e a obtenção dos dados esperados? Obviamente, é buscado um menor tempo para levantamento de informações. Para tanto, o uso de ferramentas disponíveis em *hardware* pode tornar o processo mais ágil e eficiente.

As bibliotecas YOLO e COCO (*Common Object in Context*) englobam um conjunto pré-cadastrado de objetos que serão lidos a cada *frame* e resultarão na catalogação da figura. Estão inseridos padrões de 88 imagens conhecidas em nosso cotidiano, como carros, motos, aviões, bicicletas, etc. Nestas coleções registradas em planilhas de arquivos, temos os contornos geométricos relativos à forma de cada objeto incluído como, por exemplo, a representação de um ônibus, que é diferente de um avião, ou de um carro em relação a uma moto, etc. Desta forma, no momento da execução do código em linguagem estruturada, veremos os contornos que o *Tracker* (Rastreador) decodificará embasado no princípio

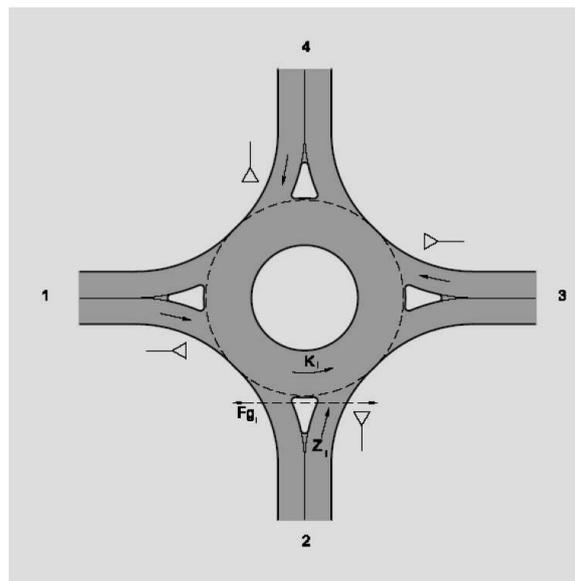
matemático da Geometria Euclidiana em relação a distância entre pontos (BOCHKOVSKIY et al, 2020).

Com a contagem executada e os dados extraídos e armazenados, será possível desenvolver a avaliação dos polos de origem e destino na rótula avaliada. Cabendo ao método do DNIT, descrito a seguir, calcular a capacidade de nível de serviço viário disponível para o trecho estudado.

## 2.6 CAPACIDADE VIÁRIA E NÍVEL DE SERVIÇO EM ROTATÓRIAS – DNIT (2006)

Os padrões de chegada e destino nas rotatórias com quatro braços, representados pelos números 1, 2, 3 e 4 na Figura 11, são contabilizados conforme os veículos acessam e saem da rótula.

Figura 11- Padrão de uma rotatória



Fonte: DNIT, 2006

Pelo Manual de Projeto de Interseções (DNIT, 2006), será necessário contabilizar o volume de veículos incidentes na rotatória. Para tanto, vamos elaborar as matrizes de origem e destino embasado na conversão em fatores de equivalência. VP é relacionado a veículos de passeio, CO/O para caminhões e ônibus, SR/RE semirreboques e reboques, M motos, B bicicletas e SI para pedestres, Tabela 2.

Tabela 2: Fatores de equivalência em unidades de carros de passeio (UCP)

Tipo de veículo	VP	CO/O	SR/RE	M	B	SI
Fator de equivalência	1	1,5	2	1	0,5	1,1

Fonte: DNIT (2006)

O volume de veículos na entrada na rotatória serão dados em função de Z1, Z2, Z3 e Z4. Para os que estiverem circulando na via rotular, serão representados por K1, K2, K3 e K4.

$$K1 = O3D2 + O4D2 + O4D3 \quad (1)$$

$$K2 = O1D3 + O1D4 + O4D3 \quad (2)$$

$$K3 = O2D1 + O1D4 + O2D4 \quad (3)$$

$$K4 = O2D1 + O3D1 + O3D2 \quad (4)$$

Em que:

$OiDj$ : fluxo com origem no acesso i e destino em j.

Para a Capacidade básica na entrada:

$$Gi = 3600 * \left(1 - \left(tmin * \frac{ki}{nk*3600}\right)^{nki} * \frac{nzi}{tf} * \exp\left[-\frac{ki}{3600} * \left(tg - \frac{tf}{2} - tmin\right)\right]\right) \quad (5)$$

Em que:

$Gi$ : capacidade básica da entrada i, em UCP/h;

$Ki$ : fluxo de tráfego na pista da rótula, em UCP/h;

$nki$ : número de faixas de tráfego na pista da rótula antes da entrada i;

$nzi$ : número de faixas de tráfego na entrada i;

$tg$ : valor médio do intervalo mínimo entre veículos na rótula, em segundos (recomendado 4,1 s)

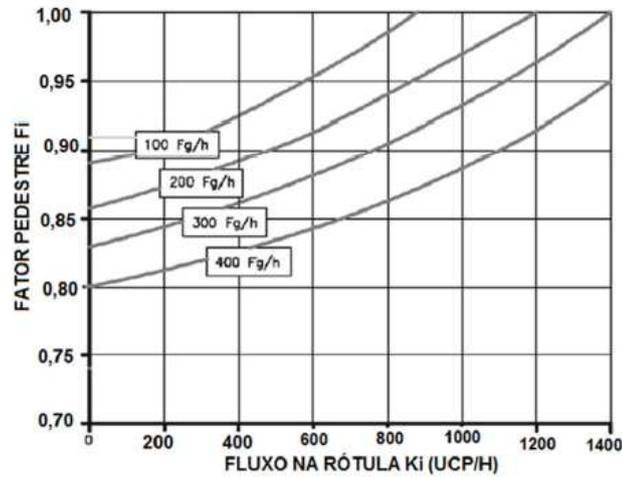
$tf$ : valor médio do intervalo entre dois veículos sucessivos da entrada, que entram no mesmo intervalo

de veículos da rótula, em segundos (recomendado 2,9 s);

$tmin$ : valor mínimo do intervalo entre veículos na rótula, em segundos (recomendado 2,1 s);

Para o fator de pedestres é útil o ábaco ilustrado na Figura 12:

Figura 12 – Fluxo de pedestres



Fonte: DNIT, 2006

A capacidade de entrada será dada por:

$$C_i = G_i f_i \quad (6)$$

$C_i$ : capacidade da entrada, em UCP/h;

$G_i$ : capacidade básica entrada, em UCP/h;

$f_i$ : fator de pedestre

Capacidade residual de cada via

$$R_i = C_i - Z_i \quad (7)$$

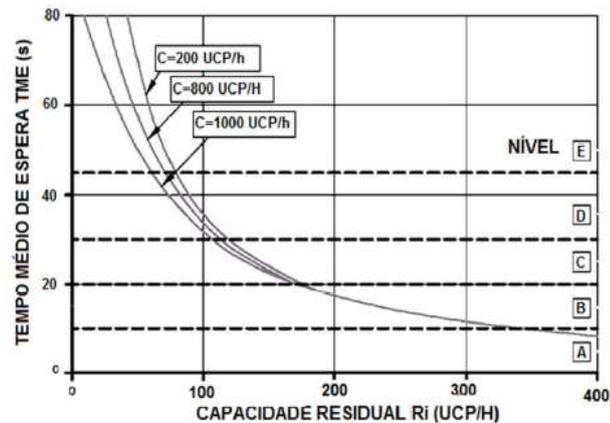
$R_i$ : capacidade residual, em UCP/h;

$C_i$ : capacidade da entrada, em UCP/h;

$Z_i$ : fluxo de entrada, em UCP/h

O tempo de espera para cada veículo acessar a rótula será dado pelo ábaco na Figura 13, com base nos fatores já calculados.

Figura 13 – Tempo de espera



Fonte: DNIT, 2006

O Tempo médio de espera para acessar a via será calculado por meio de:

$$TMER = \frac{\sum_4^1 (Z_i * TME_i)}{\sum Z_i} \quad (8)$$

Sendo:

*TMER*: tempo médio de espera na rótula, em segundos;

*Z<sub>i</sub>*: fluxo na entrada *i*, em UCP/h;

*TME<sub>i</sub>*: tempo de espera na entrada *i*, em segundos

Após o cálculo, poderemos verificar o nível de serviço da rotatória conforme o tempo de espera pela Tabela 3. Variando entre um tempo de espera com boa eficiência, menor ou igual que 10 segundos recebendo nível A, até um tempo péssimo, superior a 45 segundo recebendo nível F.

Tabela 3: Nível de serviço

Tempo médio de espera TME (s)	Nível de serviço
$\leq 10$	A
$\leq 20$	B
$\leq 30$	C
$\leq 45$	D
$> 45$	E
$R_i < 0$	F

Fonte: DNIT, 2006

Conforme o nível de serviço estiver comprometido, com tempos de espera altos que geralmente passam dos 40 segundos, haverá formação de filas e assim engarrafamentos que podem resultar em acidentes. Outro problema oriundo de atrasos será um maior tempo dos veículos parados e ligados, ocasionando em maior concentração de gases poluentes emitidos.

## 2.7 IMPACTOS DA POLUIÇÃO

Com os processos acelerados de industrialização, expansão da malha urbana e o aumento da população, os países da América do Sul têm lidado com alterações profundas nos cenários sociais, econômicos e também ambientais. A emissão de poluentes é uma preocupação crescente no contexto de países emergentes, pois a alta concentração dos níveis destes podem causar danos à saúde humana, desequilibrar ecossistemas e contribuir com as mudanças climáticas (AROCA, PARRA & BORGE, 2022).

O aumento da população em zonas urbanas trouxe consigo efeitos como aumento do tráfego, com consequentes atrasos, acidentes e emissões de poluentes como o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono (CO), e óxido de azoto ( $\text{NO}_x$ ). De maneira a serem tomadas medidas mitigadoras para redução destes elementos no cenário urbano, são necessários estudos visando contabilizar, processar e decidir quais ações devem ser empregadas para tornar o ambiente menos nocivo (AROCA, PARRA & BORGE, 2022).

Na contextualização das rotatórias, é necessário salientar o efeito motor envolvido nas múltiplas paradas e acelerações que os veículos efetuam conforme o tamanho da fila que encontram, de maneira a acessarem o sistema e trafegarem para o destino. Assim, modelar as características do nível de serviço viário é necessário em rótulas tendo em vista a hipótese de que essas múltiplas paradas gerarão maior poluição microrregional.

Modelos internacionais auxiliam pesquisadores e gestores na estimativa de carga poluidora gerada pelo tráfego local ou regional. Utilizando critérios relacionados a velocidade, tempo de espera para acessar a via, volume e tipologia de veículos. Um dos mais utilizados é o europeu COPERT (*Computer Program to calculate Emissions from Road Transport*), desenvolvido como uma calculadora na estimativa de gases gerados pela combustão veicular (ANDRYCH-ZALEWSKA et al, 2021).

Dentro da dinâmica de formação de filas em rotatórias e dos efeitos dos poluentes nessas regiões, autores já discutiram a necessidade de metodologias avaliativas. Através dos estudos de Coelho, Farias e Roupail (2006) é correlacionado o efeito da aceleração e paradas conforme os veículos acessam a via e o uso da força motor, que desencadeará maior emissão de gases. No trabalho proposto por MAĐZIEL (2022), testaram-se diversos tipos de veículos individuais e os efeitos destes dentro dos níveis de poluentes lançados de acordo com a tipologia, velocidade e múltiplas paradas prosseguidas por acelerações.

A gestão do volume de poluentes lançados em cenários locais, pode ser usada por gestores de tráfego na melhor adequação de medidas que favoreçam mudanças específicas para cada caso, tais como investimentos em melhoramento de vias, em transporte público, ciclovias e mesmo em veículos mais sustentáveis (ANDRYCH-ZALEWSKA et al, 2021).

Desta forma, especialistas na área de engenharia de tráfego podem sugerir mudanças que não sejam onerosas ou muito complexas, destacando o poder da mobilidade por transporte público, bem como pela inserção deste modo como estratégia para minimizar a utilização do elevado número de veículos de transporte individual que sobrecarregam as malhas urbanas.

## 2.8 EMISSÃO DE POLUENTES

A classificação da emissão de poluentes pode ser dividida de acordo com a escala envolvida. Sendo a primeira escala a macroscópica: utilizada em regiões de estudo regional (intermunicipal). A segunda é a mesoscópica em escala local (municipal) e a última microscópica: útil em localidades específicas, como vias ou bairros (MAĐZIEL et al., 2022). Independente do modelo analisado, certos fatores funcionam como constantes em estudos de caso. Como a velocidade, aceleração, frenagem, gradiente viário e mesmo fatores não calculáveis, referentes a parâmetros do usuário (MAĐZIEL et al., 2022).

Para calcular os fatores de emissão de poluentes é necessário a análise do modelo internacional proposto por COPERT, desenvolvido em países europeus e útil no cálculo de emissões e gastos energéticos veiculares (BEBKIEWICZ et al., 2021). Cada veículo emitirá um valor de poluentes de acordo com as categorias: veículos de passageiros (carros), vans (menor que 3,5 toneladas), caminhões e ônibus (ambos maiores que 3,5 toneladas) e motocicletas (JAWORSKI; LEJDA; MAĐZIEL, 2017).

O método COPERT indica a utilização da equação abaixo para ser calculada a emissão advinda do componente de exaustão:

$$E_i = \sum [\sum (FC_{j,m} * EF_{i,j,m})] \quad (9)$$

Na qual:

$E_i$  = emissão advinda do componente de exaustão (g);

$FC_{(j,m)}$  = consumo de combustível para um veículo m(g);

$EF_{(i,j,m)}$  = fator de emissão por tipo de veículo m (g/kg);

Com base nas características do veículo é possível estimar a exaustão de emissão individual deste, de acordo com a equação:

$$VSP = 1,1 * V * \alpha + 9,81 * \theta * 0,132 * V + 0,000302 * V^3 \quad (10)$$

Onde:

$VSP$  = potência do veículo (kW/t);

$V$  = velocidade (km/h);

$\alpha$  = aceleração veicular (m/s<sup>2</sup>);

$\theta$  = gradiente (inclinação) viária (%);

Para o cálculo de emissões em uma determinada via, como rotatórias e ruas em microrregiões, pode ser usada a seguinte equação:

$$TEj = \sum k, m (EF_{j,k,l} * TV_{k,m} * L_m) \quad (11)$$

Em que:

$TEj$  = emissão de poluentes em trecho (g/h);

$EF_{j,k,l}$  = média de fatores de emissão (g/km);

$j$  = componente emitido;

$k$  = classe veicular;

$l$  = velocidade;

$TV_{k,m}$  = volume de tráfego (veic/hora);

$m$  – Trecho estudado (m);

$L_m$  = largura da seção estudada (km).

A seguir, serão discutidos como modelos estatísticos podem servir de parâmetro na avaliação e constatação de eventuais dados faltando, falhos ou que não representem a amostra inicial de modo satisfatório. Sendo de extrema importância na validação numérica da carga poluidora emitida dentro das especificações já discutidas sobre a rotatória, tempos de espera e capacidade viária.

## 2.9 INFERÊNCIA BAYESIANA

O modelo de inferência em estatística é destinado a descrever, em função de uma distribuição estatística, um teste de hipóteses. Quanto ao modelo baseado na inferência bayesiana, é obtida a informação tendo em vista a dedução do processo gerado, envolvendo cálculos probabilísticos *a priori*, aferição lógica e observação dos resultados *a posteriori* (RIZZO, 2008).

Baseado em uma metodologia estatística, a inferência bayesiana é construída tendo por parâmetro um conjunto de dados como informação a ser discutida. Combinando eventos em que as variáveis contidas podem ou não se relacionarem de alguma maneira como, por exemplo, a chance de chuva após um dia ensolarado. Muitas vezes são utilizados princípios de lógica e programação na avaliação do modelo em que é discutido, na elaboração de códigos buscando determinar a distribuição posterior (RIZZO, 2008).

Considerando um espaço de probabilidades  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  em que  $\Omega$  é um espaço fundamental não vazio, tal que  $A \subseteq \Omega$ ,  $\mathcal{F}$  é a representação da família de dados e  $P$  a probabilidade:

- Para todo  $A$ ,  $0 \leq P \leq 1$ ;
- Se  $P(\Omega) = 1$ ;
- Se existem  $A$  e  $B$  disjuntos,  $P(A \cup B) = P(A) + P(B)$ ;
- Se existem  $A$  e  $B$  não disjuntos,  $P(A \cap B) = P(B)P(A|B)$ ;

Embasado nos princípios probabilísticos podemos:

$$P(B) = \sum_i P(A_i \cap B) = \sum_i P(B|A_i)P(A_i)$$

Reorganizando:

$$P(A \cap B) = P(B|A)P(A) = P(A|B)P(B)$$

E assim surge o teorema de Bayes:

$$P(A_i|B) = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{P(B)} = \frac{P(B|A_i)P(A_i)}{\sum_i P(B|A_i)P(A_i)} \quad (12)$$

Em que:

$A_i$  = condição *a priori*;

$B$  = conjunto de dados;

$A_i|B$  = *a posteriori*;

Vamos utilizar um exemplo descrito por (WEISBERG et al, 2011). Dispondo de uma informação inicial  $\theta$ , expressa pela estatística  $p(\theta)$ , amparada de uma quantidade aleatória  $X$  relacionada a  $\theta$  em que  $p(x|\theta)$  para que seja respeitada a condição de  $X=x$ . Podemos escrever a distribuição amostral em termos da Inferência Bayesiana do seguinte modo:

$$p(\theta|x) = \frac{p(x,\theta)}{p(x)} = \frac{p(x|\theta)p(\theta)}{p(x)} = p(x|\theta)p(\theta) / \int p(\theta, x)d\theta \quad (13)$$

A ideia trazida pela equação 13 é a de que por meio de uma informação inicial, no caso  $\theta$ , podemos por meio de uma amostra gerada ( $X$ ) para um conjunto de dados inclusos ( $x$ ), verificar a distribuição *a priori*  $p(\theta)$  ao calcular o comportamento *a posteriori* de  $\theta$  que resultará em  $p(x|\theta)$ .

A distribuição *a priori* é essencial dentro do contexto de qualquer Inferência Bayesiana e é o que definirá os resultados vistos *a posteriori*, fornecendo a probabilidade para os diversos valores possíveis antes da simulação. Na *posteriori* serão obtidas as informações probabilísticas de interesse no estudo, com base em análises da média e o desvio padrão fornecendo assim as convergências estatísticas requeridas. Para ambos os estados de Inferência Bayesiana, caberá a importância determinística da adoção de uma mesma classe de distribuição probabilística a ambas (WEISBERG et al, 2011).

Podemos resumir o Teorema de Bayes em função da *posteriori* sendo a *priori versus* a verossimilhança, que é obtida pelos testes de hipótese, dividida pela margem de erro:

$$posteriori = \frac{priori \times verossimilhança}{marginal}$$

Dentro da abordagem proposta pela Inferência Bayesiana, é necessário estipular parâmetros definidores para o método (WEISBERG et al, 2011):

- As variáveis inclusas serão modeladas como variáveis aleatórias;
- O parâmetro da aleatoriedade descreverá a funcionalidade metodológica;
- Os valores correlacionados ao método são elaborados em vista das distribuições de probabilidades;

- A distribuição *a posteriori* é a única solução para o problema analisado.

A inferência bayesiana é de extrema importância quando se busca entender comportamentos analíticos de uma população a partir de uma amostra. Aplicando a um exemplo no qual em uma floresta temos conhecimentos de uma amostra com  $n$  árvores, em que  $Y$  indivíduos desta estão afetados por uma doença. Toda a população será representada por  $\theta$  árvores doentes, e em equiparação resultamos em  $Y = y$  para correlacionarmos. A partir disso chegamos na probabilidade que modelará o problema:

$$f(y|\theta) = Bin(n, \theta) \quad (14)$$

Pelo princípio da inferência bayesiana a população avaliada de  $\theta$  árvores doentes, baseado na observação de que uma pequena população comparativa  $Y = y$ , aplicando uma distribuição (binomial no exemplo) teremos que existe uma alta taxa de verossimilhança de 95% quando arbitramos o valor de  $\theta = 10$  e conforme aleatoriamente aumentamos o dado veremos que o *p-valor* se mantém dentro do padrão abaixo de 0,05. Assim, constatamos que a construção e aplicação do modelo é viável.

O principal desafio neste método é encontrar uma quantidade de dados a serem utilizados, na tentativa de conciliar a distribuição *posterior* com a convergência inicial dada pela *priori*. De maneira a garantir uma aproximação que seja confiável e sirva para convergir os dados, será necessário implementar metodologias mais complexas e eficientes: Método de Monte Carlo e Cadeias de Markov (RIZZO, 2008).

## 2.10 MÉTODO DE MONTE CARLO

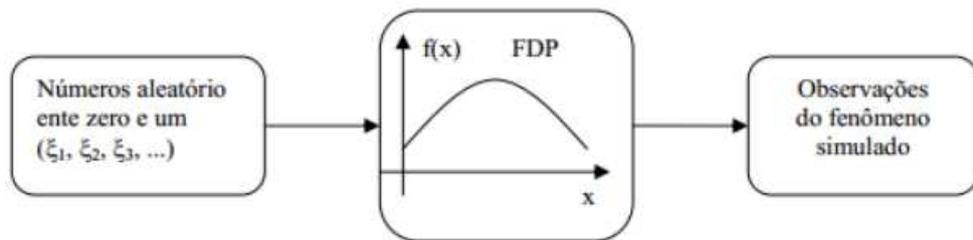
O método de Monte Carlo pode ser descrito como uma maneira de estimar valores de conjuntos numéricos, com quantidades desconhecidas ou mesmo de natureza estocástica, pelo princípio da inferência estatística. O desenvolvimento desta metodologia estatística se deu pelo matemático Stanislaw Ulam em 1946 durante um jogo de paciência, no qual o jogador deve prever a probabilidade de obter em uma ou mais jogadas a carta sucessiva de maneira a ter sucesso no empreendimento (BENOV, 2016).

O Método de Monte Carlo trata de utilizar números aleatórios de modo a gerar amostragem suficiente para abordar e resolver o problema por simulação. Utilizando os preceitos amparados na teoria bayesiana, tal metodologia visa criar, observar e aferir, baseado

em estatística, dados que só poderiam ser concluídos por experiência própria. Como em um certo número de jogadas para conseguir uma certa carta em um baralho (BREITMAN, 2012).

As principais características do Método de Monte Carlo residem em um sistema de dados ou equações, que sejam representados por meio de funções de densidade das distribuições de probabilidade (FDP) dentro da amostragem obtida. Visando ‘ $n$ ’ repetições até a obtenção, por meio de técnicas estatísticas, médias e desvio padrão, incidindo, da tendência geral catalogada. Pela Figura 14, um conjunto de números aleatórios, que são oriundos das variáveis estabelecidas, podemos gerar uma função de distribuição de probabilidade (FDP) e, embasados na curva normal, é possível estabelecer as conjecturas do fenômeno simulado (BREITMAN, 2012).

Figura 14 - Generalização para o Método de Monte Carlo



Fonte: BREITMAN, 2012

Considerando uma função pela qual seja possível gerar amostras, a partir de uma função geradora  $f(\theta)$ , com base em dados relacionados que irão determinar o perfil da nossa hipótese ( $h(\theta)$ ):

$$h(\theta) = f(\theta) / \int f(\theta) d\theta \quad (15)$$

A partir da amostragem obtida e a construção de um teste de hipóteses, será possível agregar, ainda mais amostras  $g(\theta)$  a fim de definir qual simulação convergirá até ser encontrada a melhor convergência. Suponha que exista  $m$  a definir uma relação da amostragem:

$$\frac{f(\theta)}{g(\theta)} \leq m, \text{ para } \theta > 0 \quad (16)$$

Vamos gerar as convergências:

- 1) Gere  $\theta_i = g(\theta)$ , sendo  $i = 1, 2, 3, \dots$ ;
- 2) Parametrize a uniformidade estatística para  $\mu$  entre 0 e 1;

- 3) Se  $\mu = \frac{f(\theta)}{mg(\theta)}$ , retornar o valor 1;
- 4) Gerar valores até acabarem as iterações.

Após cessarem as análises, será possível entender as discrepâncias e zonas de convergência amostrais, possibilitando entender se os dados seguem ou não as distribuições propostas.

## 2.11 CADEIAS DE MARKOV

Conforme ROBERT & CASELLA (2010), um processo estocástico é uma Cadeia de Markov no qual para que um evento ocorra em um certo estado, os eventos que ocorreram no passado ou vão surgir no futuro, são independentes deste atual. Em outras palavras, a probabilidade de transição para qualquer estado particular dependerá apenas do estado atual. Em termos de probabilidade, podemos descrever o método por meio de:

$$P(X_{t+1} = y | X_t = x, X_{t-1}, \dots, x_0) = P(X_{t+1} = y | X_t = x) \quad (17)$$

Vamos gerar valores de uma distribuição  $\pi(\cdot)$  embasado em uma cadeia de Markov, em que os mesmos são homogêneos, irredutíveis e ergódigos. Ou seja, são amostras que representam um mesmo conjunto de dados, que não podem ser reduzíveis e eventos futuros dependem do que ocorreu no passado, respectivamente.

- Dado que  $X^t, t = 0, 1, 2, \dots$

$$X^t \xrightarrow{t \rightarrow \infty} \pi(x)$$

- $\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n g(X_i^t) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} \mathbb{E}_\pi(g(X_i))$  (18)

Alguns conceitos chaves para que o método funcione são:

- A cadeia é dependente por definição;
- A média amostral dos valores simulados é estimada pela média teórica;
- A cadeia é irredutível: existe uma probabilidade de serem alcançados quaisquer pontos a partir de qualquer ponto em um número finito de iterações;
- Cadeia aperiódica: não é possível retornar a um ponto anterior.

Vamos definir um Kernel, ou um núcleo, para a cadeia de Markov:

- Para um caso discreto, definimos por:

$$\bullet P(X_{t+1} = y | X_t = x) \quad (19)$$

- No caso contínuo, se  $k(\cdot | x)$  é a transição que será definida por:

$$\bullet P(X \in A | x) = \int_A k(y|x) dy \quad (20)$$

## 2.12 MÉTODO DE MONTE CARLO VIA CADEIAS DE MARKOV

O método Markov Chain Monte Carlo (MCMC) trata de um conjunto de algoritmos úteis na avaliação amostral aplicada nas distribuições de probabilidade. Dado como exemplo um conjunto  $f$ , podemos construir uma amostra  $f(\cdot)$  que seja irreduzível e aperiódica com distribuição estacionária. Devendo ser possível a construção da Cadeia de Markov com a probabilidade de transição invariável conforme o tempo passa, com cada estado dependente apenas no evento anterior (ROBERT, CASELLA; 2010).

A ideia da metodologia de simulação é a partir de um processo estocástico  $\{f(X_0, X_1, X_2, \dots, X_t)\}$ , em que a distribuição para  $X_t$  dependa unicamente apenas de  $X_{t-1}$ . Ou seja, apenas o passo anterior é importante neste tipo de modelagem. Assim, a cada nova iteração apenas o valor obtido na etapa prévia será decisivo na obtenção da probabilidade futura.

$$P(X_t \in A | X_0, X_1, X_2, \dots, X_{t-1}) = P(X_t \in A | X_{t-1})$$

Considerando que  $t \rightarrow \infty$  a amostra  $X_t$  convergirá para a distribuição atribuída, com os valores finais diferentes e independentes dos atribuídos no início.

Podemos generalizar o método MCMC amparado pela equação 21, demonstrada em (ROBERT, CASELLA; 2010):

$$g(X_m) = \frac{1}{m} \sum_{t=1}^m g(X_t) \quad (21)$$

Devendo convergir com probabilidade igual a 1, em que  $E[g(X)]$  em relação a  $m \rightarrow \infty$ , sendo  $X$  estacionária,  $\pi$  a esperança. Agora, vamos aplicar para um  $t = 0$  para  $X^0 = x^0$ , em que  $X^t = (X_1^t, \dots, X_p^t)^t$  em relação a uma distribuição inicial  $g$  na condição de  $f(x^0) > 0$ :

Dado  $X^t = x^t$ , para gerarmos  $X^{t+1}$  propõe se:

- 1) Criar uma amostra  $X^*$  dentro de uma distribuição  $g(\cdot | x^t)$ ;
- 2) Calcular a razão  $R(x^t, X^*)$  na qual:

$$\bullet R(u, v) = \frac{f(v)g(u|v)}{f(u)g(v|u)} \quad (22)$$

- 3) Gerar um valor para  $X^{t+1}$  de acordo com:

$$\bullet X^{t+1} = \begin{cases} X^* & \text{com probabilidade } \min\{R(x^t, X^*), 1\}, \\ x^t & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (23)$$

- 4) Incremente  $t$  e retorne ao passo 1;
- 5) Monitore a convergência do algoritmo, caso existirem falhas é necessário gerar mais observações;
- 6) Trace e observe a distribuição a *posteriori*;
- 7) Observação das estatísticas para a distribuição a *posteriori* (média e desvio padrão).

Cada umas das iterações observadas acima, passa de um estado para o outro, sendo de fundamental importância obter, e concomitantemente, realizar a amostragem das probabilidades condicionais obtidas  $f(X_i | X_1^t, X_2^t, \dots, X_p^t)^t$ . A condicionante principal da metodologia de simulação MCMC é focada para que uma determinada variável, quando gerados os padrões de aleatoriedade baseados na média e desvio padrão, ocorrerá a independência desta das demais. Busca-se promover uma simplificação na elaboração das distribuições probabilísticas, valendo-se da ideia de que apenas os últimos estados são decisivos (ROBERT, CASELLA; 2010).

A aplicação de MCMC é de grande importância para a resolução de problemas envolvendo Inferência Bayesiana. Uma das dúvidas quanto ao método reside no número de iterações necessárias visando a efetiva convergência para o estado de equilíbrio sugerido. Para tanto, é viável a elaboração de inúmeros estudos com tamanhos amostrais variáveis, 50 amostras, depois 100, 1000, etc. até não serem mais visuais as mudanças de comportamento. Utilizando de gráficos com os parâmetros de média e desvio padrão dos dados iniciais, pela análise da distribuição a *posteriori* mostrando as variações, estados e estimativas para as iterações executadas (ROBERT, CASELLA; 2010).

### 2.13 ALGORITMO DE METROPOLIS HASTING

De modo a otimizar e gerenciar os pontos de convergência que ocorrem ao rodar o algoritmo do Método das Cadeias de Markov surge o método de Metropolis Hasting. Baseado na dependência do último elemento residir apenas em seu antecessor, é possível dividir o aspecto generalista deste método em dois aspectos: a hipótese e a aceitação desta. A hipótese reside em uma proposta de que qualquer valor aleatório escolhido, manterá as características estatísticas de média e desvio padrão. Já a aceitação influencia na tomada de decisão em admitir ou não o dado avaliado, valendo-se das ideias discutidas na inferência bayesiana (RIZZO, 2008).

O algoritmo de Metropolis Hasting é uma classe dentro do Método das Cadeias de Markov, visando implementar processos de produzir amostras a partir de distribuições, em que, de outros modos poderiam ser extremamente trabalhosos ou inoperantes. Para tanto, vamos supor a existência de uma distribuição unidimensional  $\pi$ , que será o nosso alvo para a convergência. Daí podemos concluir que tal algoritmo convergirá pelas Cadeias de Markov resultados com uma aproximação dos da amostra inicial (RIZZO, 2008).

A partir de um kernel, representativa da frequência ou variância amostral, que motivará o andar da implementação em relação a uma posição inicial em direção à uma nova: digamos de  $x$  em relação a um novo local  $y$ . Sendo  $Q$  uma distribuição contínua em  $y$  dado  $x$ , escrevendo de maneira  $Q(y|x)$ . Podemos escrever a função de probabilidade em termos de:

$$\int Q(y|x)dy = 1 \quad (24)$$

Traçando a partir da distribuição  $\pi$ , com um kernel  $Q$ , em passos o modelo do algoritmo de Metropolis Hasting está ilustrado na sequência:

- Inicializar com  $X_1 = x_1$ ;
- Para  $t = 1, 2, \dots$ 
  - Amostra  $y$  tirada de  $Q(y|x)$ ;
  - Computar

$$A = \min \left( 1, \frac{\pi(y)Q(x_t|y)}{\pi(x_t)Q(y|x_t)} \right) \quad (25)$$

Em que  $A$  representa a probabilidade de aceitação amostral.

- Com a probabilidade de aceitação definida em  $x_{t+1} = y$ . Senão  $x_{t+1} = x_t$ .

Satisfazendo a  $Q(y|x) = Q(x|y)$  para todo  $x, y$ . Para o caso de simetria servirá melhor a probabilidade de aceitação sendo:

$$A = \min \left( 1, \frac{\pi(y)}{\pi(x_t)} \right) \quad (26)$$

O algoritmo de Metropolis Hasting é muito versátil, com uma aplicação que viabiliza a teoria Bayesiana ao aproximar a distribuição posterior a *priori* em relação ao tempo *versus* a probabilidade. Podendo ser aplicada em amostragens de distribuições multidimensionais (RIZZO, 2008).

Devido ao caráter generalista do método e das possibilidades de serem aplicados diversos modelos de distribuição probabilísticos, basta o desenvolvimento condicional a *posteriori*. Mas de maneira a ter condições mais condizentes com os dados, é proposto subdividir o método de acordo com o nível da cadeia ser simétrica ou independente.

- Para cadeias simétricas:

$$A = p((Q_1^t)|(Q_1^{t-1})) = 1, \frac{p(Q_1^t|Q_1^x)}{p(Q_1^{t-1}|Q_1^x)} \quad (27)$$

- Para cadeias independentes:

$$A = p((Q_1^t)|(Q_1^{t-1})) = p(Q_1^t) \quad (28)$$

As cadeias independentes apresentam a particularidade de a própria distribuição condicional resultar na *posteriori*. Assim, a probabilidade de aceitação será igual a 1.

## 2.14 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

As necessidades de melhorias de sistemas logísticos urbanos, bem como das pressões acerca das mudanças climáticas, levaram especialistas a buscarem inovações na área de mobilidades. Os critérios abordados neste capítulo focaram em construir as etapas para os estudos das emissões de poluentes no tráfego: primeiramente, considerando os princípios da urbanização e mobilidade, passando para os sistemas de contagem veicular e os critérios de localização e detecção de objetos, citando o método de cálculo do nível de serviço proposto

pelo DNIT e o princípio da poluição e mensuração desta pelo COPERT. Ao final, os dados possibilitaram a geração de amostras grandes visando verificar a convergência destas e resultando na proposta do MCMC, dentro das distribuições estatísticas para a média e desvio padrão.

### 3 METODOLOGIA

#### 3.1 TIPO DE PESQUISA

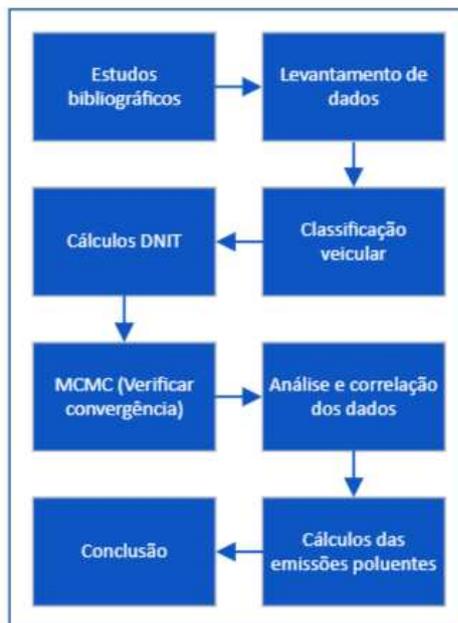
O procedimento para o desenvolvimento deste trabalho pode ser considerado um estudo de caso, definido como uma análise de natureza empírica que investiga um determinado fenômeno, geralmente contemporâneo, dentro uma situação real, quando as fronteiras entre o fenômeno e o contexto em que ele se insere não são claramente definidas (MIGUEL, 2007).

#### 3.2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Evidenciou-se que muitas cidades enfrentam problemas com mobilidade urbana bem como isso reflete nas questões relativas a aspectos sociais, econômicos e ambientais. De maneira a verificar falhas no tráfego, este estudo foca em simular computacionalmente o nível de serviço e principais gases oriundos de veículos em uma rotatória. Fazendo uso de levantamento de dados por contagem veicular, verificação do nível de serviço pelo DNIT (2006), simulações por MCMC e análise dos poluentes na microrregião. Posteriormente, propõe-se medidas mitigadoras enfatizando reduzir os tempos de espera para acessar a rótula e da poluição no local. Tal metodologia será explicada em detalhes nos próximos capítulos.

A Figura 15 retrata as etapas que serviram de apoio na realização deste estudo. A primeira etapa foi a busca de publicações que embasaram a temática. Depois foram realizadas as capturas dos vídeos, com levantamento e modelagem dos dados.

Figura 15 - Etapas metodológicas para estudo de caso



Fonte: Autor, 2022

Dentro do levantamento bibliográfico, foi possível organizar as publicações, contendo trabalhos inerentes ao tema estudado: programação, simulação, metodologias e critérios que permeiam tais áreas. O tratamento dos dados foi necessário visando otimizar o conteúdo a ser analisado e verificar as condições para obtenção, tais como, posicionamento da câmera, local de estudo, etc. No levantamento dos dados, os vídeos foram armazenados e compilados. Na análise ocorreu o processamento das informações e programação, visando correlacionar os dados conforme as metodologias estatísticas aplicadas.

Por meio das pesquisas realizadas, como a realizada por MEMON et al (2018), ficou claro a necessidade de alocação precisa da câmera de monitoramento, de modo a capturar tanto a origem quanto destino na rótula. A metodologia da coleta buscou aproveitar o máximo possível das configurações de alinhamento da câmera disponível, visando a ideal forma de registrar a geometria e padrão de entrada e saída viária, de modo a permitir um correto rastreamento dos veículos. Adaptar o equipamento, que filmava em um ângulo de 180°, foi feito embasado em registrar os quatro braços viários e facilitar na fase de programação. Recebendo as informações dos aparelhos e, tratando-se de um sistema conectado a servidores, foi possível guardar os vídeos catalogados em padrão mp4.

A etapa de programação foi focada em facilitar a conversão dos vídeos, para os padrões de chegada e saída da via em cada tipo de veículo. O que resultou em arquivos *csv* contendo em valores numéricos a quantidade de carros, motocicletas, ônibus e caminhões. Possibilitando a aplicação da metodologia DNIT (2006), estruturado na obtenção dos tempos de espera e nível de serviço da via, que servirá como principal parâmetro determinístico de como a via está lidando com o tráfego existente.

As simulações computacionais desenvolvidas e aplicadas a metodologia MCMC, servem de guia na avaliação e diagnóstico para a amostra ao possibilitar a verificação das convergências. Resolvendo disparidades, tais como valores faltando ou fora da tendência numérica estimada pelo desvio padrão e variância. Para tanto, os dados foram simulados e computados para uma amostra de 30000 valores em relação as distribuições normais, beta e gama, com posterior análise pelo teste KS.

De modo a entender como um tempo de espera alto e um nível de serviço ruim, afetam não só a mobilidade, mas também o meio ambiente, foi proposto o uso do método COPERT na medição dos principais poluentes na microrregião vista. Por meio de fatores elencados a via (greide, aceleração, velocidade, etc.) e os dados de veículos incidentes, tempo de espera e as classes destes, foram simulados os quatro principais poluentes oriundos da combustão: CO<sub>2</sub>, CO, HC e NO.

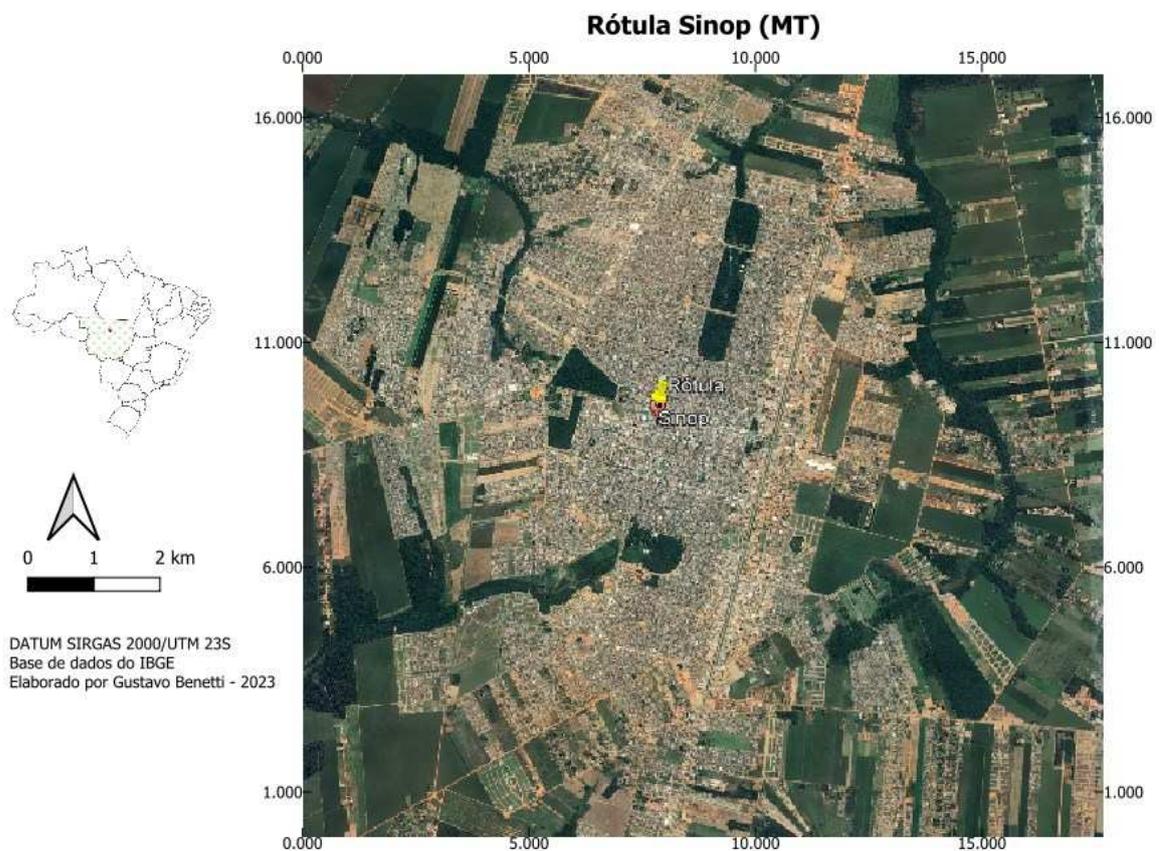
Feito os estudos para a amostragem original, composta pelos dados obtidos e simulados, foram avaliados os resultados para o nível de serviço, tempo de espera e poluentes emitidos. De posse do que foi atingido, simulou-se até conseguir um resultado menos danoso para a mobilidade na via e pela mitigação dos níveis para os poluentes identificados, através da alteração e nova simulação dos objetivos propostos. Por meio do aumento no número de ônibus, redução proporcional no número de carros e motocicletas, para o mesmo valor de caminhões, baseado no princípio do uso do transporte público visando reduzir a formação de filas na via.

As etapas da estrutura metodológica definida aqui serão detalhadas no próximo capítulo, com uma explicação mais aprofundada de como os dados foram obtidos e trabalhados, levando em conta as dificuldades observadas. A forma como o sistema de contagem foi programada, baseado no princípio da otimização e transformação dos dados em planilhas, a metodologia do DNIT, MCMC, distribuições e COPERT. E, por fim, os resultados observados neste projeto.

### 3.3 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Neste estudo de caso foi selecionada a rotatória que está presente na região central da cidade de Sinop MT, ilustrada na Figura 16, entre os cruzamentos das avenidas das Itaubás e Júlio Campos. Localizada em um local com alto volume de tráfego incidente, conectando os polos norte/sul e leste/oeste no município. Com passagem de usuários que acessam em direção ao trabalho, estudo, lazer e para acessar o aeroporto e a rodoviária.

Figura 16 – Delimitação da área



Fonte: Autor, 2023

O total de veículos na cidade de Sinop MT equivale a 5,63% do total no estado e com um aumento significativo de 1,66% em 2021 na frota em relação ao ano 2020. Atualmente o município conta com o quarto maior número de veículos emplacados do estado com cerca 140 mil, para uma população estimada de 148.960 habitantes (SONOTICIAS, 2021).

Na cidade de Sinop MT são enfrentados problemas de mobilidade urbana, com falta de acessibilidade para ciclistas e pedestres devido a uma infraestrutura construtiva voltada para os veículos automotores. O uso frequente de veículos na cidade, que já alcançou 147 mil veículos no ano de 2022 conforme SONOTICAS (2023), tem afetado o meio ambiente, o tempo de espera em vias saturadas, geração de ruídos, emissão de poluentes e consumo de combustíveis fósseis (FERRAZ et al, 2020).

O número de emissões de gases poluentes de CO e CO<sub>2</sub> na cidade de Sinop demonstram valores superiores à 44,6% do limite de 130 g/km que é imposto pelos padrões dos Índices de Mobilidade Urbana e Sustentabilidade. Na região do estudo, no cruzamento das avenidas da Itaubás com Júlio Campos, os níveis de ruídos médios já atingiram 70,90 decibéis para um limite recomendado de 65 (FERRAZ et al, 2020).

Localizada no núcleo urbano, o lugar escolhido já vem sendo destaque em matérias jornalísticas sobre problemas de congestionamento e alagamentos. Conflitos ocorrem principalmente entre os motoristas que trafegam e buscam acessar os diversos setores municipais, com filas de veículos formadas que sobrecarregam a malha viária e dificultam o deslocamento nas quatro direções.

A Secretária de Trânsito de Sinop (STU) dispõe de algumas câmeras, cedidas pela prefeitura do município e que a princípio eram da Polícia Militar com ênfase na segurança pública. As imagens de vídeo seriam usadas, nos cruzamentos em que existe o sistema de monitoramento atuante, na perspectiva de avaliar as causas para possíveis acidentes de trânsito.

Na cidade existem câmeras em alguns cruzamentos principais, mas devido ao fato da equipe reduzida e do número de computadores, apenas foquei em uma rotatória. A escolha da mesma foi embasada na possibilidade de, estudando e propondo soluções para aquele local, seja possível entender o método para outros locais com problemas de fluidez do tráfego. Outras vias apresentavam câmeras não tão bem posicionadas para a coleta dos dados, como presença de vegetação, prédios ou *outdoors* que desfocavam o objetivo deste estudo.

Neste trabalho houve uso de vídeos obtidos de filmagens oriundas da Secretária de Trânsito Urbano (STU). O período de filmagens também foi limitado a aproximadamente 3 meses devido ao limitado tempo do pesquisador na cidade, além do tempo de conversão das filmagens em arquivos legíveis ser demorado.

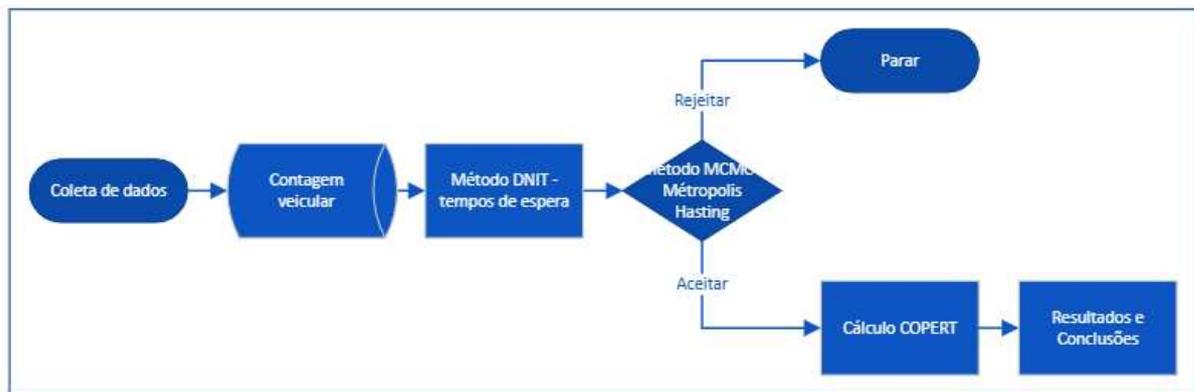
## 4 ESTUDO DE CASO

O presente capítulo tem como objetivo apresentar os itens referentes ao estudo de caso, contendo a proposta para coletar os dados, realizar a contagem veicular, métodos MCMC, as emissões de poluentes lançados e finalmente os resultados.

### 4.1 PROPOSTA PARA AVALIAR EMISSÕES VEICULARES EM ROTATÓRIAS

A proposta deste estudo pode ser resumida nas seguintes etapas representadas pela Figura 17. A descrição de cada uma dessas fases será discutida nos tópicos a seguir.

Figura 17 – Proposta do Estudo



Fonte: Autor, 2023.

As etapas definidas na Figura 17 são dependentes conforme os procedimentos ocorrem, como por exemplo, a coleta de dados é essencial para a contagem veicular. Assim, buscar locais de monitoramento foi talvez a etapa mais importante neste estudo, visto que os dados devem representar o que é visto na realidade. A relação de entrada e saída dos veículos, que é descrita pelos braços da rotatória, servirá de base para a verificação se esse sistema de controle de tráfego está operando com base nos critérios do DNIT (2006), principal metodologia para estudos tráfego nacional.

Embasado no princípio de atendimento, a serventia da via está atrelada principalmente ao volume de veículos que entra na rotatória, capacidade viária, tempo de espera e volume dentro da rótula. Finalmente o nível de serviço será parametrizado de acordo com esses fatores elencados, a fim da avaliação final de possíveis falhas, tendências futuras para o tráfego e gestão urbana de acordo com o DNIT (2006).

Para facilitar o procedimento de contagem, a programação em Python surgiu como uma ideia visando a automatização deste estudo. A contagem era feita conforme o vídeo era lido e no final a conversão da informação dos tipos de veículos na via ficava gravado em um arquivo de planilha digital. Foram usadas bibliotecas importadas para ler, como o Open CV, descrever a geometria, COCO e identificar feições presentes pelo YOLO. A captura dos elementos foi feita com base em linhas de identificação das feições dos objetos, possibilitando gerar o número e classe de veículos que circulam na via.

Após isso, outro programa em Python foi desenvolvido e compôs os cálculos do nível de serviço, capacidade, volume viário e os tempos de espera para cada vídeo. Com uso extenso de ábacos, fórmulas e tabelas visando assimilar dados e converter para relacionar em termos comuns, como transformar o número de carros, motos, ônibus e caminhões em uma só constante, ou prever qual saída um veículo seguirá após entrar em um determinado braço, etc. Objetivando assim, análise dos dados fundamentados pela metodologia DNIT (2006), que é útil para pesquisadores projetar, simular e analisar condições de tráfego pelo fator nível de serviço que indicará principalmente o tempo que os usuários ficam parados antes de acessar a via.

Como os dados amostrais trabalhados são estocásticos, foi necessário identificar e eliminar discrepâncias em possíveis valores alcançados relacionados aos tempos de espera. Elaborando um outro programa computacional em que o método MCMC serviu com a finalidade de gerar uma amostra maior de tempos dentro do mesmo desvio padrão e encontrar, pelas distribuições de probabilidades, a representatividade dos valores. Dentro do princípio de que a rotatória funciona nos modelos estatísticos presentes na teoria das filas: veículos que entram por um braço (ramal) e são atendidos até saírem por um canal de atendimento (outro braço), a metodologia servirá precisamente para eliminar as discrepâncias originadas por essa espera dos motoristas na via, visto que cada braço representa diferenças de serventia e os tempos não são constantes.

Visando observar como os valores das amostras do MCMC estavam se comportando, foi importante averiguar os padrões de convergência e divergência numérica baseado em modelos distributivos de frequência, entrando em cena as distribuições gama, beta e normal. Essas distribuições trouxeram valores dentro da amostra e modelo distributivo melhor que parametrizaram os dados, auxiliando na significância deste estudo. De posse disso, cálculos

das emissões via COPERT com os dados da melhor distribuição possibilitaram obter os resultados e conclusões de quais poluentes são mais significativos para a situação analisada.

De maneira a mitigar problemas encontrados por falhas em nível de serviço, capacidade viária inferior ao necessário e a emissão de poluentes que agravam os parâmetros ambientais, todo o processo foi simulado mais uma vez com a hipótese de redimensionar a frota que acessa a via. Recalculando para reduzir o número de carros e motos, baseado no cenário urbano de outras cidades com tráfego melhor adaptado, além de aumento em relação ao conjunto de ônibus para levar mais pessoas e tentar reverter os engarrafamentos, perdas de serventia viária e mitigação dos poluentes na microrregião.

A seguir serão explicados os procedimentos para coleta, implementação, simulação e geração das informações usadas, com maior esclarecimento de cada fase. Com os dados numéricos, figuras ilustrativas e resultados que possibilitaram repensar no modelo vigente para servir de estudos avançados com a idealização de reverter as falhas.

#### 4.2 COLETA DE DADOS

Na cidade de Sinop (MT), as rotatórias estão presentes em cruzamentos que ligam importantes partes do município, servindo como um sistema para escoamento de tráfego, refletindo nos interesses econômicos, sociais e culturais de toda a região. A serventia desses sistemas de tráfego está atrelada ao número de veículos que compõem a malha urbana, bem como fatores relativos a acidentes, falhas na mobilidade e engarrafamentos.

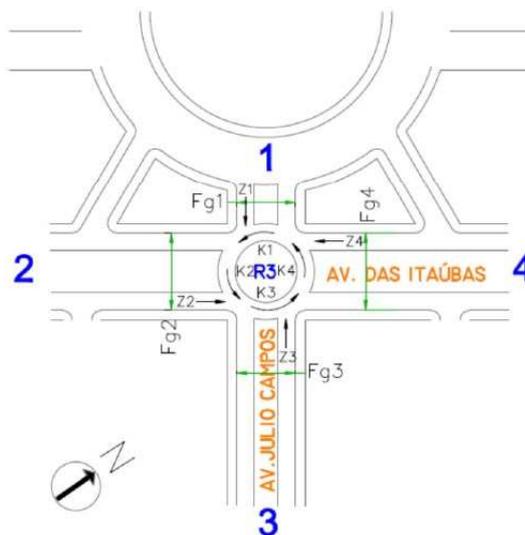
Para esse estudo, foram utilizadas imagens a partir de uma câmera de vídeo localizada em uma dessas rotatórias de Sinop. Por meio da parceria com a Secretária de Trânsito de Sinop (STU), foi possível obter vídeos provenientes de câmeras de segurança. Os arquivos de filmagens são provenientes de três meses de gravação: setembro, outubro e novembro de 2021. Sendo que os dados eram mesurados entre os horários de sete e oito da manhã, meio dia e uma hora, cinco as seis. Para três dias durante a semana (entre segunda e sexta), alternando a data. Ao final foram contabilizados 30 arquivos de filmografia, cada um com uma hora de duração.

A escolha da via em questão se deu em função da presença da câmera no local e ausência de barreiras visuais que afetariam as contagens, tais como: árvores, prédios, *outdoors*, etc. A STU apontou a via devido aos problemas que apresentava, como sucessivos

congestionamentos, acidentes e falhas. A adoção dos horários também representa os picos em relação ao volume de tráfego, no qual os congestionamentos são mais frequentes segundo o órgão.

Os padrões de origem e destino na rotatória de estudo, úteis nos cálculos da capacidade viária, nível de serviço e tempos de espera, foram definidos para servir de guia na identificação dos trechos. Os padrões utilizados seguem para cada braço da via embasado na Figura 18, onde  $i$  designa o braço (1 a 4), em que  $F_{gi}$  representa os trechos,  $Z_i$  o volume viário nas origens e  $K_i$  o volume viário circulando na rótula em direção aos destinos.

FIGURA 18 – Padrões de Origem e Destino



Fonte: NETO (2014)

#### 4.3 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE CONTAGEM VEICULAR

O uso de computadores na descrição de fenômenos é de grande utilidade na avaliação de tarefas com grande empreendimento de gastos e esforços. Como os processos de contagem veicular envolvem tempo, quantidade razoável de dados e equipamentos, otimizar as ações é agilizar e garantir maior eficiência no diagnóstico e solução dos problemas constatados. Neste estudo a automação da contagem de veículos que incidem na rotatória foi fundamental para que das 30 horas de vídeos, fossem extraídas as informações de tráfego referente aos carros, caminhões, ônibus e motocicletas que circulavam na via.

O procedimento de leitura dos vídeos foi realizado de maneira automatizada em Python, com uso das bibliotecas Open CV, banco de dados COCO (*Common Objects in*

*Context*) que delimita padrões geométricos de cerca de 80 objetos do cotidiano. Sendo os alvos deste estudo já inseridos com suas feições, bem como da rede delimitadora YOLO (*You Only look Once*), que através de linhas de reconhecimento de padrões de entrada e saída, contará apenas uma única vez cada objeto.

Pensando como uma rede neural, o algoritmo implementado trabalhou na localização do objeto em movimento na tela, encontrando os *frames* que modelam o veículo e diferenciando o mesmo de outros que se encontram no entorno. Neste processo, a imagem completa é detectada e gera um contexto que é representada por uma caixa que fixa o mesmo do início até o fim do aparecimento na tela. Porém a contagem só é acionada quando os veículos passarem pelas linhas delimitadoras conforme Figura 19.

Figura 19 – Contagem sendo executada



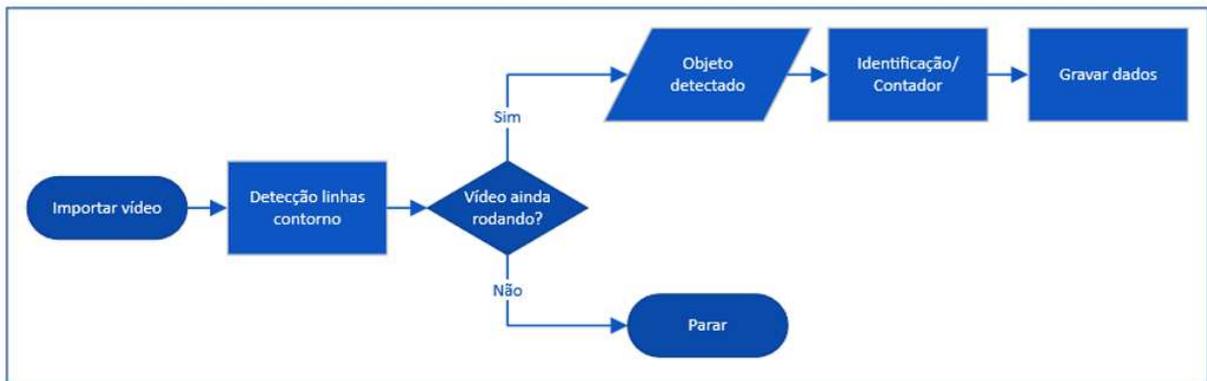
Fonte: Autor (2022)

A contagem envolve a criação de um sistema *tracker* e de um código para leitura dos vídeos, contabilização e geração dos arquivos em formato de planilha digital *csv*, dividindo os mesmos nas classes de veículos: automóveis, ônibus, caminhões e motocicletas. Os arquivos gerados foram separados de acordo com as quatro entradas e saídas da via rotular, pelos padrões de origem e destino.

As etapas de extração dos dados seguiram o modelo de implementar um código pelo método Open CV, ilustrado na Figura 20, no qual é feita a leitura do vídeo *frame* por *frame*. Após isso são definidas as linhas de identificação veicular, que acionará o *tracker* nesta multitarefa de maneira a capturar as feições do objeto em cena, modelo demonstrado na

Figura. Por meio disso, um parágrafo de códigos realizará a contagem separada dos objetos. Vale lembrar que existe uma divisão no vídeo que serve para classificar tanto os veículos da origem, entrando na rotatória, quanto os do destino, na saída. Após isso, o algoritmo verifica se acabaram os *frames* lidos e converte os dados em um arquivo *csv*.

Figura 20: Modelo do contador desenvolvido



Fonte: Autor, 2023

#### 4.4 IMPLEMENTAÇÃO METODOLOGIA DNIT

Com os dados advindos da etapa de contagem veicular, foram especificados os volumes de veículos classificados em: carros de passeio (VP), caminhões/ônibus (CO), semirreboques/reboques (SR/RE), motocicletas (M), bicicletas (B). Devido a impossibilidade de serem computados os pedestres, que posteriormente é estabelecido na forma de um valor tabelado e as bicicletas, que nem sempre seguem as leis de trânsito e acabam por trafegarem na contramão, tais modalidades não foram levantadas pelos contadores.

Dentro da implementação das normas de Engenharia de Tráfego estipuladas pelo DNIT (2006), que estão descritas na revisão bibliográfica no capítulo 2, houve a necessidade de estimar com fórmulas, tabelas e ábacos convertidos para a linguagem de programação em questão, o quanto a via estava funcional ou não. Para obtenção dos valores de ábacos contou-se com o *software* livre *Get Data Graph Digitizer*, a fim de serem computadas as equações envolvendo dados apresentados em figuras, auxiliando assim na implementação do sistema.

Através da avaliação dos tempos de espera em cada entroncamento foi computada a média destes valores, referente ao tempo gasto para acessar a via conforme os “*gaps*” surgem para o motorista. E então, obteve-se o nível de serviço referente a toda a rotatória,

possibilitando uma avaliação do comportamento e da capacidade da via em questão relacionando a serventia da mesma.

Computado pelo sistema de contagem e classificação veicular, tem-se o total de veículos que estão na entrada de cada braço “ $Z_n$ ” aguardando os possíveis “*gaps*” para acessar a via, Tabela 4. A contribuição de cada braço da via, em relação aos veículos circulando dentro da rotatória, é dado em função dos parâmetros “ $K_n$ ” levantados. Cada linha representa os 30 vídeos analisados com os valores de  $Z_i$  e  $K_i$  variando de 1 a 4 que são os braços da rotatória.

Tabela 4: Composição do fluxo de veículos na via rotular

Z1	Z2	Z3	Z4	K1	K2	K3	K4
278	563	210	393	346	416	388	482
331	392	230	478	415	501	281	400
378	88	444	660	598	640	87	389
73	360	573	864	781	557	240	642
611	262	563	574	553	744	218	579
532	808	532	468	465	629	567	868
205	271	403	472	443	414	192	462
264	278	149	192	178	289	201	272
164	377	686	266	337	265	258	739
774	453	321	510	457	815	355	504
282	744	124	69	77	228	506	520
722	254	455	547	512	803	222	492
269	610	120	288	246	348	418	440
228	743	263	254	248	301	501	625
359	626	157	481	404	522	435	478
117	692	409	324	329	268	459	708
491	608	225	262	247	481	434	519
393	771	228	308	283	443	532	615
420	65	225	404	357	517	75	208
341	258	610	318	363	414	194	612
102	442	139	438	367	326	295	358
319	528	151	618	510	576	368	417
456	82	558	506	500	601	89	473
361	254	269	290	276	411	193	351
198	572	412	277	294	295	388	641
204	665	286	422	383	384	449	599
115	544	230	240	230	218	363	487
194	594	533	548	527	451	402	747
98	336	278	279	270	229	226	404
109	703	240	378	339	295	466	585

Fonte: Autor, 2022

A partir dos cálculos de veículos circulando na via obtém-se, pelos critérios do DNIT (2006), os tempos de espera em segundos em cada um dos quatro braços da via analisada. Os tempos de cada braço viário foram gerados e, a partir destes consegue-se o tempo médio em segundos, no qual os motoristas terão que aguardar de modo a acessarem a rótula de maneira segura, Tabela 5.

**Tabela 5: Dados levantados pelo Método DNIT**

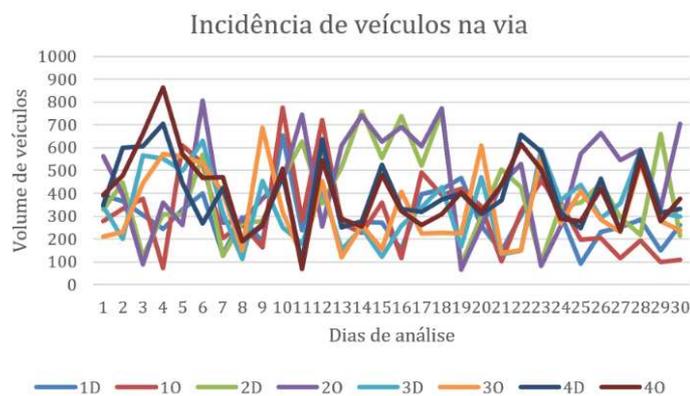
TME1	TME2	TME3	TME4	media
6	8	6	7	6,5
6	7	6	7	6,5
7	5	9	10	8
5	6	9	15	7,5
9	6	9	8	8,5
8	13	8	7	8
6	6	7	7	6,5
7	6	6	6	6
6	7	11	6	6,5
12	7	6	8	7,5
7	13	5	5	6
10	6	8	8	8
6	9	5	6	6
6	12	6	6	6
7	9	6	7	7
6	11	7	6	6,5
8	9	6	6	7
7	12	6	6	6,5
7	5	7	7	7
7	6	10	6	6,5
5	7	6	7	6,5
6	8	6	9	7
7	5	11	8	7,5
7	6	7	6	6,5
6	9	7	6	6,5
6	10	6	7	6,5
6	9	6	6	6
6	9	8	8	8
6	7	6	6	6
5	11	6	7	6,5

Fonte: Autor, 2022

A ideia de automatizar o processo de catalogação de imagens e vídeos contendo informações relevantes é baseada no princípio do ganho de tempo, otimização e segurança na tomada de decisões. Assim, o volume viário de carros, motos, caminhões e ônibus observado conforme a incidência em entrada e saída proposto, poderá compor um importante mecanismo no gerenciamento do tráfego e, se for o caso, intervenções na infraestrutura disponível ou em uma alocação de recursos mais adequada na execução de novas infraestruturas e reestruturação das existentes.

Os volumes de tráfego registrados foram contabilizados e representados em função da incidência destes na rótula, variando entre pouco menos de 100 veículos até quase 850 no total de veículos nas horas de pico dos levantamentos. Conforme os 30 arquivos contabilizados, os dados aparecem na Figura 21 em função dos padrões de acesso e saída, em que por exemplo 1D representa o destino em 1, e 1O a origem em 1.

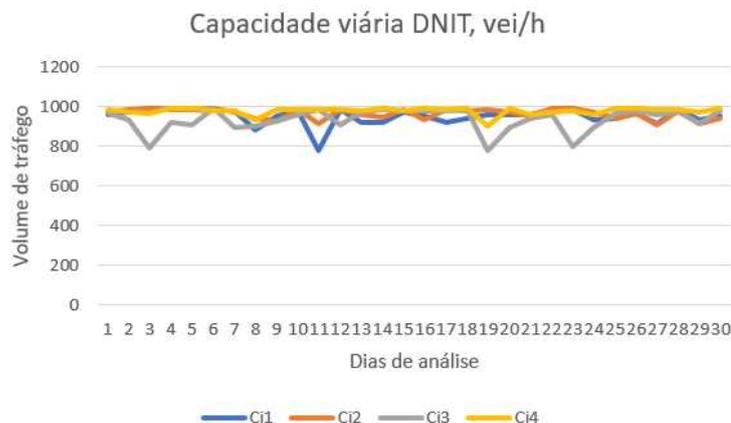
FIGURA 21 - Incidência de veículos na via



Fonte: Autor, 2022

A capacidade viária calculada pelo método do DNIT e com a medida em veículos por hora (ve/h), Figura 22, pode-se inferir uma quase linearidade dos valores de capacidade viária em função do tráfego incidente nos quatro braços da rótula.

FIGURA 22 - Capacidade viária DNIT



Fonte: Autor, 2022

Calculado em função dos critérios do DNIT (2006), os tempos de espera mostraram valores para cada um dos pontos de origem: Avenida das Itaubás sentido Norte: 57,06 segundos; Avenida das Itaubás Sul: 46,72 segundos; Avenida Júlio Campos sentido Oeste: 74,8 segundos e Avenida Júlio Campos sentido Leste: 41,90 segundos. O tempo médio de espera obtido é de 55,12 segundos, com um nível de serviço resultante igual a E, sendo considerado ruim devido a ser um indicativo de considerável aumento na fila de espera.

Sendo assim, o método do DNIT mostra que existe um tempo de espera relativamente elevado para a rotatória em questão. Com um nível de serviço igual a E, o que indica a existência de retenções de veículos que chegam à via culminando em atrasos. A capacidade máxima, em termos de volume e utilidade da rotatória, já foi atingida e podem ocorrer colapsos generalizados caso ocorram acidentes ou eventos não controlados.

#### 4.5 MÉTODOS DE MONTE CARLO VIA CADEIAS DE MARKOV (MCMC)

A teoria bayesiana é bastante útil para interpretar estatisticamente valores dentro de amostras com tendências não uniformes, baseado na aleatoriedade numérica inerente aos dados estocásticos. Arelado a esse modelo matemático está o método MCMC, amplamente ligado a grandes amostras com disparidades numéricas que podem ser empregados em cenários logísticos de engenharia de tráfego. Aplicando em rotatórias, a utilidade metodológica se encaixa nas teorias *a priori*: dados dos tempos de espera calculados;

*posteriori*: dados convergidos pelo MCMC; e pela verossimilhança: relação numérica entre os dados.

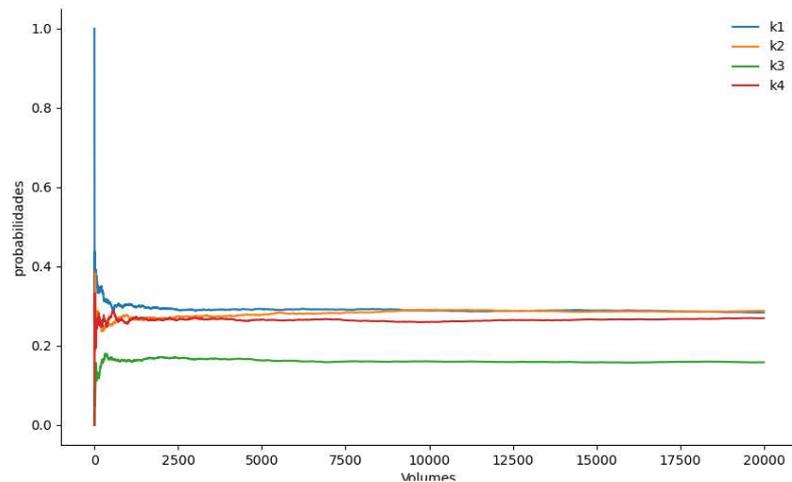
Para verificar a convergência dos dados logrados pela contagem veicular e calculados de acordo com os critérios do DNIT (2006), será útil o desenvolvimento de uma hipótese *a priori* e outra *posteriori*. A primeira hipótese representa os próprios dados obtidos e a ideia de que tais valores sejam realmente uma representação fidedigna amostral. A comprovação destes será realizada após a simulação que é conhecida como *posteriori*, já com os dados convergidos e trazendo as amostras grandes que terão desvio padrão e média idêntica a original.

Nesta etapa verificam-se os resultados obtidos pela simulação dos dados resultantes nos cálculos do DNIT, simulando para três curvas de distribuição contínua: Normal, Beta e Gama. Mais uma vez, embasado nos critérios na metodologia MCMC, demonstraremos que os valores seguem uma padronização e refletem uma garantia de aceitabilidade dos dados. Refletindo por fim, quais são os tempos de espera mais visibilizados.

Os estados amostrais levantados foram testados para avaliação dos valores estacionários, convergência e tendências estatísticas. O método cria amostras, dentro do desvio padrão e média originais, para variáveis contínuas buscando avaliar a densidade dentro de uma margem de correlação. A distribuição *a priori* servirá de apoio, por exemplo, quando se quiser simular eventos embasados em parâmetros limitados, como dados incompletos e limitados por pouca amostragem (RIZZO, 2008).

A probabilidade empírica associada à rotatória foi computada embasada em qual das vias é mais solicitada. Focando nos veículos que entram e circulam pela rótula ( $K_i$ ), baseado nas estatísticas de qual dos braços viários é o mais carregado pelo tráfego. Pela Figura 23, observa-se que tanto K1 quanto K2 são numericamente iguais nas solicitações, sendo os lados mais solicitantes. K4 aparece logo em seguida e K3 é o braço com menor trafegabilidade de veículos. As convergências representam que pelo princípio MCMC atingiu-se o estado de equilíbrio após as 30.000 iterações realizadas e as probabilidades de os volumes viário serem constantes, sugerindo qual a chance de um motorista escolher qual origem/destino da rótula.

Figura 23 - Convergência da distribuição de chegada de veículos pela via



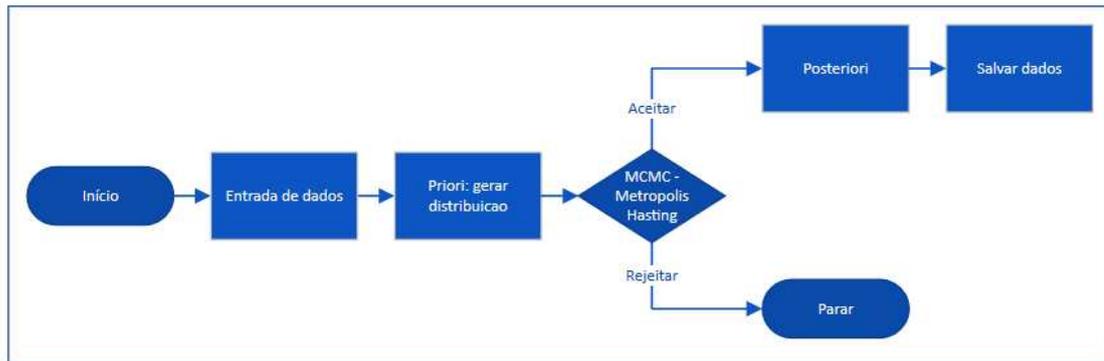
Fonte: Autor, 2022

Para as distribuições estudadas refletirem no conjunto dos dados uma aplicação viável da teoria bayesiana, será necessário convergir a amostra para uma distribuição *a priori* e depois a *posteriori*, indicando para onde os dados amostrais fluem e se estes pertencem a um padrão específico. Para tanto, tendo por base os valores originais dos tempos de espera médios e dos desvios padrão obtidos, foram modeladas amostras com o perfil para uma população flutuante de 0 a 30000, com ênfase nos 1000 valores que mais apresentam concordância dos valores (curva de tendência).

Esses valores foram testados para amostras contendo 50000 dados, mas como não houve significativa variância, pois o perfil *a priori* não oscila mais acima de 30000 amostras, foi optado por questão de melhor visualização gráfica a manutenção das 30000 amostras geradas. A tendência de convergência dos valores já havia sido constatada nos primeiros 1000 valores apresentando, com a dinâmica da confluência amostral indicando estabilidade numérica.

Retomando o que foi discutido no capítulo sobre Teoria Bayesiana, para computarmos a estimativa da probabilidade a partir da evidência (hipótese *a priori*), e com isso chegar à amostra posterior, deveremos seguir algumas etapas de simulação. O algoritmo utilizado pelos princípios do MCMC otimizará esse processo ao organizar, gerar e comparar a amostra embasado nos valores fixados, na média e principalmente pelo desvio padrão original, Figura 24. Ou seja, conforme a distribuição escolhida (normal, beta ou gama), teremos as curvas de comparação em relação a como o modelo está se comportando.

Figura 24 – Processo implementado para o MCMC



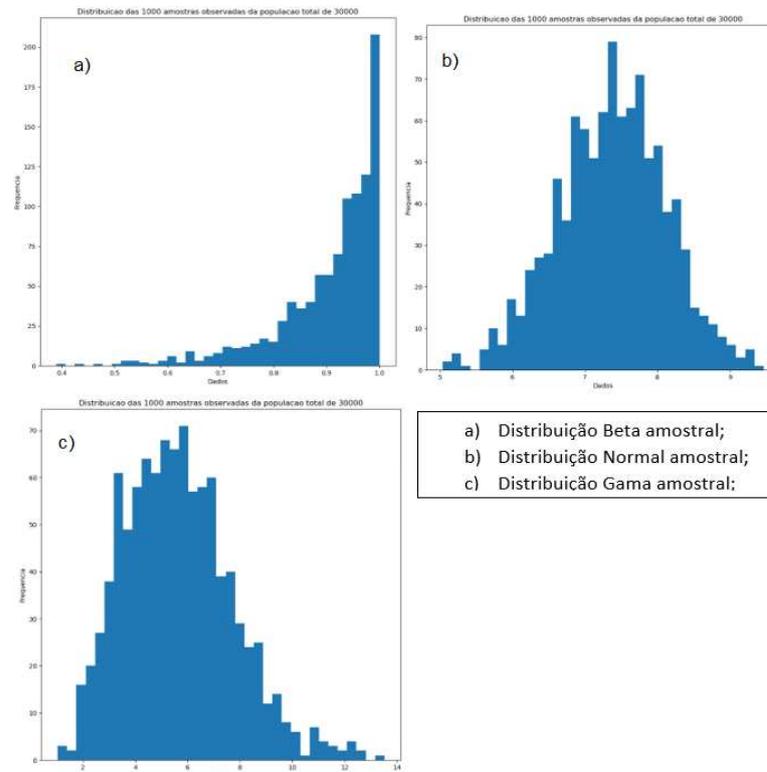
Fonte: Autor, 2022

#### 4.6 DISTRIBUIÇÕES PELO MCMC

Utilizando os princípios definidos pelo MCMC serão apresentados os resultados de como as distribuições se comportaram, baseado nas amostras simuladas sob as mesmas condições de contorno (tamanho, desvio padrão e número de convergências) porém com modelos de distribuição diferentes visando observar quais os possíveis desvios de tendência podem ocorrer com os dados, assim procurando um modelo mais confiável.

A Figura 25 serve de guia na avaliação da convergência para as distribuições beta (a), normal (b) e gama (c) todas para uma amostragem de 1000 valores gerados e simulados, extraídas da população total. Para a distribuição beta (a), existe uma perspectiva que pela curva de distribuição, segue por padrão uma confluência dos dados à direita. Identificando um comportamento contínuo em relação aos dados crescerem tendo em vista a frequência com que aparecem. Observa-se que a partir do valor amostral gerado, que se inicia em zero, logo em torno de 1.0 a convergência já é obtida. Resultando em ser o valor máximo de convergência estatística amostral. Para distribuição normal (b), existe uma tendência aproximada a formação do tipo “sino” que é típica da distribuição normal. A distribuição gama (c) obtida com a amostragem mostra a relação entre dados e a frequência. O comportamento da geometria da curva e das zonas de convergência em b e c, normal e gama demonstram proximidade numérica para os valores em comum.

Figura 25 - Distribuição amostral extraída



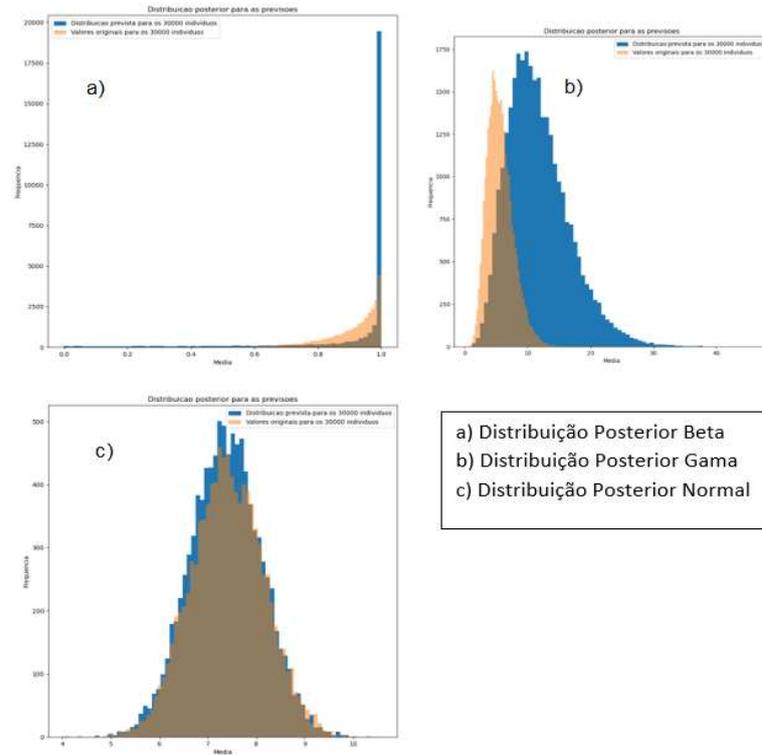
Fonte: Autor, 2022

Pela distribuição posterior, que usa da comparação dos 30.000 indivíduos, é visto que: primeiramente com os valores originais lançados a *priori* e depois com a previsão a posterior, Figura 26, subdividida em beta (a), gama (b) e normal (c). No qual observa-se a avaliação de densidade amostral, resultando em uma compatibilização (sobreposição) e depois a frequência cresce exponencialmente para o valor da média máxima gerada na distribuição beta. Na gama traça-se uma simetria determinística entre a distribuição original (*priori*) e a simulada pela previsão (*posteriori*), o comportamento dos dados reflete o modelo deste tipo de simulação, como é possível perceber a continuidade dos valores pela sua tendência de crescimento com relação à frequência.

Observa-se que o conjunto de amostras teve uma variação mais abrangente do que a distribuição beta, com os dados variando de 0 a quase 40 na gama e de 5 a 10 na normal. A distribuição normal modelada para o modelo de simulação amostral *a priori* e *a posteriori* foi a que apresentou a melhor aproximação simétrica das outras analisadas anteriormente. Demonstrando que tanto a amostra gerada quanto o modelo de tendência MCMC trouxe uma

convergência estatística na qual os dados confluem praticamente dentro da mesma frequência em relação às médias.

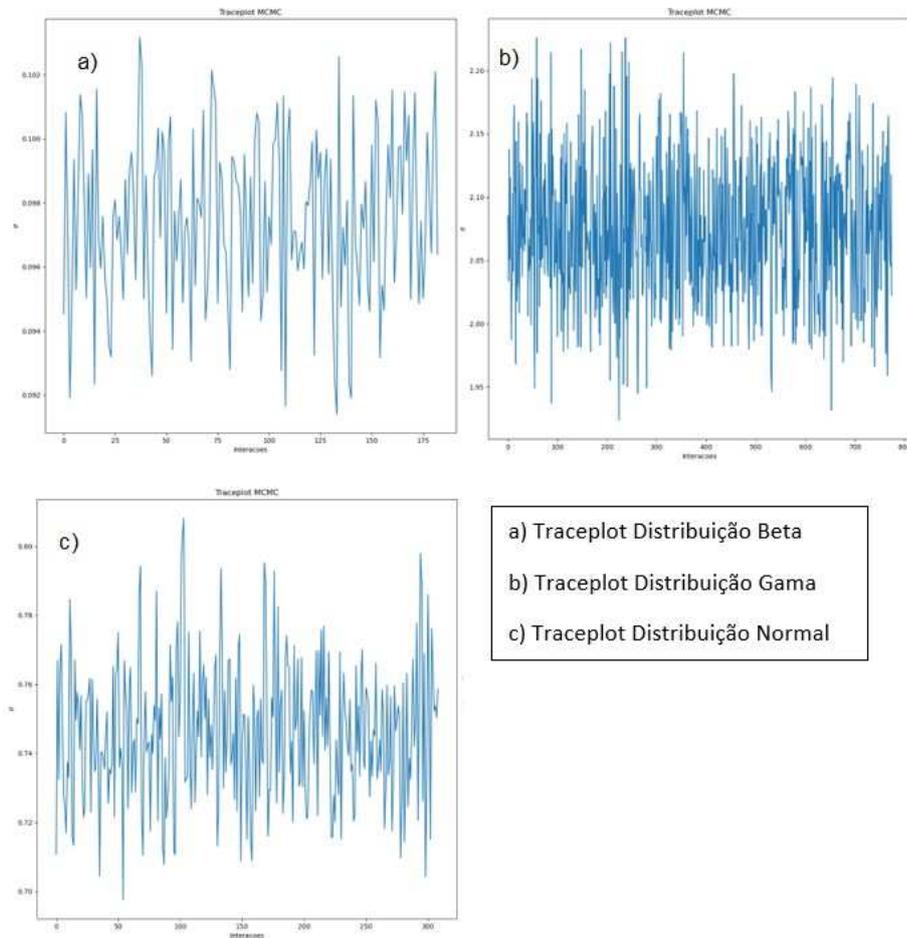
Figura 26 - Distribuição Posterior



Fonte: Autor, 2022

Na sequência obteve-se o *Traceplot*, Figura 27, que reflete as interações versus o desvio padrão entre as distribuições beta (a), gama (b) e normal (c) Nota-se uma estabilidade entre a normal e gama.

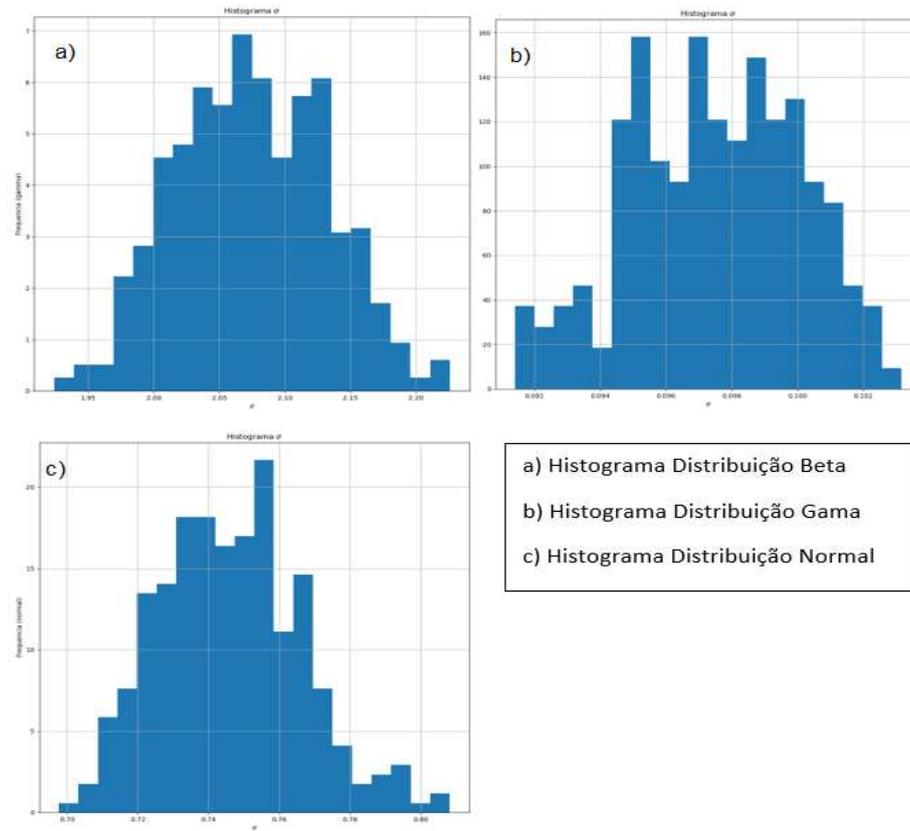
Figura 27 – Gráfico das iterações geradas por distribuição



Fonte: Autor, 2022

O histograma, na Figura 28, para as distribuições demonstrando o desvio padrão versus a frequência ilustra uma tendência simétrica. Mais uma vez a normal serve de guia, principalmente na análise do desvio padrão.

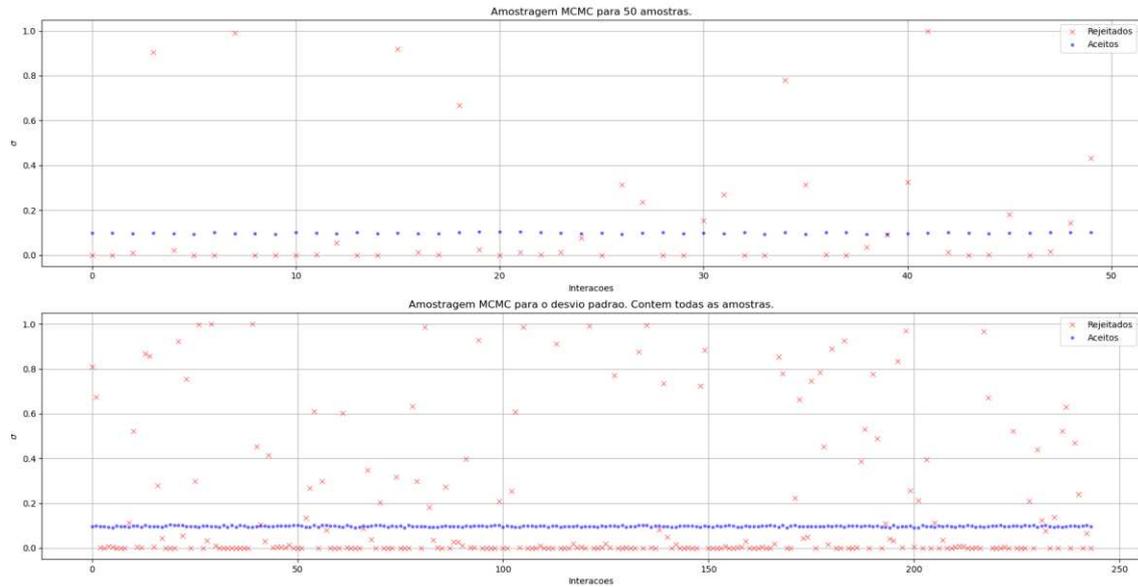
Figura 28 – Histograma das distribuições



Fonte: Autor, 2022

Testando o desvio padrão pelas interações realizadas na distribuição beta, observam-se quais são os valores aceitos e rejeitados dentro da amostra gerada, Figura 29. Para tanto, seja com 50 ou mais, é concluído que o desvio padrão mantém-se o mesmo para a distribuição beta.

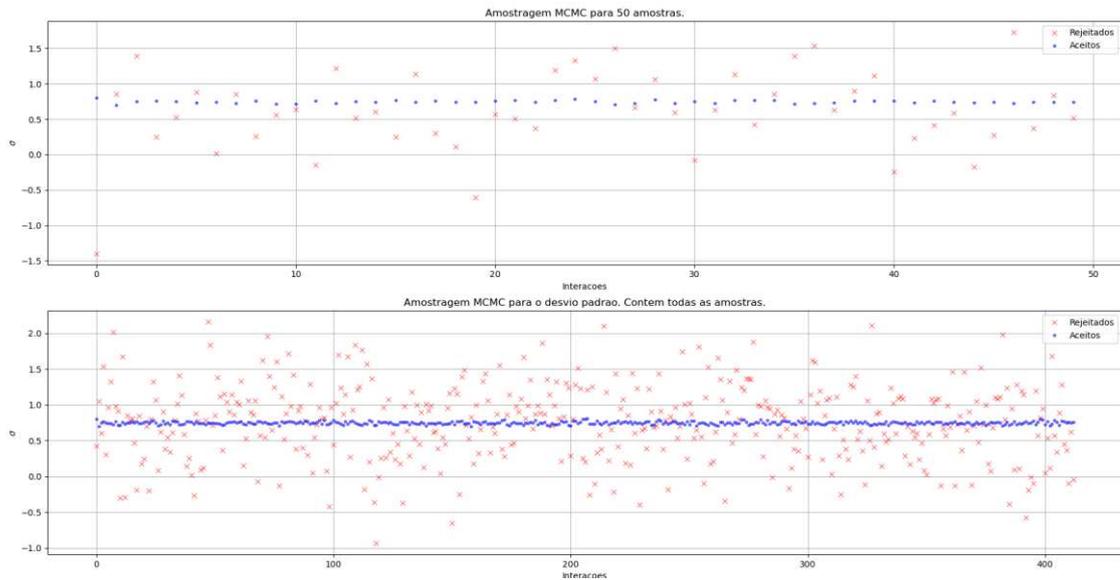
Figura 29 – Gráfico de tendência para o desvio padrão da distribuição beta



Fonte: Autor, 2022

Na amostragem para o desvio padrão na normal, para as 50 amostras e com vista de todo o perfil contendo os 30.000 valores simulados. Vemos que o desvio padrão não teve significativa variância quanto ao aumento dos valores gerados, Figura 30.

Figura 30 - Gráfico de tendência para o desvio padrão da distribuição normal

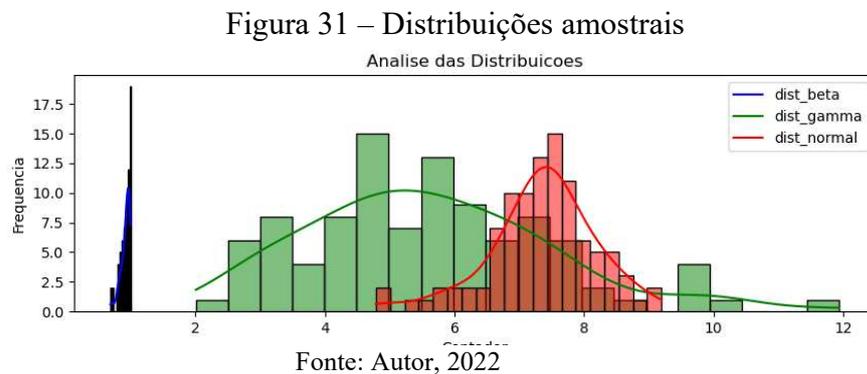


Fonte: Autor, 2022

#### 4.7 TESTE DE KOLMOGOROV SMIRNOV

De maneira a haver uma comparabilidade numérica entre as distribuições é utilizado o Teste De Kolmogorov Smirnov (KS), servindo de guia na observação das amostras e de discrepâncias entre cada distribuição pelo *valor-p*. A hipótese nula ( $H_0$ ) é um valor estatístico atrelado ao teste KS, remetendo a probabilidade de um certo valor fora do desvio padrão ser obtido dentro da amostragem simulada. Ou seja, ao se rejeitar  $H_0$  significa que os dados estão adequados para serem utilizados.

As distribuições beta, gama e normal estão projetadas na Figura 31, baseado nos modelos simulados, para as respectivas frequências e valores gerados conforme o desvio padrão e a média da amostra original. A distribuição beta fica isolada à esquerda das outras distribuições, visto que atingiu o nível de convergência pelo método MCMC primeiro. O que demonstra que as distribuições gama e normal apresentam compatibilidade em certos valores de tendência simulados, tanto que ambos os gráficos apresentam a forma de sino.



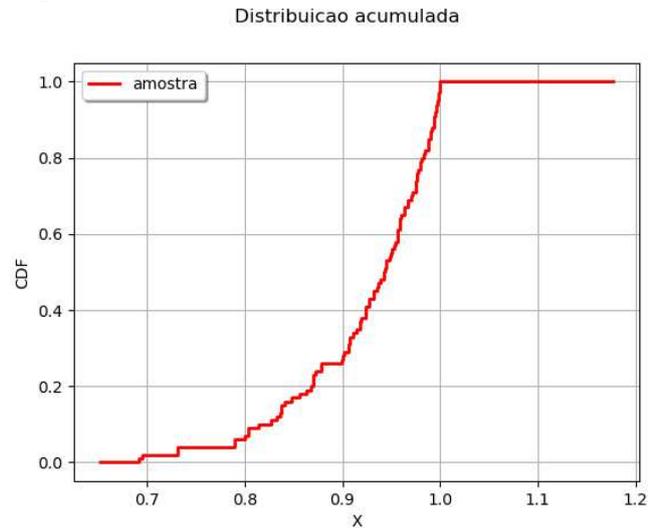
A seguir vamos estabelecer os testes individualizados, que permitem a identificação das divergências entre cada distribuição escolhida. A partir da importação dos dados oriundos dos modelos simulados junto ao MCMC, poderemos identificar o comportamento isolado das amostras e suas respectivas Curvas de Distribuição de Probabilidade (CDF).

Possibilitando entender as discrepâncias e eliminar dualidades, o teste Kolmogorov Smirnov (KS) é desenvolvido para as três distribuições para estimar a diferença entre o acumulado, pelo MCMC, da amostragem analisada. Para tanto, a Curva de Distribuição de Frequência (CDF) verificará o comportamento da normal, gama e beta conforme essas distribuições oscilarem para os valores simulados 'x'.

Por meio da simulação pelo teste de Kolmogorov Sminorv, temos a probabilidade acumulada pelos dados gerados dentro da distribuição Beta. A Curva de Distribuição de Frequência (CDF) mostra o comportamento dos valores simulados ( $x$ ) da amostra, auxiliando na identificação de quais variáveis possuem um valor menor, maior ou igual dentro de uma certa distribuição contínua.

Desta forma, podemos observar que a distribuição acumulada de probabilidade, Figura 32, simulada seguindo os parâmetros para as variáveis de perfil Beta, apresenta uma curva que atinge o valor gerado entre 0 e 1, com a estabilização indicando que a convergência foi atingida. Lembrando que esses valores representam a convergência para o tempo de espera de cada motorista na rótula, indicando um valor improvável dentro dos fatores analisados.

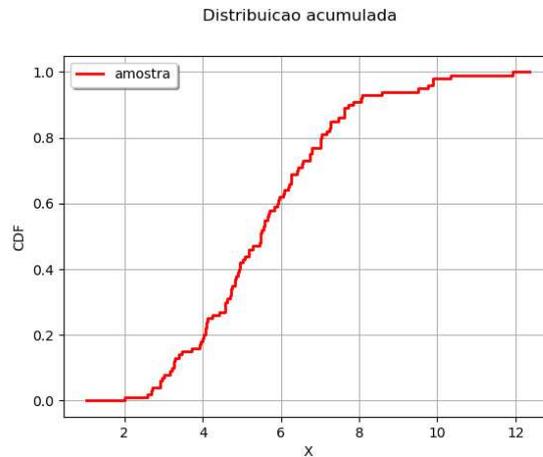
Figura 32 – Distribuição acumulada Beta



Fonte: Autor, 2023

Por meio da variação amostral projetada pelos dados simulados, dentro do modelo MCMC, Figura 33, que os dados de entrada ( $x$ ) convergem na Curva de Distribuição de Probabilidade (CDF) para a gama. Atingindo os valores de 0 e atingindo estabilidade no valor de 12. O que indica que pelo critério de distribuição gama pelo teste KS, o tempo de espera por motorista varia de 0 a 12 segundos.

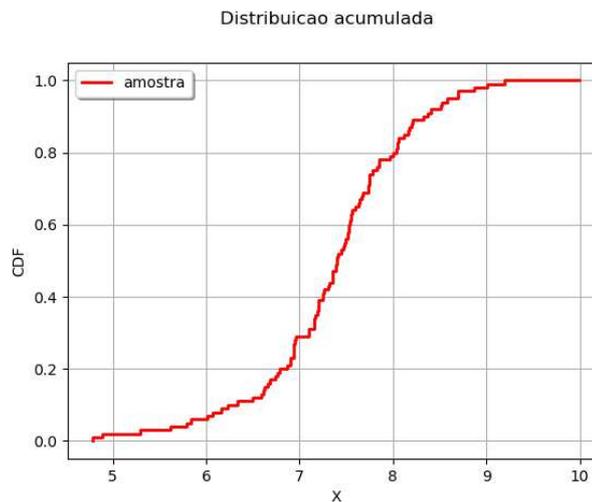
Figura 33 – Distribuição acumulada Gama



Fonte: Autor, 2023

Agora, parametrizando nossa amostra (x) para a Curva de Distribuição de Probabilidade (CDF), vemos que os dados começam a apresentar a modelagem propriamente dentro da distribuição Normal a partir de 4 até os 10 segundos, que mais uma vez mostram os tempos de espera mais propensos a surgirem e demonstram quais são os valores mais visados, Figura 34.

Figura 34 – Distribuição acumulada Normal



Fonte: Autor, 2023

De posse dos dados analisados, mais uma vez, fez-se uso da implementação em Python das amostras com auxílio de bibliotecas estatísticas. Fornecendo confiabilidade e

facilidade na etapa de simulação com ênfase no *valor-p*, fator determinístico na aceitação da distribuição. Abaixo vemos a Tabela 6 com as comparações executadas.

Tabela 6: Distribuições e valores resultantes

Distribuição	<i>valor-p</i>	Estatística	Resultado
Beta	$2.00 * 10^{-205}$	0.9910	Rejeitar $H_0$
Gama	$6.46 * 10^{-243}$	0.9962	Rejeitar $H_0$
Normal	0.00	0.9999	Rejeitar $H_0$
Beta versus Gama	$2.2087 * 10^{-59}$	1.0	Rejeitar $H_0$
Beta versus Normal	$2.2087 * 10^{-59}$	1.0	Rejeitar $H_0$
Normal versus Gama	$1.1250 * 10^{-17}$	0.61	Rejeitar $H_0$

Fonte: Autor, 2023

Pelos valores levantados, é visível que todas as amostras testadas para o *valor-p* resultam na rejeição da Hipótese Nula ( $H_0$ ). Culminando que dado um estimado valor fora do desvio padrão escolhido aleatoriamente, existe uma probabilidade muito baixa desta ser escolhida fora da amostragem gerada. Ou seja, os dados criados a partir da média e do desvio padrão pelo método MCMC, culminam em resultados com convergência adequada. Sem que ocorram extremismos ou valores fora do padronizado, refletindo assim em tempos de espera gerados dentro de uma confiabilidade conforme também é comprovado tanto por um *valor-p* muito baixo e por uma estatística de confiabilidade alta.

As distribuições mostram que os dados apresentam semelhanças quando comparadas entre si, com os resultados indicando afinidades amostrais. Obviamente dentro de uma geração por meio de um desvio padrão e média comuns tal resultado é esperado, porém como vemos amostragens muito grandes, isso poderia resultar em valores muito justapostos que dificultariam a observação visual gráfica. A distribuição beta que ficou estabilizada e os gráficos para distribuição acumulada sugerindo uma convergência logo nos primeiros segundos analisados no tempo de espera, demonstram que mesmo assim os dados estão dentro da simulação gerada e quando comparada com as distribuições gama e normal, vemos uma tendência distributiva confiável pelo teste KS.

Pela execução na simulação MCMC as simulações normal, gama e beta geraram resultados atingindo convergência nos critérios definidos: média e desvio padrão. Amparado

no teste KS conclui-se que ao rejeitarem a hipótese nula ( $H_0$ ), todas as distribuições se encaixaram e provaram que os valores estão dentro da amostragem obtida pelas câmeras de filmagem. O que comprova a metodologia MCMC como válida em estudos de tráfego embasado em volumes de veículos e tempos de espera, que são necessários na composição do nível de serviço.

A distribuição beta teve uma convergência de valores inferior as demais, porém ainda assim ficou dentro dos critérios apesar de gerar uma convergência sem considerar todos os valores simulados, visto que estabilizou em 1. O que é visto nos gráficos das Figuras 32 a 35 e pelo valor indicado no teste KS na Tabela 6. Comparadas as outras distribuições também foram negadas a hipótese nula, indicando que os valores pertencem a mesma amostra, mas será demonstrada a inviabilidade dentro do modelo de tráfego e serventia viária.

Em posse dos tempos de espera simulados e gerados foram novamente computados, diretamente pelos os cálculos do Método do DNIT (2006), tendo em vista obter qual seriam os novos níveis de serviço viário. O tempo médio para a Distribuição Beta foi de 23,40 segundos o que resulta em um nível de serviço C. Já na Distribuição Gama atingiu se 45,19 segundos classificado no nível de serviço E. Finalmente a Distribuição Normal atingiu 56,82 segundos resultante em um nível igual a E.

Tratando o nível de serviço viário estudado, é visível que as distribuições resultaram em tempos de espera com valores diferentes para a mesma via analisada com base nas amostragens obtidas. A Distribuição Normal e Gama culminaram em um mesmo nível de serviço E, que indica a já saturação viária com indícios de problemas na acessibilidade e deslocamento pelo perímetro urbano. A Distribuição Beta atingiu a convergência amostral muito antes que as outras, o que induz a eliminação desta como indicador de um parâmetro real quanto ao tempo de espera, visto que provavelmente nem todos os valores amostrais gerados foram computados.

#### 4.8 QUANTIFICAÇÃO DA POLUIÇÃO VEICULAR

As distribuições analisadas comprovaram que a normal trouxe resultados significativos que demonstram como os dados estão condicionados a um desvio padrão e

frequências reais. A distribuição normal resultou na melhor convergência dos tempos de espera e assim é a escolhida, de posse disso o cálculo das emissões é efetuado.

Entendendo que a região de estudo sofre com os períodos de parada e aceleração veicular, coube efetivamente utilizar os dados fornecidos e simulados pelo MCMC na distribuição normal para quantificar a poluição local. Importante ressaltar que os tempos de espera e capacidade viária compõem importante fator na determinação do volume de poluentes gerados. Outros valores numéricos, como constantes e ábacos foram obtidos com base no definido pela COPERT em estudos de Coelho (2006); Maźziel et al. (2022) e Aroca (2022).

De maneira a obter os dados da poluição emitida na região, é necessário avaliar as condições da via estudada como inclinação (gradiente, igual a zero), velocidade (40 Km/h) e comprimento da rotatória (151 m) e aceleração veicular ( $0,76 \text{ m/s}^2$ ). Os valores passam por conversão dentro das fórmulas, sendo necessário aplicar as normativas sugeridas por COPERT e nos estudos anteriormente mencionados no parágrafo anterior. A seguir, os fatores de emissão de gás carbônico (kg/km) por classe de veículo foram computados: carros = 1.747; motocicletas = 2.307; ônibus = 3.2 e caminhões = 3.2.

Tratando-se de um estudo em microrregião, a análise da carga poluidora levou em conta os poluentes lançados pelos principais veículos urbanos: carros, caminhões, motos e ônibus, simulando para uma média de carga poluidora gerada em horário de pico. Evidenciando a emissão de poluentes na rotatória, em gramas por hora, conforme tabela 7.

Tabela 7: poluentes na microrregião

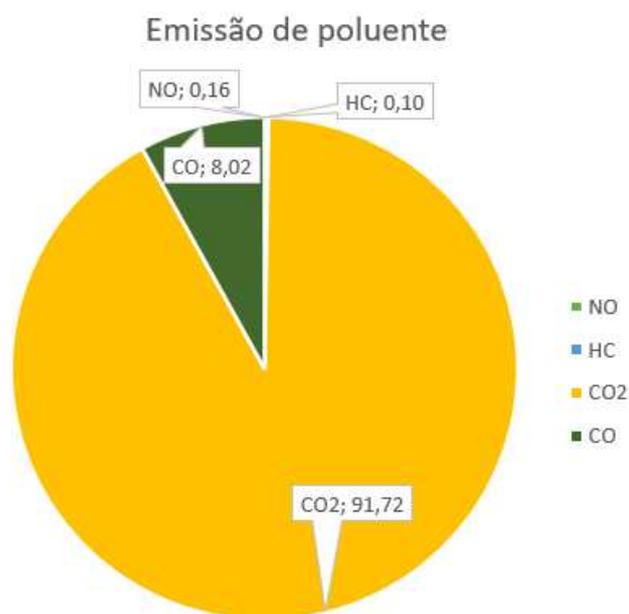
Veículo	Poluentes emitidos gramas/h			
	NO	HC	CO <sub>2</sub>	CO
Carro	49,95	30,41	28146,81	2461,63
Caminhão	1,17	0,71	660,72	57,78
Ônibus	0,90	0,55	505,76	44,23
Moto	45,22	27,54	25488,06	2229,10
Total	97,24	59,21	54801,35	4792,74

Fonte: Autor, 2023

Os resultados sugerem que os veículos que mais geram carga poluidoras são carros e motos. Na região o tráfego é formado principalmente por estes, com pouca observação no período de estudo de veículos do tipo ônibus públicos ou caminhões. A preferência por sistemas individuais de transporte versus ônibus acarreta em aumento na poluição lançada nessa região. Obtendo que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) lidera no ranking de poluentes mais

emitidos com 92% de cota, enquanto o monóxido de carbono (CO) aparece com 8% e nos demais HC e NO com menos de 1%, Figura 35.

Figura 35 – Taxa de poluição analisada



Fonte: Autor, 2023

É possível estabelecer conclusões que relacionam em como tempos de espera altos, que estão ligados diretamente a capacidade da via em permitir o fluxo de veículos na rótula, causam danos significativos em termos de poluição emitida na microrregião. Ocasionalmente não somente em atrasos, como também efeitos que podem culminar em alterações nos efeitos climáticos e da saúde humana.

#### 4.9 SOLUÇÕES VIÁVEIS NA REDUÇÃO DOS TEMPOS DE ESPERA E DAS EMISSÕES

Dado o cenário negativo, constatado pelos tempos de espera ruins, nível de serviço problemático e dos impactos que a poluição emitida causa na rotatória analisada, medidas devem ser tomadas com o intuito de mitigar danos. Como soluções podem ser aplicadas uma série de propostas que variam em custo, tempo de execução e otimização. Pensando nesses aspectos, e através dos estudos feitos por Wimbadi et al (2021) e Aakre (2017), o uso de ônibus para o transporte público surge como uma solução alternativa economicamente, sustentável e socialmente eficaz.

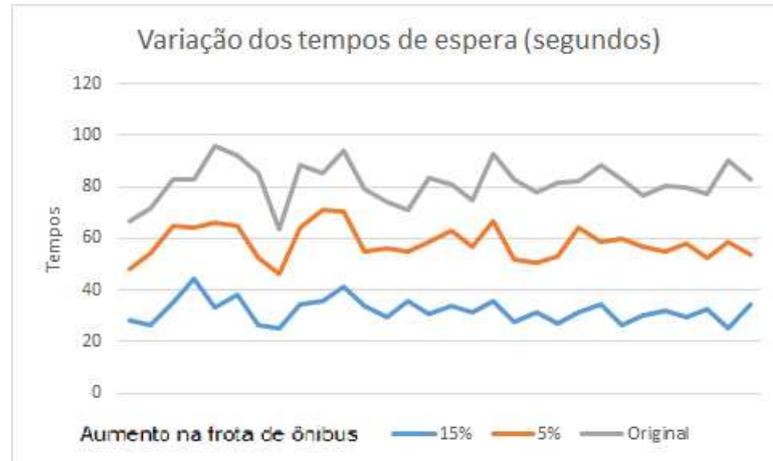
Outras medidas de tráfego e mobilidade urbana surgem como incertas a longo prazo, caras ou não capazes de garantir vazão ao volume de veículos na cidade analisada. Chimdessa et al (2013) discute os gastos e possíveis reflexos negativos que vias semaforizadas tendem a apresentar quanto a formar filas e tempos de espera altos. E modelos de vias em elevados (viadutos, travessias em nível) demonstram gastos altos e utilização de grandes áreas para adequar a estrutura.

Com uma taxa de cerca de 3,2 ônibus para cada mil habitantes, Sinop (MT), está distante de outras cidades médias em relação ao transporte público, como Ponta Grossa (PR) com 4,8 ou Londrina (PR) contando com 3,9 ônibus para cada mil habitantes (PARANÁ, 2023). Embasado nisso e no constatado neste estudo, relativo ao nível de serviço viário e emissões de poluentes na microrregião, foi proposto elevar a taxa de ônibus proporcionalmente até atingir resultados promissores, visando mitigação dos problemas elencados nos capítulos anteriores.

Outro fator de interesse nessa fase foi a de aumentar a quantidade de ônibus que poderiam circular pela via, embasado na relação entre ônibus por carros e motos em cidades acima de 100 mil habitantes: Sendo de 10,2 ônibus para 1000 carros em Ponta Grossa (PR); 10 em Brasília e 9,1 em Londrina (PR) (PARANÁ, 2023). Como na rótula obtemos no sistema de contagem programado, um total de 58,54% de carros, 40,14% de motocicletas, 0,57% de ônibus e 0,75% de caminhões. Desta forma, o volume de ônibus foi aumentado até atingir a proporção adequada, e o número de carros e motos foi reduzido embasado na proporcionalidade matemática.

Assim, simulando para os valores corrigidos da amostra original, com os dados de número de veículos que circularam antes e dentro rótula, foi possível computar para um aumento de 5% na taxa de ônibus e o decréscimo no número de veículos de uso individual. Resultando em uma significativa redução no tempo médio de espera (TME) de 56,82 segundos (Nível de Serviço = E) para 35,70 seg. (Nível de Serviço = C). Aumentando proporcionalmente, apenas quando se chegou a 15% de aumento na taxa de ônibus, foi obtido o tempo médio de espera (TME) de 6,5 segundos (Nível de Serviço = A). A comparação pode ser observada na Figura 36.

Figura 36 – Variação no tempo de espera pelo aumento no número de ônibus



Fonte: Autor, 2023

A nova composição dos valores simulados, para o aumento de 15% na frota de ônibus, indicou o total de veículos que estão na entrada da rotatória “Zn” aguardando os possíveis “gaps” para acessar a via, Z1 à Z4 para os braços do entroncamento. O total de veículos circulando dentro da rotatória, dado em função dos parâmetros “Kn” levantados, também é constatado pela tabela 8. Os dados foram recalculados pelo DNIT (2006) para os 30 dias de filmagens, elencados por cada linha da tabela abaixo.

Tabela 8 – Nova composição do fluxo de veículos na via rotular

Z1	Z2	Z3	Z4	K1	K2	K3	K4
119	242	91	167	250	302	283	353
143	167	99	206	304	368	204	292
163	40	189	284	437	469	66	284
34	155	246	371	570	409	176	470
262	114	240	247	405	543	160	422
229	346	228	200	338	459	413	633
89	118	174	204	326	305	143	340
115	121	66	85	134	215	149	203
72	163	291	116	248	198	190	537
331	196	138	219	335	594	260	370
122	319	55	33	61	171	369	382
308	111	196	235	375	585	164	362
117	263	53	126	184	258	306	325
98	319	114	112	184	223	366	458
155	269	68	207	296	382	319	351
52	297	175	141	243	200	336	516
209	261	98	114	183	351	317	381
169	330	99	134	210	326	387	450
181	31	98	175	263	380	58	157

147	112	262	138	268	305	144	449
46	191	61	190	271	242	217	265
138	228	66	266	373	422	270	308
196	38	240	218	366	440	68	348
156	110	116	126	204	303	143	258
86	87	177	121	218	219	108	315
89	90	123	183	281	284	111	247
51	52	100	105	172	163	64	180
84	85	229	236	386	330	105	379
44	45	121	122	200	172	56	200
67	77	104	164	295	283	110	246

Fonte: Autor, 2023

Partindo dos novos volumes de veículos incidentes em cada braço do entroncamento viário, poderemos rever, os tempos de espera que cada motorista deverá aguardar conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Nova composição dos tempos de espera por braço

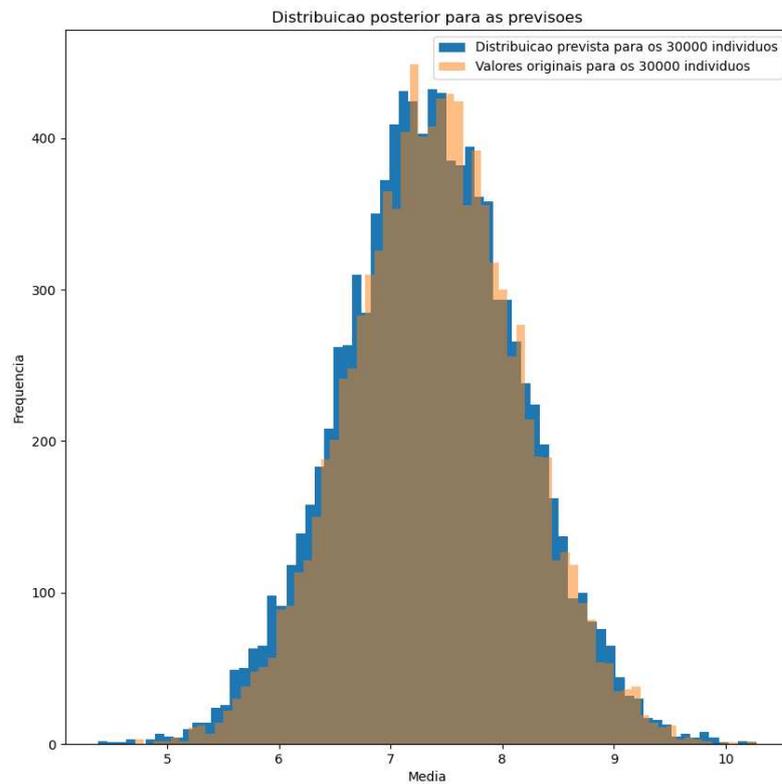
TME1	TME2	TME3	TME4
1	7	2	5
5	8	2	2
4	5	4	5
3	1	5	6
8	3	8	8
8	6	8	5
8	7	8	9
7	1	6	4
4	7	6	6
6	1	6	1
6	6	6	5
9	5	6	3
6	2	9	6
6	2	7	5
7	5	6	7
6	2	7	6
8	2	5	3
7	9	5	1
6	8	7	10
6	3	8	9
7	7	6	8
6	5	6	3
7	4	10	6
6	5	8	4
7	5	6	2
2	7	5	9

6	5	7	4
7	1	9	5
8	8	8	8
5	9	5	9

Fonte: Autor, 2023

Os dados para estimar os tempos de espera foram simulados, para esses novos valores, dentro da parâmetros do MCMC, Figura 37. Rejeitando o teste da Hipótese Nula ( $H_0$ ), representando que as convergências estão adequadas, para as distribuições *a priori* e *posteriori* com aceitação dos valores gerados e simulados, e podemos prosseguir para o cálculo das emissões de poluentes.

Figura 37 – Novo MCMC para o aumento no número de ônibus



Fonte: Autor, 2023

Buscando verificar o quanto a inserção de um maior número para ônibus municipais, alterará os impactos ambientais na rotatória, calcularemos a taxa de emissão de poluentes na microrregião. Elencando os mesmos fatores já levantados: velocidade veicular, greide, aceleração e os gases do efeito estufa lançados. Obtemos, Tabela 10, os seguintes valores para a taxa de 15% no número de ônibus.

Tabela 10: Atualizada taxa de poluentes na microrregião

Veículo	Poluentes emitidos gramas/h			
	NO	HC	CO <sub>2</sub>	CO
Carro	39,14	24,32	22510,81	1969,41
Caminhão	0,91	0,51	633,23	35,81
Ônibus	7,83	4,78	4412,1	395,12
Moto	36,18	22,03	20391,07	1783,17
Total	84,06	51,64	47947,21	4183,51

Fonte: Autor, 2023

Observa-se uma redução nos níveis de poluentes emitidos, quando comparamos com a Tabela 7, por veículos como carro em 20%, motocicletas para 19,9% e caminhões 6,93%. Enquanto para ônibus ocorreu um aumento em 774,04% na poluição lançada na atmosfera. Observando o total de poluentes, é constatado uma redução de 12,53% em comparação. Os níveis de CO<sub>2</sub> e CO foram minimizados em 12,51% e 24,75%, respectivamente.

Embasado no que foi discutido no capítulo 4.8 da revisão bibliográfica acerca da poluição quantificada pelos dados simulados e nos resultados alcançados neste capítulo 4.9 para soluções viáveis, é alcançado que uma redução no uso de veículos individuais (carros e motos) e incremento no transporte coletivo (ônibus) ocasionará a redução de filas, melhorando o desempenho do uso da capacidade viária em rotatórias, bem como culminará em significativa mitigação dos gases lançados na microrregião estudada.

#### 4.10 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados o estudo de caso e como cada etapa esteve interligada, objetivando alcançar os resultados do comportamento da via quanto ao nível de serviço e poluição influenciam na microrregião. Primeiramente foi destacada a obtenção dos dados, pela coleta dos vídeos das câmeras do STU e das dificuldades estabelecidas nessa parte. Posteriormente, a implementação do sistema para contagem e tipologia veicular, baseado nos vídeos e em programação livre na linguagem Python. A metodologia do DNIT (2006) serviu de parâmetro técnico para obtenção do nível de serviço atual, porém os dados tiveram a significância adequada determinada pelo MCMC e distribuições estáticas analisadas. O nível de poluentes emitidos foi constatado e simulado para o tráfego atual e visando melhorias embasado em outros cenários.

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 5.1 CONCLUSÕES

O princípio da contagem veicular proposta neste trabalho teve por meta facilitar todo o processo de entrada de dados, originados dos vídeos lidos e convertidos para planilhas com os padrões de veículos analisados. Automatizando uma etapa que consumiria demasiado tempo e possibilitando maior controle sobre as informações passadas na tela do computador. A metodologia do DNIT (2006) enfatizou na avaliação destes dados veiculares, estabelecendo os critérios de serventia e capacidade viária da rotatória, como também os tempos de espera para acesso a mesma.

Na etapa de modelagem e simulação dos tempos de espera foram importantes estudos estatísticos, com o objetivo de compor material que auxiliasse na decisão de encontrar o comportamento dos dados, embasado em Monte Carlo via Cadeias Markov (MCMC). Foram usados 30.000 valores testados baseados na variância, média e desvio padrão da amostra original, buscando eliminar as discrepâncias e atingindo qual distribuição estatística melhor define e refina os valores computados. Foram usadas distribuições probabilísticas do tipo normal, gama e beta, mas pelo Teste KS obtém-se convergência ideal dos valores pela distribuição normal.

A metodologia MCMC alcançou valores bem próximos aos calculados via DNIT (2006) quanto ao nível de serviço médio da via. Os valores de tempos de espera alcançaram a média de 55,12 segundos. Frente as análises desempenhadas, foram constatados que os dados levantados e os cálculos estatísticos executados sugerem compatibilização nos critérios ao encontrar o mesmo nível de serviço igual a E, conforme metodologia DNIT (2006), tanto pelo método de simples de amostragem, como pelo MCMC. Indicando falhas que significam retenção de veículos nas entradas da rotatória, gerando atrasos e saturação da infraestrutura local.

Baseado no princípio de saturação viária presente na via estudada, foi proposto avaliar os poluentes emitidos na região. A análise foi embasada nos critérios de cálculo indicadas pelo COPERT, tendo por influência a tipologia veicular, o greide, velocidade, capacidade da rotatória e tempo de espera. Foram utilizados os dados simulados advindos da etapa do MCMC, obtendo que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) lidera no ranking de poluentes

mais emitidos com 92% de cota, enquanto o monóxido de carbono (CO) aparece com 8%. Os veículos que mais poluem são os carros com 20% e motocicletas com 19,9% da poluição total.

Repensando em como a situação da via está apresentando problemas tanto na capacidade disponível para receber veículos, como também pelos reflexos negativos da poluição local, propõe-se o aumento na cota de ônibus visando uma possível mitigação dos efeitos ruins. Simulando o tráfego para um aumento de 15% na taxa de ônibus, que circulam na via, verificamos uma redução no tempo de espera para 6,5 segundos que resulta em um nível de serviço A, muito bom segundo DNIT (2006). Os dados também mostraram convergência adequada pelo MCMC na distribuição normal. Calculando as emissões dos poluentes, chegamos a uma redução de 12,53% em comparação com a amostragem original.

Recomenda-se a adoção de estratégias que visem a redução dos conflitos advindos do excesso de veículos individuais, tais como medidas que possam valorizar o espaço urbano, reduzir filas e congestionamentos. Repensar na infraestrutura disponível na cidade, verificar vias que possam equilibrar o tráfego atual, bem como incentivar o uso de transporte coletivo e de veículos menos poluidores.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros fica a indicação da previsão de formação de filas, cálculos dos tempos de espera para acesso à via pelos usuários e implementação de novas formas de contagem aplicado a pedestres, bem como a aplicação em outras vias urbanas do sistema de contagem.

Utilizar outros modelos de distribuição estatística, bem como outros métodos para comparar resultados pode ser benéfico para minimizar ainda mais erros. A possibilidade de prolongar o tempo de obtenção de dados pode resultar em critérios de quantificação mais adequados para modelos em cidades com aumento no tráfego anual significativo.

Outras sugestões estão no uso de metodologias alternativas ao COPERT, que são adotadas por outros pesquisadores e comparar com o modelo europeu. Desenvolver um estudo aplicado ao Brasil pode servir de guia para um modelo nacional, que leve em conta o clima, o terreno, as condições viárias nacionais e questões veiculares.

Pesquisar também as diferenças nas classes de veículos usados neste estudo também pode levar a comparações de emissões entre diferentes tipos de carros utilitários, passeio ou de serviço, e os impactos que veículos de transporte coletivo ainda geram no meio ambiente.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. M. **Aplicação De Visão Computacional Para Rastreamento E Contagem De Veículos Em Rodovias**. Rio de Janeiro – RJ. 67 páginas, 2020. Monografia (Graduação) Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ.
- ANDRYCH-ZALEWSKA, M., CHLOPEK, Z., MERKISZ, J., PIELECHA, J. (2021). **Research on Exhaust Emissions in Dynamic Operating States of a Combustion Engine in a Real Driving Emissions Test**. *Energies*, 14, 5684, DOI:- 10.3390/en14185684. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/354488701>.
- AMERI, M; MOAYEDFAR, R; JAFARI F, (2013). **Determination the capacity of two-lane suburban roads with neural networks and effect of speed on level of service**. *Eur Transp Res Rev* 5(4):179–184. doi:10.1007/s12544-013-0096-y.
- AROCA; M., PARRA, A; BORGE, R. **On-road vehicle emission inventory and its spatial and temporal distribution in the city of Guayaquil, Ecuador**, *Science of The Total Environment*, Volume 848, 2022, 157664, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157664>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722047623>.
- Associação Nacional de Transportes Público – ANTP. (2018). **Sistema de informações da mobilidade urbana. São Paulo: ANTP**. Acessado em 29 de março de 2022. Disponível em: <http://www.antp.org.br/sistema-de-informacoes-da-mobilidade/apresentacao.html>
- BALVEDI, Guilherme Arpini. **Microssimulação de tráfego aplicada na avaliação do desempenho da segurança viária em rotatórias: um estudo de caso na rótula da UFSC/Trindade** / Guilherme Arpini Balvedi; orientadora, Lenise Grando Goldner, 2018. 136 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2018.
- BARBOSA, L.V. et al. **Estudo Viário Da Rotatória Da Praça Alberto De Paula, Em Franca/SP**. 18º Congresso Nacional de Iniciação Científica. CONIC – SEMESP. São Paulo, 2018.
- BEBKIEWICZ, K., CHŁOPEK, Z., SAR, H., SZCZE-PAŃSKI, K., ZIMAKOWSKA-LASKOWSKA, M. (2021). **Assessment of impact of vehicle traffic conditions: urban, rural and highway, on the results of pollutant emissions inventory**. *Archives of Transport*, 60(4), 57-69, DOI: 10.5604/01.3001.0015.5477. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/357464898>.
- BENOV, Dobriyan M. (2016). **The Manhattan Project, the first electronic computer and the Monte Carlo method**. *Monte Carlo Methods and Applications*. 22 (1): 73–79. doi:10.1515/mcma-2016-0102. S2CID 30198383.

BREITMAN, K. K. **Arcabouço para desenvolvimento de serviços baseados na Simulação de Monte Carlo na Cloud**. PUC-Rio, 2012.

BOCHKOVSKIY, A.; WANG, C. Y. & LIAO, H. Y. M. **YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection**. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/340883401\\_YOLOv4\\_Optimal\\_Speed\\_and\\_Accuracy\\_of\\_Object\\_Detection](https://www.researchgate.net/publication/340883401_YOLOv4_Optimal_Speed_and_Accuracy_of_Object_Detection). 2020. (Acesso em 08/07/2022).

CARVALHO, C. H. R. **Mobilidade Urbana: Avanços, Desafios E Perspectivas. O Estatuto da Cidade e o Habitat III: um balanço de quinze anos da política urbana no Brasil e a Nova Agenda Urbana Brasília**. Brasília: IPEA, Cap. 14. 2016.

BORTOLAZZO, Shadia S. A. **Contribuição metodológica para planejamento de transporte urbano uma proposta sob a ótica da sustentabilidade ambiental/ Shadia Silveira Assaf Bortolazzo; orientador, Amir Mattar Valente, coorientador, João Eugênio Cavallazzi, 2017. UFSC. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial, Florianópolis, 2017.**

CASELLA, George, e BERGER, Roger. **Inferência Estatística**. Tradução da 2ª edição norte-americana. São Paulo: Centage Learning, 2010. ISBN 978-85-221-0894-7.

CRUZ, Silvia Stuchi e PAULINO, Sonia Regina. **Desafios da mobilidade ativa na perspectiva dos serviços públicos: experiências na cidade de São Paulo**. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana* [online]. 2019, v. 11 [Acessado 29 março 2022], e20190026. Disponível em: <<https://doi.org/10.1590/2175-3369.011.e20190026>>. Epub 09 Set 2019. ISSN 2175-3369.

COELHO, Juliana Carla; FREITAS, Jurislene Araújo; MOREIRA, Maria Elisabeth Pinheiro. **Implantação semaforica são medidas eficazes para a redução de acidentes de trânsito? O caso de Fortaleza-CE. 2008. 8 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará – Ufc, Fortaleza, 2008.**

COELHO, M. C., FARIAS, T. L., ROUPHAIL, N. M. **Effect of roundabout operations on pollutant emissions**. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 11, Issue 5, 2006, Pages 333-343, ISSN 1361-9209, <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.06.005>.

COULLON, Jeremie & POKERN, Yvo. (2022). **Markov chain Monte Carlo for a hyperbolic Bayesian inverse problem in traffic flow modeling**. *Data-Centric Engineering*. 3. [10.1017/dce.2022.3](https://doi.org/10.1017/dce.2022.3).

CHIMDESSA, Yadeta; KASSA, Semu & OBSU, Legesse. (2013). **Efficiency of Roundabouts as Compared to Traffic Light Controlled Intersections in Urban Road Networks**. *Momona Ethiopian Journal of Science*. 5. [10.4314/mejs.v5i2.91491](https://doi.org/10.4314/mejs.v5i2.91491).

CHOUDHARY, PARUL AND DWIVEDI, R. K. AND SINGH, UMANG. **Estimating Traffic Congestion by Queuing theory** (April 4, 2020). *Proceedings of the International*

Conference on Innovative Computing & Communications (ICICC) 2020, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=3568534> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3568534>.

CRUZ, L. A., LYONS, L. AND DARGHAN, E. (2021). **Complete-Linkage Clustering Analysis of Surrogate Measures for Road Safety Assessment in Roundabouts**. *Revista Colombiana de Estadística*, 44(1), pp. 91–121. doi: 10.15446/rce.v44n1.81937

DI GIULIO, G. M., BEDRAN-MARTINS, A. M. B., VASCONCELLOS, M. P., RIBEIRO, W. C., & LEMOS, M. C. (2018). **Mainstreaming climate adaptation in the megacity of São Paulo, Brazil**. *Cities*, 72, 237-244. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cities.2017.09.001>.

DIMITROVA DS, KAISHEV VK, Tan S (2020). **Computing the Kolmogorov–Smirnov Distribution when the Underlying cdf is Purely Discrete, Mixed or Continuous**. *Journal of Statistical Software*. 95 (10): 1–42. doi:10.18637/jss.v095.i10.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) (2022). **Plano Nacional de Contagem de Tráfego**. Site do governo. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/planejamento/contagem-de-trafego>. Acessado em 06 de julho de 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT) (2006). **Manual de Estudos de Tráfego**. - Rio de Janeiro. 384 p.

ESTADÃO, Jornal. **Mobilidade Urbana: causas para os engarrafamentos no Brasil**. Matéria de jornal, publicada em janeiro de 2020. Disponível em: <https://mobilidade.estadao.com.br/mobilidade-para-que/as-causas-e-solucoes-para-os-engarrafamentos-no-brasil/>. Acessado em: 20/01/2023.

FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHWA). **Roundabouts: An Informational Guide**, 2000, 268 p.

FERRAZ, L. J., CELLA, A., MANSUELO, R., GUARDA, E. L. A. da, & SANCHES, J. C. M. (2020). **Índice de Mobilidade Urbana Sustentável (IMUS) para os Aspectos Ambientais e Modos não Motorizados em Sinop-MT**. *E&S Engineering and Science*, 9(1), 45-61. <https://doi.org/10.18607/ES2020910059>.

GIUFFRÈ, O., GRANÀ, A. & TUMMINELLO, M.L. **Exploring the uncertainty in capacity estimation at roundabouts**. *Eur. Transp. Res. Rev.* 9, 18 (2017). <https://doi.org/10.1007/s12544-017-0238-8>.

GONZALEZ, AG, HERRADOR, A, ASUERO, AG (2005). **Uncertainty evaluation from Monte-Carlo simulations by using Crystal-Ball software**. *Accred Qual Assur* 10(4):149–154. doi:10.1007/s00769-004-0896-9.

GUTTAG, John. **Monte Carlo Simulation**. Disponível em: [https://www.youtube.com/watch?v=OgO1gpXSUZU&ab\\_channel=MITOpenCourseWare](https://www.youtube.com/watch?v=OgO1gpXSUZU&ab_channel=MITOpenCourseWare). Acessado em 29 de abril de 2022.

JAWORSKI A., LEJDA, K., MAĐZIEL, M. **Emission of pollution from motor vehicles with respect to selected solutions of roundabout intersections**. *Combustion Engines*. 2017, 168(1), 140-144. DOI: 10.19206/CE-2017-122. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/333236811>.

JOHANSEN, A.M. **Markov Chain Monte Carlo**, Editor(s): Penelope Peterson, Eva Baker, Barry McGaw, *International Encyclopedia of Education (Third Edition)*, Elsevier, 2010. Pages 245-252, ISBN 9780080448947, <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044894-7.01347-6>.

LEAL, G.S., SILVA, D.A.O., & SOPELETE, M.C. **Conceitos básicos de bioestatística. Pesquisa na área biomédica: do planejamento à publicação** [online]. Uberlândia: EDUFU, 2005, pp. 137-180. ISBN: 978-85-7078-523-7. <https://doi.org/10.7476/9788570785237.0007>.

LIN, TSUNG-YI ET AL. **Feature pyramid networks for object detection**. In: **Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition**. 2017. p. 2117-2125. Disponível em: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_cvpr\\_2017/papers/Lin\\_Feature\\_Pyramid\\_Networks\\_CVPR\\_2017\\_paper.pdf](https://openaccess.thecvf.com/content_cvpr_2017/papers/Lin_Feature_Pyramid_Networks_CVPR_2017_paper.pdf). (Acesso em 01/02/2023).

LIU, Fuwen; KOENIG, Hartmut. **A survey of video encryption algorithms**. *Computers & Security*. Volume 29, Issue 1, 2010, Pages 3-15, ISSN 0167-4048. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2009.06.004>. Acessado em 10 de setembro de 2022.

LOBATO, M. F., RODRIGUES, B. M. M., & SANTOS, A. G. (2021). **Impacto da pandemia de COVID-19 nas emissões veiculares no Brasil no período de janeiro a maio de 2020**. *Engenharia Sanitária E Ambiental*, 26(5), 829–836. <https://doi.org/10.1590/s1413-415220200261>.

MATTEO, M.; CARVALHO, C. H. R. **Dinâmica populacional e sistema de mobilidade nas metrópoles brasileiras**. Brasília: Ipea, 2011. (Comunicados do Ipea, n. 102).

MAURO, R.; Guerrieri, M. & POMPIGNA, A. (2020). **Testing roundabout capacity models: a practical aid for choosing the right one based on total capacity calculation**. *European Transport\Trasporti Europei*. 2020. 17. 10.48295/ET.2020.80.7.

MAĐZIEL, MAKSYMILIAN & CAMPISI, TIZIANA. (2022). **Assessment of vehicle emissions at roundabouts: a comparative study of PEMS data and microscale emission model**. *Archives of Transport*. 63. 35-51. 10.5604/01.3001.0015.9926.

MEMON, S.; BHATTI, S.; ALI, L.; TALPUR, M. e MEMON, M. **A Video based Vehicle Detection, Counting and Classification System**. *International Journal of Image, Graphics and Signal Processing*, 2018. DOI: 10.34-41. 10.5815/ijigsp.2018.09.05.

MIGUEL, P. A. C. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução**. *Production*, v. 17, n. 1, p. 216-229, 2007.

MOITA, M. & ALMEIDA, E. S. (2012). **Aplicação de simulação para obtenção de soluções ao tráfego em rotatória da cidade de Manaus**. Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Journal of Transport Literature, Vol. 6, n. 1, pp. 93-109.

NOVAES, Marcel. **Distribuição de probabilidade**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 44, e20210424. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2021-0424>. Uberlândia MG, 2022.

OPPERMANN, N. **Cidades - Manual de Desenvolvimento Urbano Orientado ao Transporte Sustentável**. 2014. Disponível em: <http://embarqbrasil.org/research/publication/dots-cidades-manual-de-esenvolvimento-urbano-orientado-ao-trans-porte>. Acesso em: 10 jan. 2023.

PARANÁ. **Relação entre ônibus das principais cidades no Paraná**. Disponível em: <https://www.aen.pr.gov.br/>. Acesso em: 07 jan. 2023.

POLUS, A.; Y. SHIFTAN E S. SHMUELI-LAZAR (2005). **Evaluation of the Waiting-Time Effect on Critical Gaps at Roundabouts by a Logit Model**. European Journal of Transport and Infrastructure Research, v. 5, nº 1, p. 1-12.

REDMON, J.; FARHADI, A. **YOLOv3: An Incremental Improvement**. Washington, p. 6, 2018. Disponível em: <https://pjreddie.com/media/files/papers/YOLOv3.pdf>. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 68.

REIS, M. A. S. **Mobilidade Urbana: Um Desafio para Gestores Públicos**. 2014 (Cadernos FGV Projetos sobre Mobilidade Urbana).

ROBERT, Christian; CASELLA, George. **Introducing Monte Carlo Methods with R**. Robert Gentleman. Springer Verlag, New York, pp.284, 2010, Use R, John Kimmel.

RIZZO, M.L. (2008). **Statistical Computing with R**. Chapman and Hall, Boca Raton.

SALMAN, S., ALASWAD, S. **Alleviating road network congestion: Traffic pattern optimization using Markov chain traffic assignment**. Computers & Operations Research, Volume 99, 2018, Pages 191-205, ISSN 0305-0548, <https://doi.org/10.1016/j.cor.2018.06.015>.

SAUSEN, J. MACHADO, J. B. **Suserano - Sistema de Controle de Tráfego Urbano**; 2016; Trabalho de Conclusão de Curso; (Graduação em Sistema de Informação) - Faculdades Integradas de Taquara; Orientador: Leonardo Ribeiro Machado.

SUGITA, H. **Monte Carlo Method, Random number, and Pseudorandom number**. MSJ Memoirs vol.25 (2011), xiv+133 pp.

SONOTICIAS. **Frota de veículos continua crescendo em Sinop e passa de 147 mil**. Notícia de jornal, 2022. Disponível em: <https://www.sonoticias.com.br/economia/frota-de-veiculos-continua-crescendo-em-sinop-e-passa-de-147-mil/>. Acessado em 20 de janeiro de 2023.

SOUSA, IF; LUNDGREN, W. J; NETTO, A. O. (2010). **Comparação Entre Distribuições De Probabilidades Da Precipitação Mensal No Estado De Pernambuco**. Artigo científico. Scientia Plena, Vol. 6, Num. 6. Disponível em: <https://www.scientiaplena.org.br/sp/article/view/105/35>.

TRIOLA, M. F.; FARIAS, A. M. L.; FLORES, V. R. L. F. **Introdução à Estatística**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2017.

WACKERLY, Dennis; MENDENHALL, William; SCHAEFFER, Richard L. **Mathematical Statistics with Applications**. Belmont: Brooks Cole. 86 páginas, 2008.

WEISBERG, J. & GABBAY, Dov & HARTMANN, S. & WOODS, John. (2011). **Varieties of Bayesianism**. Handbook of the history of logic (Vol. 10. 477-552).

WIMBADI, R. W.; AKIHISA, R. D. **Urban experiments with public transport for low carbon mobility transitions in cities: A systematic literature review (1990–2020)**, Sustainable Cities and Society, Volume 72, 2021, 103023, ISSN 2210-6707, <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103023>.

YANG, S. e YANG, X. **The Application of the Queuing Theory in the Traffic Flow of Intersection**. International Journal of Mathematical, Computational, Physical, Electrical and Computer Engineering. Vol:8, No:6, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.5281/zenodo.1094687>.

## **APÊNDICE A – Códigos Compilados**

Os códigos abertos desenvolvidos, juntamente com as planilhas de dados, estão todos disponíveis no endereço: <https://github.com/gustab31>.