



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

GABRIEL CORREIA DE MIRANDA BORGINHO

MÉTODO GREEN WAVE: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APARECIDA DE GOIÂNIA
2024



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO DE GRADUAÇÃO NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio do Repositório Institucional (RI/UFG), regulamentado pela Resolução CEPEC no 1240/2014, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei no 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo dos Trabalhos de Conclusão dos Cursos de Graduação disponibilizado no RI/UFG é de responsabilidade exclusiva dos autores. Ao encaminhar(em) o produto final, o(s) autor(a)(es)(as) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (TCCG):

Nome(s) completo(s) do(a)(s) autor(a)(es)(as): Gabriel Correia de Miranda Borginho

Título do trabalho: MÉTODO GREEN WAVE: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA

2. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador) Concorda com a liberação total do documento [X] SIM [] NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante: a) consulta ao(à)(s) autor(a)(es)(as) e ao(à) orientador(a); b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo do TCCG. O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro.

Obs.: Este termo deve ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Ronny Marcelo Aliaga Medrano**, Professor do Magistério Superior, em 14/07/2025, às 23:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gabriel Correia De Miranda Borginho**, Discente, em 16/07/2025, às 11:53, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **5503389** e o código CRC **7D720CD1**.

Referência: Processo nº 23070.055422/2023-99

SEI nº 5503389

UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

GABRIEL CORREIA DE MIRANDA BORGINHO

MÉTODO GREEN WAVE: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da graduação em Engenharia de Transportes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás.

Orientador: Prof. Dr. Ronny Marcelo Aliaga Medrano

APARECIDA DE GOIÂNIA
2024

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Borginho, Gabriel Correia de Miranda
Método Green Wave [manuscrito] : estudo de caso em
Goiânia / Gabriel Correia de Miranda Borginho. - 2024.
89 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Ronny Marcelo Aliaga Medrano.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -
Universidade
Federal de Goiás, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Engenharia de Transportes, Aparecida de Goiânia, 2024.
Bibliografia. Anexos.

Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, símbolos,
gráfico, tabelas, algoritmos, lista de figuras.

1. Green wave. 2. Tráfego. 3. Mobilidade. 4. Coordenação. 5.
Semáforo. I. Medrano, Ronny Marcelo Aliaga, orient. II. Título.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA

CERTIDÃO DE APROVAÇÃO AD REFERENDUM
CURSO DE ENGENHARIA DE TRANSPORTES

GABRIEL CORREIA DE MIRANDA BORGINHO

MÉTODO GREEN WAVE: ESTUDO DE CASO EM GOIÂNIA

Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso da graduação em Engenharia de Transportes da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Goiás.

Aprovada por:

Prof. Dr. Ronny Marcelo Aliaga Medrano – Orientador/Presidente da Banca

Profa. Dra. Poliana de Sousa Leite (FCT-UFG) – Examinador Interno

Eng. MSc. Julienne Santana de Moraes (SMM – Goiânia) – Examinador Externo
(Examinador/a Externo/a)

Data: 15/03/2024



Documento assinado eletronicamente por **Ronny Marcelo Aliaga Medrano**, Professor do **Magistério Superior**, em 10/04/2024, às 16:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Poliana De Sousa Leite**, Professor do **Magistério Superior**, em 11/04/2024, às 14:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Julienne Santana de Moraes**, Usuário **Externo**, em 11/04/2024, às 15:18, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **4446400** e o código CRC **08A7AEF5**

*Dedico esse trabalho a todos
estudantes, engenheiros e amantes da
gestão de mobilidade.*

AGRADECIMENTOS

Gostaria de dedicar este espaço para expressar minha profunda gratidão a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e pessoal ao longo deste percurso.

Primeiramente, expresso minha sincera gratidão ao meu orientador, Prof. Dr. Ronny Marcelo Aliaga Medrano, pela orientação dedicada, paciência e valiosos insights que moldaram significativamente este trabalho. Suas orientações foram essenciais para o desenvolvimento das ideias apresentadas aqui.

Agradeço também aos professores e a banca, cujas aulas e feedbacks construtivos enriqueceram meu entendimento sobre o tema e inspiraram a busca pela excelência acadêmica.

À Secretaria Municipal de Mobilidade de Goiânia (SMM), pela disponibilização dos dados e a PTV por liberar o software principal para o estudo de caso do trabalho.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado, oferecendo amor, apoio e compreensão, expresso minha profunda gratidão. Suas palavras de incentivo foram a força motriz nos momentos desafiadores.

Aos amigos que compartilharam risadas, conselhos e momentos de descontração, agradeço por tornarem esta jornada acadêmica mais leve e significativa.

À UFG, expresso minha gratidão pela oferta de recursos e ambiente propício à aprendizagem. O suporte fornecido pelos profissionais da biblioteca e laboratórios foi fundamental para a pesquisa.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho. Cada conversa, debate e troca de ideias moldaram minha compreensão e perspectiva sobre o tema.

Este trabalho é o resultado de um esforço coletivo, e agradeço a cada pessoa que fez parte dessa jornada. Que este seja apenas o começo de muitas conquistas e aprendizados futuros.

Gabriel Correia de Miranda Borginho

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a aplicação do método de sincronização semafórica "*green wave*" ou "onda verde" para aprimorar a fluidez do transporte coletivo e privado na cidade de Goiânia. A falta de sincronia entre os semáforos impacta diretamente os serviços de transporte. Este estudo propõe uma análise detalhada da implementação de um sistema de "onda verde" com o objetivo de melhorar o fluxo de tráfego no corredor T-7. O trabalho inclui a utilização de softwares para calcular o tempo de sinal verde nos cruzamentos das vias, demonstrando os benefícios da sincronização dos semáforos na coordenação entre o transporte público e individual. Além disso, a pesquisa considera a geometria das vias e a presença de faixas exclusivas para o transporte coletivo.

Palavras-chave: *Green wave* (Onda verde). Tráfego. Mobilidade. Trafegabilidade. Coordenação. Semáforo. Fluxo.

ABSTRACT

The aim of this graduation thesis was to apply the "green wave" traffic light synchronization method to improve the flow of public and private transport in the city of Goiânia. The lack of synchronization between traffic lights has a direct impact on transport services. This study proposes a detailed analysis of the implementation of a "green wave" system with the aim of improving traffic flow on corridor T-7. The work includes the use of software to calculate the green light time at road intersections, demonstrating the benefits of traffic light synchronization in coordinating public and individual transport. The research also takes into account the geometry of the roads and the presence of exclusive lanes for public transport.

Keywords: Green wave. Mobility. Traffic, Coordination. Traffic. Lights. Flow.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE QUADROS	xiii
LISTA DE FIGURAS.....	xiv
1 INTRODUÇÃO	18
1.1 PROBLEMA	20
1.2 OBJETIVO.....	20
1.3 JUSTIFICATIVA	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
2.1 TRAFEGABILIDADE	22
2.1.1 Classificação das vias	22
2.1.2 Condições de oferta	25
2.1.2.1 Fluxo Contínuo	25
2.1.2.2 Fluxo Descontínuo	25
2.1.3 Movimentos, Aproximação e Interseção	25
2.1.3.1 Movimento e Aproximação	25
2.1.3.2 Interseções	27
2.2 CORDENAÇÃO SEMAFÓRICA.....	30
2.2.1 Sinalização Semafórica.....	30
2.2.2 Conceitos Básicos para a Coordenação Semafórica.....	30
2.2.4 Tipos de Sistemas de Coordenação Semafórica	32
2.2.5 DIMENSIONAMENTO.....	33
2.2.5.1 Fluxo de Saturação e Aproximação	34
2.2.5.2 Dimensionamento Entreverdes	36
2.2.6 Defasagem	43
2.2.7 Método de sincronização da Onda Verde (<i>Green Wave</i>)	44

2.2.7.1	Definição Método de onda verde.....	50
2.3	2.3 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA..	53
2.3.1	Modelagem	53
2.3.2	Modelagem Dinâmica.....	55
2.3.2.1	Modelagem Pelo VISUM	55
2.3.2.2	Modelagem Pelo PTV Vistro.....	55
2.3.3	Otimização	56
2.3.3.1	Algoritmo Genético	56
2.3.3.2	Hill Climbing	57
3	METODOLOGIA	57
3.1	METODOLOGIA PROPOSTA PARA O TCC.....	57
3.1	COLETA DE DADOS	58
3.2.1	DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	58
3.1.2	DADOS E APLICAÇÃO.....	59
3.1.3	Análise PTV VISUM	60
3.2	Cenários.....	62
3.1.4	CENÁRIO BASE.....	62
3.1.5	CENÁRIO TESTES.....	62
3.3.2.1	Otimização Por Algoritmo Genético	62
3.3.2.2	Otimização Hill Climbing.....	63
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1	CENÁRIO BASE	64
4.2	CENÁRIOS TESTES	67
4.2.1	Resultado Algoritmo Genético	67
4.2.2	Resultado Otimização Hill Climbing.....	73
4.3	Comparação dos Resultados.....	80
4.4	Discussão.....	82

4.4.1 Curiosidade	83
5 CONCLUSÃO	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Dados Fornecidos Corredor T-7	60
Tabela 3.2 Algoritmo Genético e Variáveis	63
Tabela 3.3 Hill Climbing e Variáveis	63
Tabela 4.1 Comparação dos Cenários	81
Tabela 4.2 Comparação de Emissão de Gases Poluentes	84

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 Hierarquia das Vias em Áreas Urbanas	22
Quadro 2.2 Características de Cruzamento na Hierarquia Funcional	24
Quadro 2.3 Indicadores de Desempenho	29
Quadro 2.4 Síntese das Principais Publicações Analisadas.....	47
Quadro 4.1 Análise dos Cruzamentos Cenário Base	64
Quadro 4.2 Análise dos Cruzamentos Cenário 4- Genético	68
Quadro 4.3 Análise dos Cruzamentos Cenário 5- Genético	70
Quadro 4.4 Análise dos Cruzamentos Cenário 6- Genético	72
Quadro 4.5 Análise dos Cruzamentos Cenário 2- Hill Climbing	74
Quadro 4.6 Análise dos Cruzamentos Cenário 1- Hill Climbing	77
Quadro 4.7 Análise dos Cruzamentos Cenário 9- Hill Climbing	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 Hierarquia Funcional das Vias Urbanas.....	23
Figura 2.2 Aproximações e Área de Conflito.....	26
Figura 2.3 Diagrama de Estágio	31
Figura 2.4 Rede Aberta e Rede Fechada	33
Figura 2.5 Histograma de Fluxo do Método do DENATRAN	34
Figura 2.6 Histograma de Fluxo HCM.....	35
Figura 2.7 Diagrama de Tempo-espaço para Via de Mão Dupla	43
Figura 2.8 Distribuição dos Trabalhos Científicos por Tipo	44
Figura 2.9 Produção Anual de Trabalhos Científicos.....	45
Figura 2.10 Produção de Trabalhos Científicos por País	46
<i>Figura 2.11 Percentual de Produção de Trabalhos Científicos e Citações por País</i>	<i>46</i>
Figura 2.12 Geometry Of Green Bands (Geometria de Banda Verdes).....	51
Figura 2.13 Projeto de Onda Verde de Progressão Bidirecional em Modo de Liberação Assimétrica	52
Figura 2.14 Demonstração de Otimização Pelo PTC VISTRO	56
Figura 3.1 Metodologia do TCC	57
Figura 3.2 Mapa Localização de Goiânia- GO.....	58
Figura 3.3 Ilustração da Área de Estudo	59
Figura 3.4 Resultado da Calibração do Modelo de Macrossimulação	61
Figura 3.5 Resultados do Modelo de Macrossimulação.....	61
Figura 4.1 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo - Cenário Base	65
Figura 4.2 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário Base.....	66
Figura 4.3 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 4 Genético.....	69
Figura 4.4 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 4- Genético.....	69
Figura 4.5 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 5 Genético.....	71
Figura 4.6 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 5- Genético.....	71
Figura 4.7 : Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 6 Genético.....	73
Figura 4.8 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 6- Genético.....	73
Figura 4.9 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 2 Hill Climbing.....	75
Figura 4.10 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 2 Hill Climbing.....	76
Figura 4.11 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 1 Hill Climbing.....	78

Figura 4.12 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 1 Hill Climbing.....	78
Figura 4.13 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 9 Hill Climbing.....	80
Figura 4.14 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 9 Hill Climbing	80
Figura 4.15 Comparação Diagrama Espaço Tempo do Fluxo.....	81
Figura 4.16 Comparação Diagrama Espaço Tempo do Fluxo.....	82

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANTP	Associação Nacional de Transporte Públicos
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DEM	Método dos Elementos Discretos (<i>Discrete Element Method</i>)
DENATRAN	Secretaria Municipal de Trânsito
DNER	Departamento Nacional de Estrada e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
FHC	Fator Hora Pico
HCM	Highway Capacity Manual (Manual de Capacidade de Estrada)
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
Ipea	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
SINATRAN	Sindicato dos Agentes de Trânsito em Goiânia
SMM	Secretaria Municipal de Mobilidade de Goiânia
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFG	Universidade Federal de Goiás

SÍMBOLOS

Letras Latinas

g_{ef}	verde efetivo
A	Amarelo foco
c	comprimento
d	trajetória
G	verde foco
I	Tempo perdido
n	número de fases
V	Velocidade
v	velocidade

Letras Gregas

Σ	Somatória
λ	Lambda

1 INTRODUÇÃO

O comportamento de mobilidade da população brasileira tem sofrido mudanças significativas desde meados do século passado. Essas transformações são resultado, principalmente, do rápido e desordenado crescimento urbano, bem como do aumento substancial da utilização do transporte motorizado individual pela população (Ipea, 2016).

Parte dos desafios urbanos enfrentados pela população brasileira nos dias atuais é atribuída ao rápido e intenso crescimento das cidades que se deu após o início da industrialização no país. Esse crescimento ocorreu sem que fossem realizados investimentos correspondentes na infraestrutura urbana, resultando em consideráveis deficiências nessa área. Um exemplo evidente desse descompasso entre o crescimento populacional e territorial acelerado e a ausência de investimentos é observado nos sistemas de transporte urbano, onde faltaram investimentos adequados tanto em transporte público de massa quanto em modos de transporte não motorizado (IPEA, 2016).

A ausência de planos estratégicos aliada à valorização imobiliária exacerbada no núcleo urbano central resultou em uma significativa quantidade de deslocamentos pendulares. Isso culminou em uma demanda que supera a capacidade dos sistemas viários existentes em determinados horários do dia, levando a situações em que esses sistemas operam saturados ou até mesmo supersaturados, resultando em congestionamentos com longas filas de veículos.

Esse tempo perdido no trânsito afeta diretamente a qualidade de vida das pessoas, a economia e o meio ambiente. Segundo a Confederação Nacional da Indústria (CNI, 2023), 8% da população brasileira gasta mais de 3 horas por dia em deslocamentos para realizar atividades cotidianas, como trabalho e estudo. Além disso, 7% das pessoas dedicam de 2 a 3 horas diárias ao trânsito, enquanto 21% gastam entre 1 e 2 horas, totalizando 36% da população que passa mais de 1 hora por dia em deslocamentos.

Portanto, mesmo que se alcance apenas uma melhoria modesta no tempo que as pessoas passam nas ruas, dentro de veículos, o impacto positivo será considerável em diversos setores. Nesse contexto, a gestão do tráfego nas cidades assume um papel crucial, visando otimizar o sistema para operar da maneira mais eficiente possível e minimizar o tempo de deslocamento das pessoas de suas origens aos destinos. Um dos aspectos

essenciais da gestão de tráfego é a coordenação dos semáforos, desempenhando um papel fundamental nesse processo, juntamente com outros fatores, como a definição da velocidade máxima das vias e o sentido das mesmas.

Segundo o *Highway Capacity Manual* de 2010 (Manual de Capacidade de Estrada, HCM), a falta de coordenação semaforica causa efeitos como: aumento da frequência de acidentes, aumento do tempo perdido para atravessar a interseção, desrespeito às indicações do semáforo, modificação das rotas, muitas vezes menos adequadas, na tentativa de evitar os semáforos, gastos não justificados para algo que poderia ser solucionado de forma mais econômica.

No primeiro plano diretor de 1938 para Goiânia, concebido por Atílio Corrêa Lima, foram estabelecidos quatro eixos estruturais principais representados pelas avenidas Goiás, Araguaia, Tocantins e Anhanguera, com ênfase na Avenida Anhanguera como principal via de tráfego e atividades comerciais. O planejamento visava garantir um fluxo eficiente de tráfego, mesmo diante de um crescimento urbano considerável (Adorno, 2002)

No entanto, o crescimento populacional acelerado da região metropolitana de Goiânia resultou na expansão da mancha urbana e em uma crescente demanda por transporte motorizado. Esse período também foi marcado por problemas que afetaram negativamente a mobilidade urbana e a qualidade do transporte público, incluindo instabilidade econômica, estagnação da expansão da rede, redução da qualidade dos serviços e omissão do poder público (Adorno 2002).

O modelo de transporte público ideal, proposto pelo Plano Diretor de 2007, enfatiza a importância da qualidade, rapidez e variedade dos serviços para todos os cidadãos, independentemente de sua localização na cidade. Para atingir esse objetivo, o plano destaca a necessidade de estruturar a rede viária com foco na segurança, qualidade de vida e integração territorial, favorecendo a acessibilidade e a circulação (Resende. U, 2014).

Como proposta, o trabalho deseja fazer um estudo de caso em uma das vias principais de Goiânia, sendo ela a Av. T-7, analisando a dissincronia da rede semaforica dessas vias.

1.1 PROBLEMA

Devido ao crescimento urbano de Goiânia e conseqüentemente suas dificuldades com o aumento do tráfego, o Mova-se Fórum de Mobilidade estimou com dados do SINATRA (2022) e dados da ANTP (2014) que o motorista goiano perde cerca de 8 segundos em cada semáforo devido à falta de sincronia entre a rede.

De que maneira o método Green Wave pode impactar positivamente o desempenho do fluxo no Corredor T-7? E quais os benefícios para os usuários da rota?

1.2 OBJETIVO

Neste contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) tem como objetivo comprovar que uma melhor sincronização da rede semafórica pode reduzir o tempo de viagem dos usuários das vias. O trabalho simulará o método de sincronização semafórica "green wave" ou "onda verde" para melhorar a trafegabilidade da circulação do transporte coletivo e do transporte privado na cidade de Goiânia.

Os objetivos específicos são apresentados a seguir:

- Desenvolver um plano semafórico aplicando o método de onda verde para um estudo de caso;
- Levantar na revisão bibliográfica indicadores de trafegabilidade;
- Levantar na revisão bibliográfica métodos de sincronização de semáforos;
- Desenvolver um modelo de simulação para aplicação da sincronização semafórica num estudo de caso aplicado a Goiânia.

1.3 JUSTIFICATIVA

A falta de sincronia entre os semáforos ao longo do corredor T-7 tem um impacto direto na qualidade de vida dos usuários da rede de transporte, tanto público quanto privado. São esses impactos que motivam o estudo da viabilidade da implementação de um sistema de onda verde, visando aprimorar e desafogar o movimentado corredor T-7. É importante destacar que este trabalho emprega uma abordagem que inclui o uso de software para recálculo do tempo de sinal verde nos cruzamentos, evidenciando que a

sincronização dos semáforos é fundamental para promover a harmonia entre o transporte público e o individual.

No âmbito deste estudo, a proposta central consiste na simulação de um caso de aplicação da onda verde como uma estratégia para otimizar a mobilidade no corredor T-7, da qual foi uma proposta implementada pela Secretaria Municipal de Mobilidade de Goiânia como área de estudo

É importante realizar simulações para que seja possível comparar diversos cenários, chegando assim na conclusão alcançada pelo objetivo proposto. Vale ressaltar que o *Green Wave* foi escolhido para o teste das simulações.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRAFEGABILIDADE

2.1.1 Classificação das vias

Ao se compreender o conceito da Engenharia de Tráfego, é crucial adquirir conhecimento sobre os conceitos e classificações das vias, bem como entender os passos essenciais no planejamento viário. Isso se deve ao fato de que as responsabilidades de um engenheiro de transportes incluem o dimensionamento e a organização de sistemas viários que atendam às necessidades da população.

Seguindo esse contexto, tem-se que o sistema necessita de uma hierarquia em seu sistema viário, localizado no Quadro 2.1, que por sua vez é definida pelo DNIT, 2010 (Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes), a qual classifica as vias de modo funcional essa classificação adota como principais critérios a mobilidade e a acessibilidade, onde o primeiro representa a facilidade de se deslocar e o segundo a facilidade de conectar a origem de uma viagem com o seu destino.

Quadro 2.1 Hierarquia das Vias em Áreas Urbanas

Arterial	Coletor	Local
Sistema Arterial Principal Sistema Arterial Secundário	Sistema Coletor	Sistema Local

Fonte: DNER (1974).

O estudo do projeto, será referente a cidade de Goiânia, da qual foi analisado o Corredor T-7, composto por 6 avenidas das quais se classificam como arterial principal, sendo elas Av. Araxá; Av. C-17; Av. C-12; Av. C-04; Av. T-7; Av. Assis Chateaubriand.

Segundo o Anexo 1 do Código de Trânsito Brasileiro, juntamente com o Art. 61, tem-se as seguintes definições:

- **Via de trânsito rápido:** Aquela caracterizada por acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e

sem travessias de pedestres em nível. E onde não há sinalização regulamentadora no meio urbano, a velocidade máxima da via como 80 Km/h;

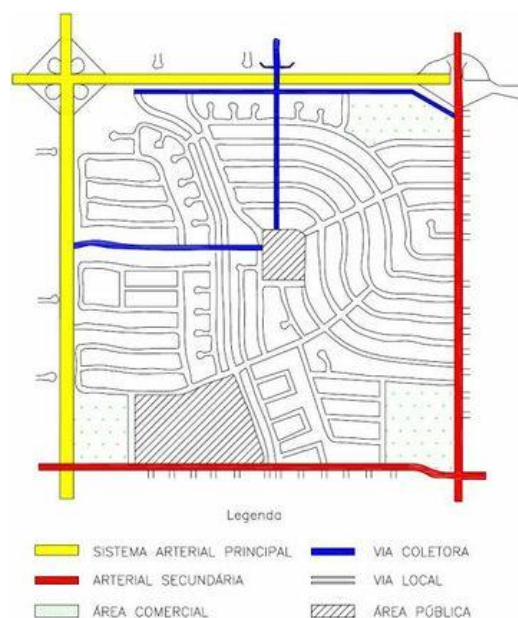
- **Via arterial:** Aquela caracterizada por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade. E onde não há sinalização regulamentadora no meio urbano, a velocidade máxima da via como 60 Km/h;

- **Via coletora:** Aquela destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade. E onde não há sinalização regulamentadora no meio urbano, a velocidade máxima da via como 40 Km/h;

- **Via local:** Aquela caracterizada por interseções em nível não semaforizado, destinada apenas ao acesso local ou áreas restritas. E onde não há sinalização regulamentadora no meio urbano, a velocidade máxima da via é de 30 km/h.

De forma simplificada, é possível identificar as características que normalmente estão presentes nos cruzamentos de vias que seguem a hierarquia funcional na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, e no Quadro 2.2:

Figura 2.1 Hierarquia Funcional das Vias Urbanas



Fonte: DNIT (2010).

Quadro 2.2 Características de Cruzamento na Hierarquia Funcional

	Local	Coletora	Arterial	Expressa
Local	Interseções sem controle de tráfego			
Coletora	Interseções com sinalização de prioridade	Interseções semaforizadas (todos movimentos permitidos)		
Arterial	Não deve ocorrer	Interseções semaforizadas (alguns movimentos proibidos)	Interseções semaforizadas (alguns movimentos proibidos)	
Expressa	Não deve ocorrer	Não deve ocorrer	Cruzamento em desnível (ou conexão por ramais de acesso)	Cruzamento em desnível (ou conexão por ramais de acesso)

Fonte: HCM (2016).

2.1.2 Condições de oferta

Diversos fatores influenciam as condições de oferta em uma via, e sua classificação, como mencionado anteriormente, de certa forma leva esses fatores em consideração. Essencialmente, existem dois tipos básicos de condições de oferta: operação em fluxo contínuo (ou ininterrupto) e operação em fluxo descontínuo (ou interrompido). Neste trabalho, as condições de oferta do corredor têm características de Fluxo Descontínuo.

2.1.2.1 Fluxo Contínuo

A condição de fluxo contínuo é aquela na qual as condições operacionais são determinadas pela interação entre veículos dentro da corrente de tráfego (HCM, 2010). Isso significa que as interrupções possíveis ocorrem devido a fatores internos ao fluxo de tráfego, como acidentes.

2.1.2.2 Fluxo Descontínuo

A condição de fluxo descontínuo é aquela na qual as condições operacionais são dominadas por interrupções periódicas causadas por elementos externos à corrente de tráfego, usualmente dispositivos de sinalização ou outras correntes de tráfego preferenciais. (HCM, 2010)

2.1.3 Movimentos, Aproximação e Interseção

2.1.3.1 Movimento e Aproximação

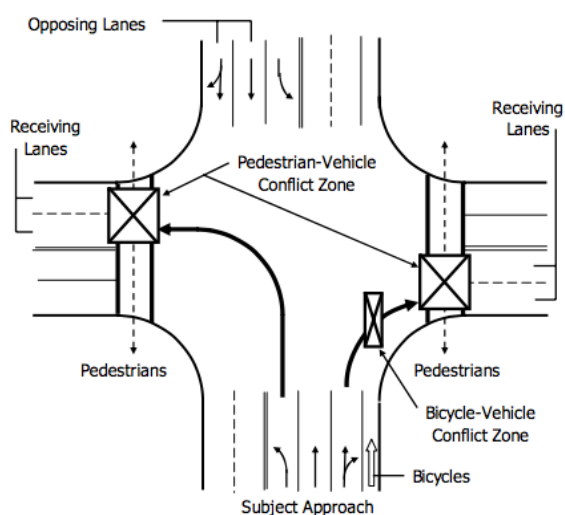
O termo "movimento", segundo o DENATRAN (2014), é usado para identificar o fluxo de veículos que tem a mesma origem e mesmo destino, e/ou o fluxo de pedestres que se deslocam na mesma direção, mas não necessariamente no mesmo destino. Assim sendo, os movimentos podem ter duas classificações, sendo eles:

- Aproximação: são os trechos da via por onde os veículos chegam à interseção;
- Área de Conflito: são as regiões da interseção onde ocorre a interferência de movimentos veiculares a partir de diferentes aproximações.

Pode-se classificar os movimentos com base na interação de seus trajetos, representados na Figura 2.2 Aproximações e Área de Conflito. Portanto, os movimentos podem ser divididos em:

- a) Convergentes: diferentes aproximações, mas destinos iguais;
- b) Divergentes: mesma aproximação, mas destinos diferentes;
- c) Interceptastes: aproximações e destinos diferentes e os trajetos se cruzam em algum ponto;
- d) Não Interceptastes: aproximações e destinos diferentes, mas os trajetos não se cruzam.

Figura 2.2 Aproximações e Área de Conflito



Fonte: HCM (2010).

2.1.3.2 Interseções

Com base no DNIT (2005), uma interseção é a área em que duas ou mais vias se unem ou se cruzam, onde todo o espaço é destinado a facilitar os movimentos dos veículos que por ela circulam. Tendo como base, as interseções se classificam em: Nível e Capacidade.

a) Nível:

Nas interseções em diferentes níveis, é possível identificar a presença ou ausência de troca de fluxos de tráfego entre as vias que se interceptam. Quando não ocorre troca de fluxo de tráfego, essa configuração é denominada de cruzamento em diferentes níveis sem ramos, sendo classificada como passagem superior quando a via principal transpassa sobre a via secundária ou como passagem inferior quando a via principal transpassa sob a via secundária. No caso de haver troca de fluxo de tráfego, essa configuração é conhecida como interconexão e pode ser categorizada em sete tipos básicos:

- Interconexão em “T” ou “Y”: quando a interconexão possui três ramos. Há um caso especial, quando uma das correntes de tráfego de um ramo executar giro próximo de 270º e é denominada de “trombeta”;
- Diamante: quando a via principal apresenta uma saída à direita antes e uma entrada à direita após o cruzamento, para cada sentido;
- Trevo completo: quando os movimentos de conversão à esquerda são feitos por laços e à direita por conexões externas aos laços;
- Trevo parcial: quando há eliminação de um ou mais ramos de um trevo completo, restando pelo menos um laço;
- Direcional: quando os principais movimentos de conversão à esquerda são realizados com ramos direcionais. No caso de todos os movimentos serem feitos por ramos direcionais, a interconexão diz totalmente direcional;
- Semidirecional: quando os principais movimentos de conversão à esquerda são realizados por ramos semidirecionais;
- Giratório: quando há utilização de rótula na via secundária.

b) Capacidade:

É a máxima taxa de fluxo permitida em uma seção de via durante um período dado, sob condições prevaletentes da via, do tráfego e do controle de tráfego (Medrano, 2022). Sendo assim, capacidade trabalha com:

- *Fluxo (Volume)*: o número total de veículos que passa num determinado ponto ou seção de uma faixa ou via durante um dado intervalo de tempo;
- *Taxa de Fluxo*: taxa horária equivalente ao fluxo dos veículos que passam por um dado ponto ou seção de uma faixa ou via durante um dado intervalo de tempo menor que uma hora, normalmente 15 min;
- *Fator de Hora Pico (FHC)*: razão entre o volume horário total e a taxa de fluxo máxima dentro da hora de pico.

2.1.3.3 Níveis de Serviço e Indicadores de Desempenho

Com base nos conceitos abordados anteriormente, o Highway Capacity Manual (HCM, 2010) propôs níveis de serviços e indicadores de desempenho para o desenvolvimento da trafegabilidade urbanística, dentre as classificações tem-se que:

- a) Níveis de Serviço: é uma medida qualitativa que expressa as condições de uma corrente de tráfego e a forma como são percebidas pelos usuários:
- Velocidade e tempo de viagem;
 - Liberdade de manobras;
 - Interrupções do tráfego;
 - Segurança, conforto e conveniência.

b) Indicadores de Desempenho

Segundo Medrano (2022), indicadores de desempenho são variáveis usadas para avaliar quantitativamente a capacidade segundo a facilidade considerada, de acordo com o Quadro 2.3, apresentado a seguir.

Quadro 2.3 Indicadores de Desempenho

Tipo de Facilidade	Indicador de Desempenho	Unidade
Freeways: segmentos básicos, área de entrelaçamento, junções de rampa	Densidade, velocidade média no espaço, taxa de fluxo	ucp/km-fx Km/h ucp/h
Rodovias multi faixas	Densidade, velocidade de fluxo livre	ucp/km-fx Km/h
Rodovias de duas faixas	Atraso percentual, velocidade média da viagem	% Km/h
Interseções semaforizadas	Atraso médio de parada	s/veic
Interseções com regra de prioridade	Atraso médio total	s/veic
Artérias	Velocidade média no espaço	Km/h
Transporte coletivo	Fator de carga	pass./assento
Áreas de pedestres	Espaço	M ² /pedestre

Fonte: HCM 2010.

2.2 CORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

2.2.1 Sinalização Semafórica

Conforme definido pelo DENATRAN (2014), a sinalização semafórica é um subsistema da sinalização viária que utiliza indicações luminosas para comunicar mensagens específicas aos usuários das vias públicas. Ela desempenha um papel fundamental na regulamentação do direito de passagem e na gestão de situações especiais nas estradas. Além disso, a sinalização semafórica pode ser dividida em dois tipos principais: regulamentação e advertência.

Dentro do escopo deste projeto, será abordada exclusivamente a sinalização semafórica de regulamentação. Esta categoria engloba diversos tipos de semáforos, incluindo os veiculares, veiculares direcionais, pedestres e ciclistas. Embora cada um desses tipos apresente diferenças distintas, a análise se concentrará no semáforo veicular, que é o modelo predominante na região de estudo.

É importante ressaltar que também são comuns na área de estudo os semáforos para pedestres. Esses semáforos possuem focos luminosos vermelhos e verdes, operando de forma semelhante aos semáforos para veículos.

2.2.2 Conceitos Básicos para a Coordenação Semafórica

Antes de prosseguir é necessário entender um pouco sobre alguns conceitos básicos da coordenação semafórica, os estudos são baseados no HCM (2010), das quais:

- a) Semáforo: dispositivo de controle de tráfego que através de indicações luminosas altera o direito de passagem de motoristas e/ou pedestres.
- b) Grupo: conjunto de semáforos de uma interseção que apresentam a mesma informação luminosa p/ determinado movimento.
- c) Controlador: equipamento que atua diretamente nos semáforos, responsável pela sequência de cores ao longo do tempo.
- d) Estágio: situação dos semáforos de uma interseção durante um período que dá direito de passagem a uma ou mais correntes de tráfego e no qual não há mudança de cores.

- e) Fase: sequência de cores verde, amarelo, vermelho, aplicada a uma ou mais correntes de tráfego
- f) Ciclo: sequência completa de operação da sinalização, durante a qual, todos os estágios existentes na interseção devem ser atendidos pelo menos uma vez.
- g) Aproximação: trecho da via que converge para a interseção.
- h) Entreverdes: período de tempo compreendido entre o fim do verde de um estágio e o início do verde do estágio seguinte.
- i) Diagrama de Estágios: é a representação esquemática da sequência de movimentos permitidos e proibidos para cada intervalo do ciclo.

Figura 2.3 Diagrama de Estágio



Fonte: DENATRAN 2014.

- j) *Diagrama de Tempos (Barras)*: representação em escala da sequência de cores para as diversas fases de um ciclo.

2.2.3 Estratégia de Controle

De acordo com o HCM (2010), o semáforo é comandado por um equipamento chamado controlador de tráfego, o qual envia pulsos elétricos para comutação das luzes dos focos. De acordo com o tipo de controlador que utiliza, os semáforos podem operar dos seguintes modos: operação de tempo fixo, operação semi-atuada, operação totalmente atuada.

Seguindo essa linha de raciocínio, o HCM (2010) cita que existem tipos básicos de controladores automáticos, sendo: semáforo isolado por demanda de tráfego, sistema atuado para uma rede de semáforos, sistema centralizado de controle por computador e um sistema de controle em tempo real.

Segundo o Manual de Semáforos do DENATRAN (1984), existem alguns critérios para a instalação dos semáforos, sendo:

- volumes veiculares mínimos em todas as aproximações da interseção
- interrupção de tráfego contínuo
- volumes conflitantes em interseções de cinco ou mais aproximações
- volumes mínimos de pedestres que cruzam a via principal
- índice de acidentes e os diagramas de colisão
- melhoria de sistema progressivo
- controle de áreas congestionadas
- combinação de critérios
- situações locais específicas

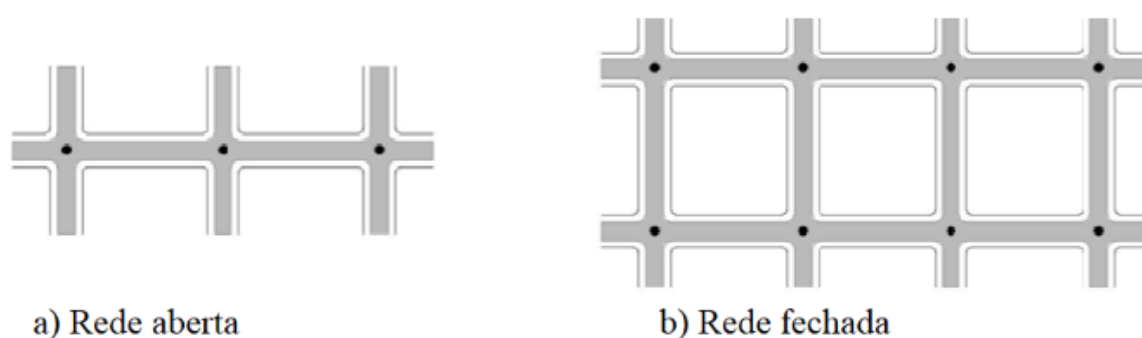
2.2.4 Tipos de Sistemas de Coordenação Semafórica

Segundo Miranda (2018), nos sistemas de coordenação semafórica, existem dois tipos de controle: rede aberta e rede fechada. No primeiro cenário, um sistema de controle é adotado para dar prioridade a uma via com várias interseções, geralmente sendo aplicado em uma via arterial. Isso permite estabelecer uma progressão contínua do fluxo de tráfego através da criação de defasagens entre os semáforos, criando uma espécie de "onda verde". Essa denominação deriva do fato de que os veículos que se deslocam a uma

velocidade conhecida podem passar por várias interseções sem ter seu movimento interrompido por sinais de luz vermelha.

Por outro lado, no segundo cenário, considera-se um conjunto de interseções localizadas em diferentes vias. Nesse caso, são utilizadas defasagens consistentes para que toda a rede de semáforos se beneficie do controle coordenado (Feriancic, 2018). A Figura 2.1 ilustra a seguir o comportamento de rede aberta e fechada.

Figura 2.4 Rede Aberta e Rede Fechada



FONTE: DENATRAN, 2014.

2.2.5 DIMENSIONAMENTO

O HCM 2000, traz consigo um roteiro para o dimensionamento de semáforos, segue o roteiro proposto pelo mesmo.

Roteiro para Dimensionamento de Semáforos HCM 2010:

- 1º) Determinar os fluxos de saturação das aproximações.
- 2º) Determinar a demanda horária (veic/h) das aproximações.
- 3º) Determinar o diagrama de estágios e as fases respectivas do cruzamento.
- 4º) Calcular as taxas de ocupação das aproximações e a partir dos valores críticos
- 5º) determinar Y .
- 6º) Calcular o tempo perdido total (T_p) a partir do tempo perdido de cada fase (I).
- 7º) Calcular o ciclo ótimo pela fórmula de Webster.
- 8º) Determinar os tempos de verde efetivo de cada fase do cruzamento.
- 9º) Determinar os tempos de verde de foco para implantação no controlador de tráfego.

Com base no manual HCM, serão abordados alguns conceitos utilizados para o dimensionamento de semáforos.

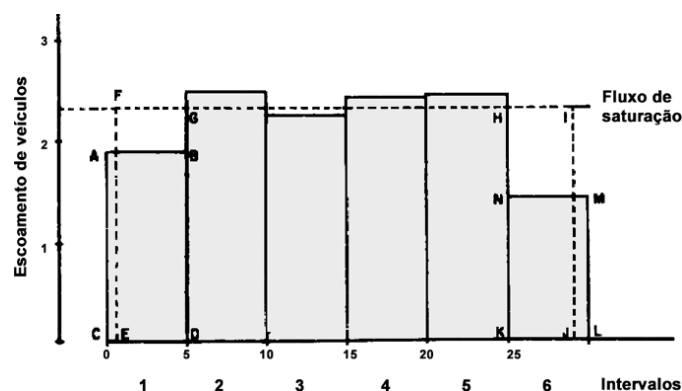
2.2.5.1 Fluxo de Saturação e Aproximação

Para determinar o Fluxo de Saturação existem quatro principais modelos propostos, sendo eles: Método HCM 2000, ARRB 1993, Shanteau 1988 e Método DENATRAN 1984. Como as vias analisadas se encontram em um município brasileiro, o trabalho tem enfoque em analisar os fluxos pelos métodos do DENATRAN e pelo HCM que hoje se encontra como referência e atualizado.

a) Fluxo de Saturação DENATRAN 1984:

De acordo com o Manual de Semáforos do DENATRAN (1984), o método recomendado para identificar o fluxo de saturação é o uso de histogramas de tráfego. Esses histogramas têm o propósito de representar graficamente a relação entre o fluxo de veículos e o tempo, seguindo o padrão adotado por Webster. Essa abordagem pode ser aplicada tanto a faixas de tráfego individuais quanto a análises abrangentes de aproximações viárias completas. A Figura 2.5 ilustra o método proposto.

Figura 2.5 Histograma de Fluxo do Método do DENATRAN



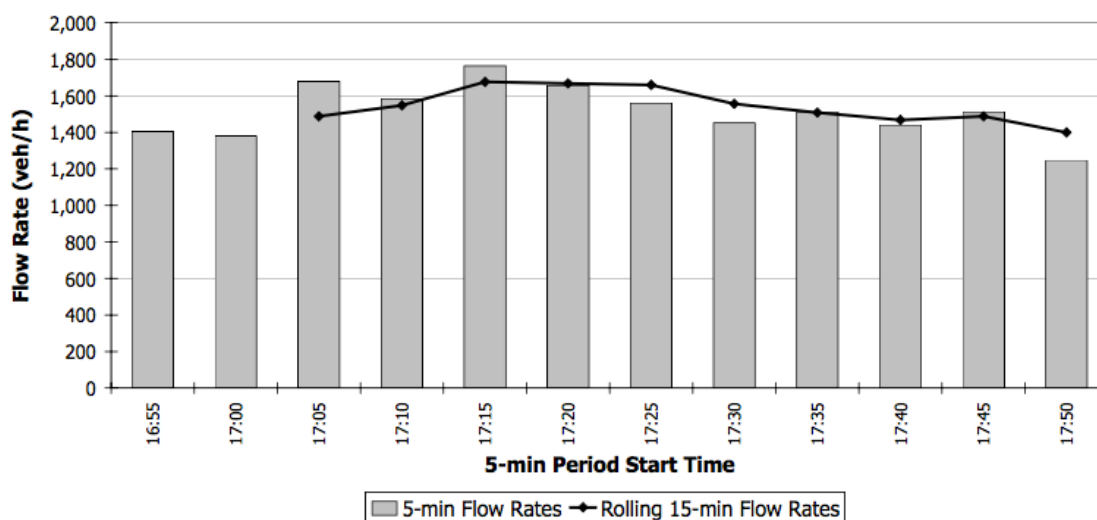
Fonte: DENATRAN, 2008.

b) Fluxo de Saturação HCM 2000:

O método proposto pelo HCM 2000 define que o início do regime saturado é determinado pela passagem do quarto veículo que estava parado na fila pela retenção, e esse regime chega ao fim quando o último veículo que estava completamente parado passa pela área afetada. O cálculo do fluxo de saturação envolve a relação entre o número de veículos liberados enquanto o tráfego está saturado e o tempo total decorrido desde o início do sinal verde até a passagem do último veículo que estava parado, subtraindo o tempo de passagem do quarto veículo.

Para obter o fluxo de saturação que representa a condição do local e do período em questão, é necessário calcular a média dos fluxos de saturação de múltiplos ciclos. Este método requer a amostragem de pelo menos 15 ciclos, com um mínimo de nove veículos na fila inicial. Vale ressaltar que, de acordo com esse método, os tempos perdidos não são diretamente obtidos a partir dos dados coletados, mas sim estimados com base nos tempos entre-verdes.

Figura 2.6 Histograma de Fluxo HCM



Note: SW 72nd Avenue at Dartmouth Street, Tigard, Oregon, 2008.

Fonte: HCM, 2010.

2.2.5.2 Dimensionamento Entreverdes

O dimensionamento entreverdes é um aspecto crucial do planejamento e gerenciamento de tráfego urbano, destinado a otimizar a segurança e eficiência nas interseções semaforizadas. Segundo o HCM, este processo envolve a determinação precisa dos tempos de ciclo semaforico para garantir a fluidez do tráfego e a segurança de todos os usuários da via, incluindo veículos, ciclistas e pedestres.

a) **Espaçamento:**

Espaçamento é a distância entre veículos sucessivos, medida a partir do mesmo ponto em cada veículo em um fluxo de tráfego (HCM, 2010).

b) **Headway:**

Headway é o intervalo de tempo entre sucessivos veículos ao passarem por um ponto em uma faixa ou estrada, medido a partir do mesmo ponto em cada veículo (HCM, 2010).

A relação entre o espaçamento médio e o *headway* em um fluxo de tráfego depende da velocidade, conforme indicado na equação 2.1:

$$Headway (s/veic.) = \frac{espaçamento (ft (pés)/veic)}{V (ft/s)} \quad (2.1)$$

Tanto o espaçamento quanto a velocidade podem ser transformadas para metros e metro por segundo para atender as normas do Brasil.

c) **Verde Efetivo (g_{ef}):**

Período em que o escoamento de veículos se dá no fluxo de saturação (HCM, 2010). Representado pela equação 2.2:

$$g_{ef} = g + A - I \quad (2.2)$$

em que,

g_{ef} = verde efetivo;

g = verde foco;

A = amarelo foco;

I = tempo perdido.

d) Tempo Perdido ou Tempo Morto:

Período durante o qual não há fluxo de veículos, devido às reações dos motoristas no início e no fim do verde (HCM, 2010). Representado pela equação 2.3:

$$I = (g + A) - g_{ef} \quad (2.3)$$

em que,

g = verde foco;

A = amarelo foco;

g_{ef} = verde efetivo.

e) Tempo Perdido Total:

Soma dos tempos perdidos por fase (HCM, 2010), representado pela equação 2.4:

$$T_p = \sum_{i=1}^n I \quad (2.4)$$

em que,

T_p = tempo perdido total;

I = tempo perdido;

n = número de fases.

f) Tempo Entre Verdes:

Este tempo tem a função de assegurar a travessia da interseção por veículos que, ao receberem a indicação amarela, se encontrem a uma distância da linha de retenção insuficiente para parar com segurança (HCM, 2010). Representado pela equação 2.5:

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm i \times g)} + \frac{d_2 + c}{v} \quad (2.5)$$

em que,

t_{ent} = tempo de entreverdes para o grupo focal de veículos, em segundos (s);

t_{pr} = tempo de percepção e reação do condutor, em segundos (s);

v = velocidade do veículo, em m/s;

a_{ad} = máxima taxa de frenagem admissível em via plana, em m/s^2 ;

i = inclinação da via na aproximação, sendo “+” em rampas ascendentes e “-“ em rampas descendentes (m/m);

g = aceleração da gravidade ($9,8 m/s^2$);

d_2 = extensão da trajetória do veículo entre a linha de retenção e o término da área de conflito, em metros (m);

c = comprimento do veículo, em metros (m)

g) Tempo de Amarelo:

O tempo de amarelo corresponde ao tempo necessário para que um condutor que trafega com a velocidade máxima da via consiga reagir a mudança do foco luminoso e frear o veículo antes de encontrar a linha de retenção (Miranda, Frohlich, Otsubo, Ferreira, 2018). Representado pela equação 2.6:

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm i \times g)} \quad (2.6)$$

em que,

t_{am} = tempo de amarelo, em segundos (s);

t_{pr} = tempo de percepção e reação do condutor, em segundos (s);

v = velocidade do veículo, em m/s;

a_{ad} = máxima taxa de frenagem admissível em via plana, em m/s^2 ;

i = inclinação da via na aproximação, sendo “+” em rampas ascendentes e “-“ em rampas descendentes (m/m);

g = aceleração da gravidade ($9,8 m/s^2$)

h) Tempo Vermelho Geral:

Este tempo tem a função de assegurar a travessia da interseção por veículos que, ao receberem a indicação amarela, se encontrem a uma distância da linha de retenção insuficiente para parar com segurança (HCM, 2010). Representado pela equação 2.7:

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v} \quad (2.7)$$

i) Taxa de Ocupação (y):

É o cálculo da taxa de ocupação de veículos (HCM 2010). Determinada pela equação 2.8.

$$y = \frac{\text{demanda}}{\text{fluxo de saturação}} = \frac{q_i}{S_i} \quad (2.8)$$

em que,

y = taxa de ocupação;

q_i = demanda;

S_i = fluxo de saturação.

j) Grau de Saturação:

Segundo o HCM (2010), Grau de saturação reflete o nível de carregamento da via, ou seja, ele aponta o grau do fluxo de saturação. Pode-se dizer que o grau de saturação de um link é de 100% ($x = 1$) é o mesmo que dizer que seu tempo de verde é exatamente suficiente para escoar todos os veículos que chegam desde que atravessem a retenção no patamar do fluxo de saturação; nenhum veículo a mais poderia ter sido atendido (se não x teria sido menor do que 1) e nenhum veículo chegou a ficar retido no instante que o verde terminou (se não x teria sido maior do que 1).

$$X_i = \frac{\text{demanda}}{\text{capacidade}} = \frac{q_i}{\frac{S_i \times g_{ef}}{C}} = y_i \times \frac{C}{g_{ef}} \quad (2.9)$$

em que,

X_i = grau de saturação;

y_i = taxa de ocupação;

q_i = demanda;

S_i = fluxo de saturação;

C = capacidade;

g_{ef} = verde efetivo.

k) Tempo de Ciclo Mínimo:

Tempo para escoar veículos no período de verde, evitando a formação de filas, através do método do Grau de Saturação (HCM, 2010). É importante destacar que o Tempo de Ciclo Mínimo irá contar com três equações, sendo elas determinadas a seguir:

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_i^n p_i} \quad (2.10)$$

em que,

t_c = tempo de ciclo, em segundos (s);

T_p = tempo perdido total, em segundos (s);

n = número de estágios;

p_i = fração de verde requerida para estágio i .

$$p_i = \frac{y_i}{xm_i} \quad (2.11)$$

em que,

p_i = fração de verde requerida para estágio i ;

y_i = taxa de ocupação do grupo em movimentos crítico do estágio i ;

xm_i = grau de saturação máximo definido para o grupo de movimentos críticos do estágio.

$$t_c = \frac{xm \times T_p}{xm - \sum_i^n y_i} \quad (2.12)$$

l) Tempo de Ciclo Ótimo:

Tempo para escoar veículos no período de verde, sem formação de fila, adotado pelo Modelo de Webster (HCM, 2010). Representado pela equação 2.13.

$$t_{co} = \frac{1,5 \times T_p + 5}{1 - \sum_i^n y_i} \quad (2.13)$$

em que,

t_{co} = tempo de ciclo ótimo, em segundos (s);

T_p = tempo perdido total, em segundos (s);

y_i = taxa de ocupação do grupo em movimentos crítico do estágio i;

n = número de estágios.

m) Tempo de Ciclo:

Para o caso em que o verde calculado seja inferior ao verde de segurança, o HCM (2010) propõe a seguinte equação.

$$t_c = \left(\frac{\sum_{i=1}^n y_i}{y_j} \right) \times (t_{v,seg,f} + t_{ent,j} - t_{pin,j} - t_{pf,n,j}) + T_p \quad (2.14)$$

em que,

t_c = tempo de ciclo, em segundos (s);

T_p = tempo perdido total, em segundos (s);

y_i = taxa de ocupação do grupo em movimentos crítico do estágio i;

n = número de estágios.

t_{ent} = tempo de entreverdes para o grupo focal de veículos, em segundos (s);

t_{pin} = tempo inicial, em segundos, (s);

$t_{pf,n}$ = tempo final, em segundos (s).

n) Tempo de Segurança:

Os tempos de verde excessivamente curtos não são admissíveis, mesmo que sejam suficientes para atender a sua demanda, pois conduzem a situações com alto potencial de acidentes. Para evitar tais acidentes, o HCM (2010), propôs um parâmetro denominado tempo de verde de segurança, o que corresponde a um valor mínimo admissível para o

tempo de verde. Os valores utilizados variam entre 10 a 20 segundos, não sendo admitido valores inferiores a 10 segundos.

o) Brecha:

De acordo com o HCM (2010), uma brecha pode ser definida como o período de tempo disponível para que um veículo, localizado em uma via secundária, atravesse com segurança a via principal ou se integre na corrente de tráfego dessa via. Esse conceito é especialmente aplicável a interseções controladas por regras de prioridade e leva a três definições específicas: brechas disponíveis, brechas aceitáveis e brechas críticas.

- Brechas Disponíveis: são brechas que ocorrem na corrente principal.
- Brechas aceitáveis: são as brechas disponíveis suficientemente grandes para que possam ser usadas para as manobras na interseção pelos veículos da corrente de tráfego secundária.
- Brechas Críticas: É a menor das brechas aceitáveis

p) Atraso:

O atraso é a porção do tempo gasto em uma viagem que excede o tempo desejado pelo usuário. Esse atraso ocorre devido às paradas obrigatórias que o motorista ou o veículo precisam fazer ao longo da viagem, bem como à circulação em uma velocidade inferior à desejada (HCM, 2010). Tendo em vista os atrasos dos veículos, Webster propõe a seguinte equação para calcular o atraso médio por veículo, demonstrada abaixo.

$$d = \frac{c(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65\left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot x^{(2+5\lambda)} \quad (2.15)$$

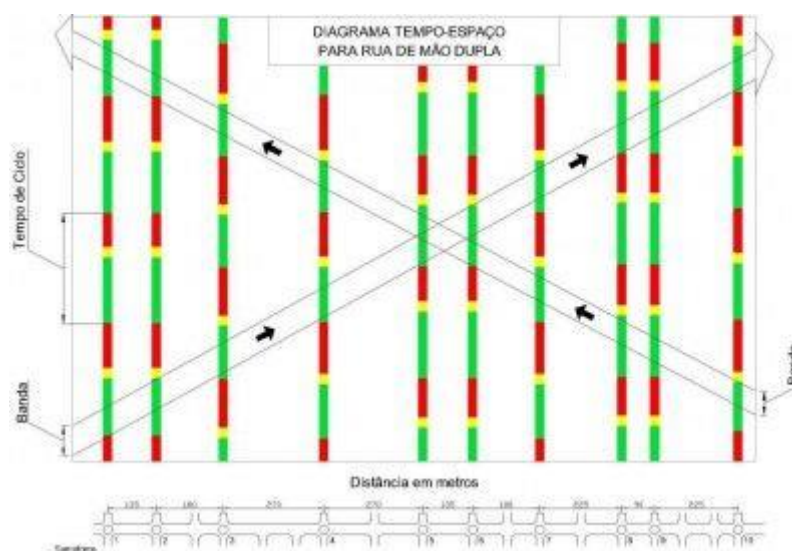
$$x = \frac{\text{demanda}}{\text{capacidade}} = \frac{\text{demanda}}{S \cdot \frac{g_{ef}}{\text{ciclo}}} \quad (2.16)$$

em que,
 d = atraso médio;
 c = ciclo;
 λ = relação verde efetivo/ tempo de ciclo;
 q = demanda (veic/seg);
 x = grau de saturação.

2.2.6 Defasagem

Defasagem, de acordo com o Pietrantonio (2018), é o intervalo de tempo estabelecido entre interseções adjacentes em um sistema de controle de tráfego. Essa defasagem pode ser positiva, quando se refere a um ponto à frente da interseção de referência, ou negativa, quando está situada após essa interseção. A defasagem desempenha um papel essencial na coordenação eficaz do tráfego, permitindo que os semáforos funcionem de maneira sincronizada para facilitar o fluxo contínuo e seguro de veículos nas estradas. Seu valor é calculado levando em consideração diversos fatores, como o tempo de ciclo, a geometria da via e as necessidades de coordenação entre diferentes interseções (DENATRAN, 2014).

Figura 2.7 Diagrama de Tempo-espço para Via de Mão Dupla



Fonte: DENATRAN, 2014.

2.2.7 Método de sincronização da Onda Verde (*Green Wave*)

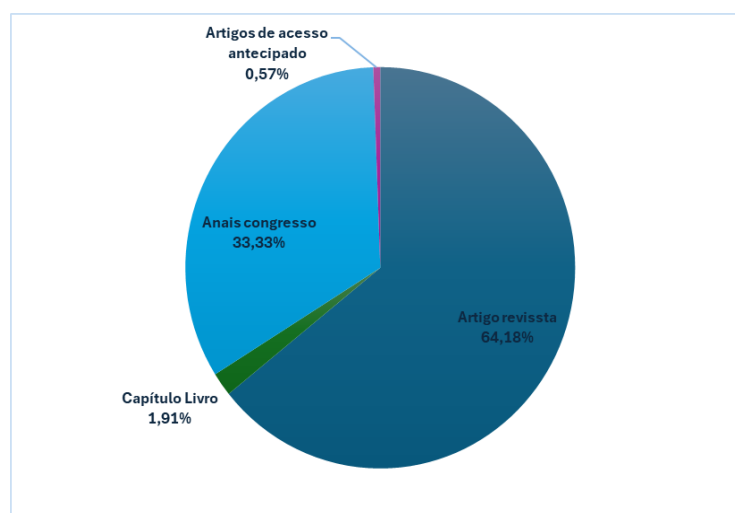
Para o levantamento do banco de dados de publicações científicas a serem consultadas nesta análise bibliométrica foram utilizadas palavras-chave em língua inglês. Os bancos de dados consultados foram o SCOPUS e Web of Science. Um total de 1121 artigos entre o período de 1999 à 2024 foram levantados dos dois bancos de publicações científicas.

Os termos de cada categoria foram conectados pelo operador booleano “OR”, ou seja, desde que um dos termos de cada categoria ocorresse, ele seria incluído no resultado da busca. Entre as categorias, utilizou-se o operador booleano “AND”, significando que três termos de busca deveriam ser atendidos simultaneamente. As classificações totais dos termos de pesquisa utilizados são apresentadas a seguir:

- I. “traffic light” OR “traffic signal” OR "urban traffic light"
- II. “green wave” OR “sincronization” OR “optimization” OR “coordination”

Considerando só as publicações em artigos, livros, capítulos de livro e anais de congresso, o total de publicações científicas cai para 1.047. A distribuição das publicações por tipo é apresentada na Figura 2.8. Observa-se que 64,18% das publicações foram artigos em revistas científicas e 33,33% foram publicações em anais de congresso.

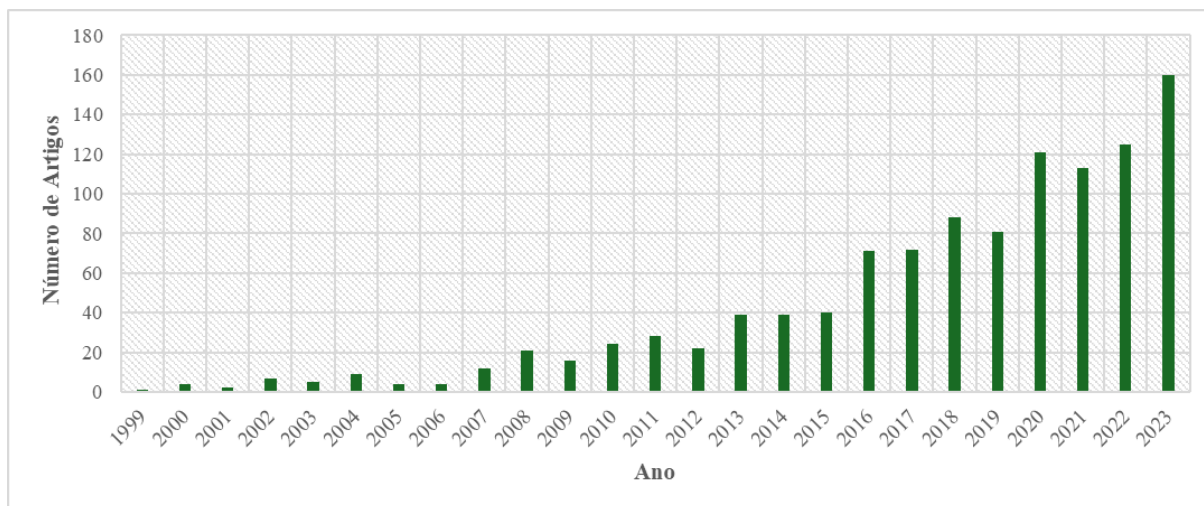
Figura 2.8 Distribuição dos Trabalhos Científicos por Tipo



Fonte: Elaboração autor, Fonte dos dados: Scopus e Web of Science, 2024.

Analisando a evolução das publicações científicas, observa-se que a partir do ano 1.999 teve um aumento das publicações na área de sinalização semafórica. Onde 2023 foi o ano com a maior produção de publicações científicas com um total de 160 (Figura 2.9).

Figura 2.9 Produção Anual de Trabalhos Científicos

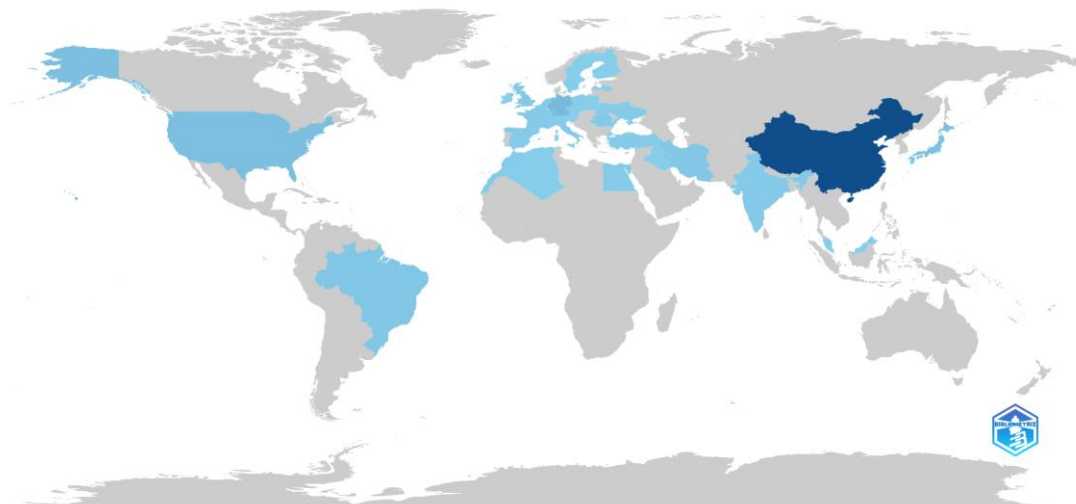


Fonte: Elaboração autor, Fonte dos dados: Scopus e Web of Science, 2024.

A maior parte das publicações encontradas na revisão bibliográfica foram produzidas na China, logo a Alemanha ocupa o segundo lugar na produção de trabalhos científicos. Finalmente, os Estados Unidos se colocam no terceiro lugar como o terceiro país com maior produção de trabalhos científicos sobre o tema, conforme pode ser visualizado na Figura 2.10.

Figura 2.10 Produção de Trabalhos Científicos por País

Country Scientific Production

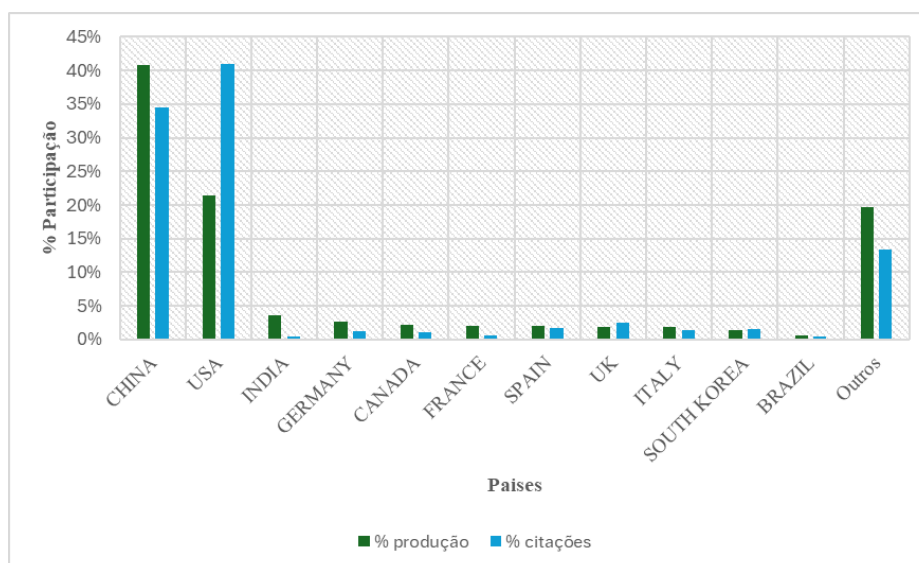


Fonte: Autor, Fonte dos dados: Scopus e Web of Science, 2023.

Observa-se também que as maiores citações foram de trabalhos científicos produzidos no país da China, posteriormente, os Estados Unidos encontram-se com o segundo lugar de citação de trabalhos científicos. Como é apresentado na

Figura 2.11.

Figura 2.11 Percentual de Produção de Trabalhos Científicos e Citações por País



Fonte: Autor, Fonte dos dados: Scopus e Web of Science, 2023.

Com base no levantamento bibliométrico foram consultados os principais autores e alguns trabalhos anteriores ao período de pesquisa também foram consultados na revisão bibliográfica para definição dos conceitos sobre o método de onda verde. No Quadro 2.4 é realizado a lista dos principais trabalhos analisados na revisão bibliográfica.

Quadro 2.4 Síntese das Principais Publicações Analisadas

Autores	Ano	Total de Citação	Título	Revista
John D. Little	1966	514	The Synchronization of Traffic Signals by Mixed-Integer Linear Programming	Operations Research
Nathan H. Gartner et al.	1991	403	A multi-band approach to arterial traffic signal optimization	Transportation Research Part B: Methodological
Madhalva Madireddy et al.	2011	136	Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach	Transportation Research Part D: Transport and Environment
Duerr, P. A.	2000	39	Dynamic Right-of-Way for Transit Vehicles: Integrated Modeling Approach for Optimizing Signal Control on Mixed Traffic Arterials	Transportation Research Record
Kian Lun Soon, Joanne Mun-Yee Lim, Rajendran Parthiban	2019	35	Coordinated Traffic Light Control in Cooperative Green Vehicle Routing for Pheromone-based Multi-Agent Systems	Applied Soft Computing
Yao, J., Zhang, K., Yang, Y. et al.	2018	24	Emergency vehicle route oriented signal coordinated control model with	Soft Comput

			two-level programming	
Shaaban, K., Khan, M.A., Hamila, R. et al.	2019	24	A Strategy for Emergency Vehicle Preemption and Route Selection	Arab J Sci Eng
A. Mesodiakaki, E. Zola, R. Santos, A. Kassler	2018	22	Optimal user association, backhaul routing and switching off in 5G heterogeneous networks with mesh millimeter wave backhaul links	Ad Hoc Networks
Wu, K., Guler, S. I., & Gayah, V. V.	2017	18	Estimating the Impacts of Bus Stops and Transit Signal Priority on Intersection Operations: Queuing and Variational Theory Approach	Transportation Research Record
D. Wang, H. Zhu, Y. Bie, Q. Wei	2011	15	Bus signal priority method at arterial signal progression	Journal of Southeast University
Yang, M., Ding, J., Wang, W. et al.	2018	12	A coordinated signal priority strategy for modern trams on arterial streets by predicting the tram dwell time	KSCE J Civ Eng
Yingfei Fan et. al.	2019	12	Comprehensive evaluation of signal-coordinated arterials on traffic safety	Analytic Methods in Accident Research
Cantas, M., Kavas, O., Tamilarasan, S., Gelbal, S. et al.	2019	9	Use of Hardware in the Loop (HIL) Simulation for Developing Connected Autonomous Vehicle (CAV) Applications	SAE Technical Paper
Zhang, G., Jiang, X., Fan et al.	2019	9	Examining the factors influencing the injury severity of crashes on arterials with signal coordination	Journal of Transportation Safety & Security

Yun Bai, Jiajie Li, Tang Li, Lingling Yang, Chenxi Lyu	2018	8	Traffic Signal Coordination for Tramlines with Passive Priority Strategy	Mathematical Problems in Engineering
Iwata, Yasunari; Otake, Hirotada; Takagi, Masato	2012	7	Results from Simulation Evaluation of Green Wave Advisory System	19th ITS World Congress
Johan Scholliers, Martijn van Noort et. al.	2016	7	Impact Assessment of Its Applications for Vulnerable Road Users	Transportation Research Procedia
Lu, M., Blokpoel, R. and Joueiai, M.	2018	6	Enhancement of safety and comfort of cyclists at intersections	IET Intell. Transp. Syst
Marco De Angelis, Arjan Stuiver et. al.	2019	6	Green wave for cyclists: Users' perception and preferences	Applied Ergonomics
Celeste Chavis & Eleni Christofa	2017	5	A real-time signal control strategy for mitigating the impact of bus stops at urban signalized intersections	Journal of Intelligent Transportation Systems
Xiuzheng Zheng, Liguozhang	2015	4	Ecodriving for Reduction of Bus Transit Emission with Vehicle's Hybrid Dynamic Model	Mathematical Problems in Engineering
V. Yatskiv, A. Sachenko, V. Kochan and O. Osolinsky	2018	3	Technique of Green Wave Regulation for Special Purpose Vehicles	2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems
Liu Yi Gao*, Xiao Jian Hu, Wei Wang, Shan Shan Yu	2014	3	Development and Evaluation of a Green Wave Control Algorithm Based on Two-Way Bandwidth Maximization for Transit Signal Priority	Applied Mechanics and Materials

Cheewapattananuwong, W., Taneerananon, P., & Nakatsuji, T.	2011	3	Mitigating Traffic Congestion and Accidents in Thailand with Intelligent Transportation System Technology	Transportation Research Record
C. Scaffidi, G. Tricomi, S. Distefano and A. Puliafito	2020	2	Continuous Green2 Waves for Surfin Smart Cities	2020 IEEE International Conference on Smart Computing

Fonte: Autor, 2024.

2.2.7.1 Definição Método de onda verde

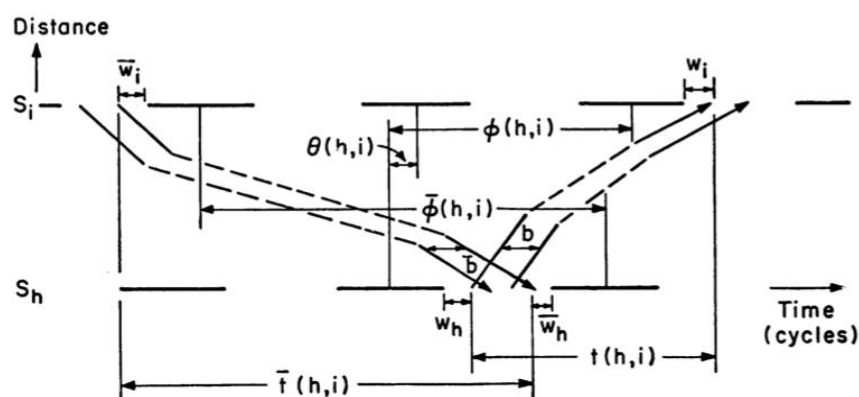
O controle coordenado sempre foi uma forma eficaz de melhorar a segurança do trânsito e a eficiência operacional nos cruzamentos. Semáforos pouco espaçados ao longo de uma via arterial são normalmente coordenados com uma duração de ciclo comum e deslocamentos apropriados, de modo que um pelotão de veículos possa receber luz verde tanto quanto possível ao viajar ao longo de toda a via arterial, de modo a fornecer a largura de banda máxima da onda verde, reduzir o atraso e o número de paradas, e manter o tráfego fluindo suavemente na estrada principal. Esta abordagem é denominada controle coordenado de onda verde para artérias (FUSCO et al., 2013; JI; CHENG, 2022).

Dentro dos métodos comuns de controle coordenado de onda verde para arteriais, citam-se: método gráfico, método algébrico MAXBAND e MULTIBAND. Destacam-se os trabalhos de JOHN D. C.; LITTLE (1972) cuja proposta foi o modelo de maximização de largura de banda baseado em programação linear inteira mista. E posteriormente o modelo MAXBAND que otimizou o tempo de ciclo, os deslocamentos, as velocidades e a ordem das fases de conversão à esquerda para maximizar as larguras de banda de entrada e saída ao longo de uma via arterial. Para garantir que o plano de coordenação do sinal possa corresponder adequadamente à procura de tráfego real, é insuficiente utilizar apenas a relação média dos volumes de tráfego de entrada e de saída no modelo de otimização do sinal. GARTNER *et al.* (1991) construíram o modelo

MULTIBAND, que projetou uma largura de banda ponderada individualmente para cada estrada direcional

John D. C. Little, apresentou seus estudos para a universidade *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) em 1965, relatando o uso da "green wave" e seu método para a sincronização semafórica, demonstrada na Figura 2.12. Sendo assim o método "green wave" se baseia em dividir o conjunto de todas as soluções viáveis em subconjuntos cada vez menores e calcular, para cada um deles, um limite superior (inferior) da função objetiva da melhor solução. Ou seja, de forma algorítmica realizar os cálculos para achar a melhor defasagem possível. Contudo, John teve dificuldades devido a falta de tecnologia de 1965. Porém abriu portas para novos estudos e técnicas que foram avançando conforme a tecnologia melhorava.

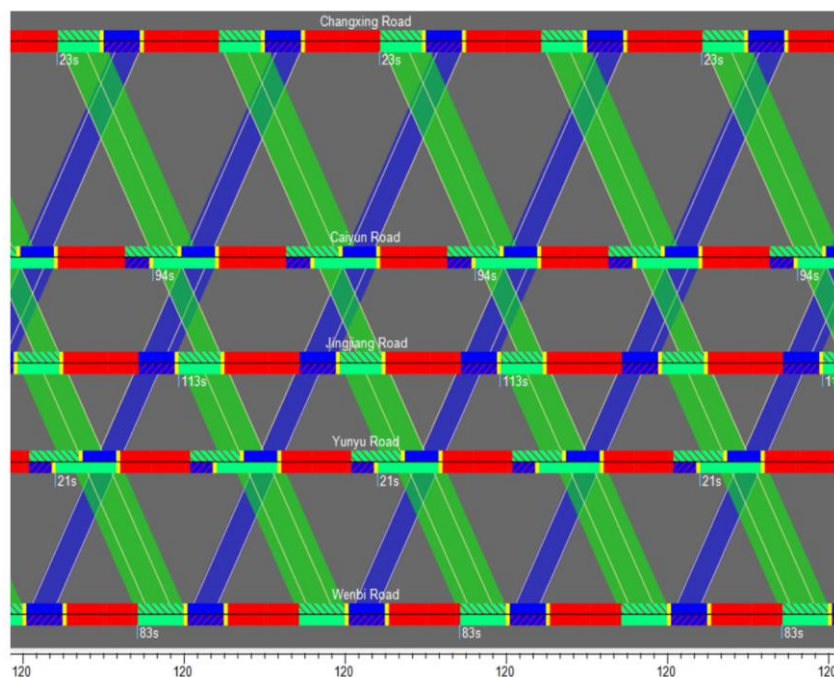
Figura 2.12 Geometry Of Green Bands (Geometria de Banda Verdes)



Fonte: *Fundamental Investigation In Methods of Operations Research*, Little John, 1965.

Com o método da "onda verde", Lina Ji e Wei Cheng (2022), propõe o estudo de Método de controle coordenado de onda verde bidirecional para Vias Arteriais em Modo de Liberação Assimétrica, na qual consiste em juntar o processo assimétrico junto com o algoritmo da onda verde. O estudo foi aplicado na cidade de Qujing, China, através do software VISSIM, resultando na figura 2.12.

Figura 2.13 Projeto de Onda Verde de Progressão Bidirecional em Modo de Liberação Assimétrica



Fonte: Lina Ji e Wei Cheng, 2022.

A aplicação deste método, exemplificada no grupo de interseções do município de Qujing, apresentou resultados positivos na minimização do atraso e do número de paradas, redução das emissões de tráfego e diminuição da probabilidade de colisões traseiras, levando, em última instância, a uma redução nos acidentes de trânsito e notáveis benefícios sociais e econômicos. A viabilidade e aplicabilidade do método proposto foram validadas por meio do software de simulação VISSIM (Ji; Cheng, 2022).

Diante dos resultados apresentados, esse trabalho de conclusão de curso, terá como objetivo aplicar o método da "onda verde" para fins de melhorar a mobilidade urbana das vias arteriais de Goiânia.

2.3 MÉTODOS DE SIMULAÇÃO DE COORDENAÇÃO SEMAFÓRICA

2.3.1 Modelagem

De acordo com Barceló (2010), a representação formal do modelo de um sistema se baseia no conceito de sistema. Um sistema pode ser definido como um conjunto de entidades que atuam em conjunto em direção a um objetivo lógico. Para entender e representar um sistema, é necessário ter um mecanismo que permita descrevê-lo, compreender seu funcionamento e prever sua evolução ao longo do tempo. Esse mecanismo é a representação formal do modelo de um sistema e é essencial para descrever, entender e prever como um sistema real opera.

Assim, para descrever um sistema, segundo BARCELÓ (2010), deve-se especificar:

- Seus processos de transformações ou atividades;
- Seus limites;
- Seus componentes e subsistemas e as relações entre eles ou com a estrutura;
- Os dados iniciais advindos do ambiente externo ao sistema;
- O resultado que se obtêm.

A modelagem do tráfego desempenha um papel fundamental no planejamento e na operação dos sistemas de transporte do mundo real. Ela proporciona a capacidade de avaliar várias alternativas de gerenciamento de tráfego, simular cenários sob condições adversas e até mesmo controlar o tráfego em tempo real. Uma das principais características que permitem classificar os modelos de sistemas de transporte é o nível de agregação de seus componentes. Sendo assim, conclui-se que a modelagem no transporte pode ser classificado em:

- a) **Macromodelos:** Os modelos macroscópicos, conforme descritos por Maia (2007), têm um amplo escopo de aplicação no planejamento, sendo usados para estratégias de intervenção, simulações em áreas extensas e projetos de implantação e duplicação de vias. Esses modelos consideram veículos e vias de forma agregada, não levando em conta suas características

individuais ou variações na velocidade dos veículos. Além disso, são estáticos, atualizando-se em intervalos mínimos de cerca de 15 minutos, e determinísticos, trabalhando com médias e sem considerar variações. Como resultado, os modelos macroscópicos requerem menos dados e recursos computacionais em comparação com outros tipos de modelos de tráfego.

- b) Mesomodelos: A simulação mesoscópica representa um modelo intermediário de tráfego, equilibrando realismo e detalhamento. Nesse contexto, os veículos são tratados coletivamente, com diferenciação ao longo do tempo e do espaço. A principal característica da mesossimulação é o tratamento individual dos veículos com base em relações macroscópicas de fluxo, permitindo a representação de manobras de troca de faixa, embora as decisões sejam tomadas com base na densidade de faixa. (Maia, 2007).
- c) Micromodelos: Os micromodelos são voltados para a simulação operacional de tráfego, abrangendo análises de intervenções operacionais, simulações em áreas menores, estudos de esquemas de controle de tráfego alternativos, operação semaforica, rampas de entrada e saída, definição de rotas de veículos e análise de operações de tráfego em áreas urbanas. Eles se destacam por tratar cada veículo individualmente, considerando suas características de direção e as interações entre faixas. Esses modelos são estocásticos e dinâmicos, detalhando a simulação em intervalos curtos, exigindo mais recursos computacionais e dados específicos em comparação com modelos de níveis mais elevados (Maia, 2007).

Para o tratamento e estudo de caso deste trabalho, o foco de modelo será baseado no Micromodelo. O estudo em específico se baseia no Corredor T-7, que é a junção de seis avenidas arteriais de Goiânia, sendo elas: Av. Araxá; Av. C-17; Av. C-12; Av. C-04; Av. T-7; Av. Assis Chateaubriand. Portanto o uso do Micromodelo irá possibilitar um estudo mais centralizado.

O Micromodelo também permite o uso de softwares para sua simulação, sendo alguns conhecidos como: VISSIM, VISUM, SUMO, AIMSUN, NETSIM, TRANSCAD, PTV VISTRO entre outros. Foi escolhido o PTV VISTRO E PTV VISSUM para a aplicação de estudo no projeto, pois estes se alinham melhor com o objetivo deste trabalho

2.3.2 Modelagem Dinâmica

2.3.2.1 Modelagem Pelo VISUM

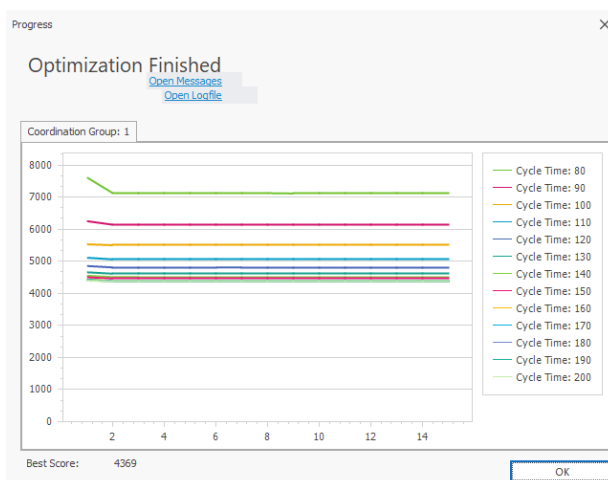
O PTV VISUM é o software de planejamento de transportes líder mundial. É o padrão para simulações macroscópicas e modelação macroscópica de redes de transportes e procura de transportes, planejamento de transportes públicos e para o desenvolvimento de estratégias e soluções de transportes. Com o PTV VISUM, é possível criar modelos de transportes que fornecem informações para o planejamento estratégico a longo prazo e para a utilização operacional a curto prazo (PTV, 2024).

2.3.2.2 Modelagem Pelo PTV Vistro

O PTV Vistro é um software de análise de tráfego, provendo todas as ferramentas essenciais para condução de estudos e avaliações no campo da engenharia de tráfego e planejamento de transporte (PTV, 2013).

O software realiza a avaliação dos impactos decorrentes do desenvolvimento, otimiza e reprograma a rede de semáforos, além de realizar a avaliação dos níveis de serviço em cruzamentos, gerando, por fim, tabelas e figuras prontas para compor relatórios. Sua versatilidade a torna uma ferramenta de grande utilidade em variados tipos de estudos voltados para o tráfego e transporte, proporcionando economia de tempo através de sua funcionalidade. (PTV, 2013).

Figura 2.14 Demonstração de Otimização Pelo PTV VISTRO



Fonte: Autor, 2024.

2.3.3 Otimização

Para que o estudo atinja seu objetivo, o software PTV VISTRO, trabalha com o modelo Webster e segue as normas do HCM 7, isso em sua versão 2024. Vale ressaltar que sua otimização conta com dois tipos de processo, sendo o método Hill Climbing e o Algoritmo Genético.

2.3.3.1 Algoritmo Genético

O processo do algoritmo genético consiste em uma população de planos de sinais, onde cada plano possui uma aptidão determinada pela função objetivo, que é a soma ponderada de atraso e número de paragens a ser minimizada. A seleção para reprodução na geração seguinte é baseada em probabilidades proporcionais à aptidão, seguindo uma analogia com o processo evolutivo. Durante a reprodução, diversas operações genéticas são aplicadas. O melhor plano de cada geração é transferido diretamente para a geração subsequente para assegurar uma melhoria contínua. Além disso, o algoritmo genético oferece a flexibilidade de ajustar os fatores da função objetivo e definir configurações de otimização, permitindo controle sobre a robustez e velocidade da otimização da rede (PTV, 2024).

2.3.3.2 Hill Climbing

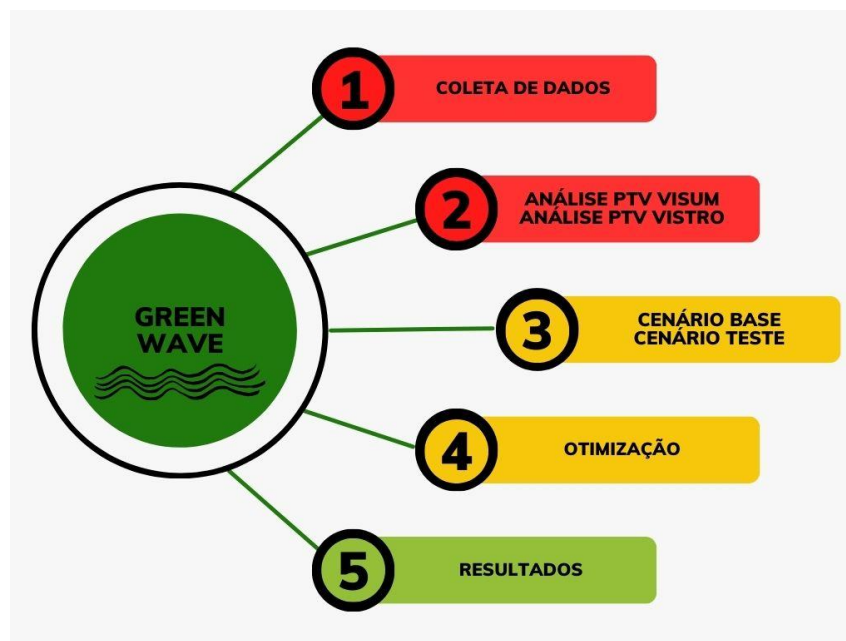
O método Hill Climb compartilha a função objetivo com o Algoritmo Genético, embora adote uma abordagem distinta, simplificando a definição apenas do número de soluções iniciais. O usuário tem a flexibilidade de especificar a quantidade desejada de soluções iniciais, as quais são geradas de forma aleatória. Importante ressaltar que a solução atual está sempre incluída no conjunto inicial. A solução final, resultado da otimização, é determinada como a mais eficiente entre todas as soluções geradas (PTV, 2024).

3 METODOLOGIA

3.1 METODOLOGIA PROPOSTA PARA O TCC

Neste capítulo serão abordados os procedimentos metodológicos e as atividades em que constitui o desenvolvimento dos objetivos definidos no trabalho. Portanto, a organização do trabalho foi indicada através de um fluxograma apresentado na Figura 3.1:

Figura 3.1 Metodologia do TCC



Fonte: Autor, 2023.

3.1 COLETA DE DADOS

Para realizar estudo de caso, foi disponibilizado pela Secretaria Municipal de Mobilidade de Goiânia (SMM) os dados volumétricos e geométricos de uma junção de avenidas arteriais de Goiânia, da qual forma um corredor bastante expressivo para os usuários do transporte público e privado.

Foi proposto pela SMM que o estudo fosse direcionado para o Corredor T-7, a qual é constituída por seis avenidas arteriais, que faz parte de uma rota importante para os usuários do transporte público e privado.

3.2.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo foi definida dentro do município de Goiânia. Município que apresenta as seguintes características segundo informações do IBGE, (2022):

Figura 3.2 Mapa Localização de Goiânia- GO



Fonte: IBGE, 2023.

- Goiânia – GO
- Área Territorial: 729,296 km² (2022);
- População Residente: 1.437.237 pessoas (2022);
- Densidade Demográfica: 1.970,72 pessoas (2022);
- IDHM (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal): 0,799 (2010)
- PIB per capita: R\$ 33.826,84 (2020);

O estudo será baseado no Corredor T-7, que é a junção de seis avenidas arteriais de Goiânia, sendo elas: Av. Araxá; Av. C-17; Av. C-12; Av. C-04; Av. T-7; Av. Assis Chateaubriand. No total essas 6 avenidas arteriais têm em média 6,8 km, compondo assim o corredor T-7, ilustrada na figura Figura 3.3:

Figura 3.3 Ilustração da Área de Estudo



Fonte: Autor, Fonte dos dados: Google Earth, 2023.

3.1.2 DADOS E APLICAÇÃO

Para o estudo de caso foi necessário criar um cenário base, que constitui na atual operação do sistema viário do Corredor T-7, do qual foi limitado seu horário de pico e seus volumes e sentido. Os dados utilizados para a criação do cenário base estão apresentados na Tabela 3.1.

A partir do modelo base, o software PTV Vistro, permitiu criar cenários diversos que possibilitaram chegar a Onda Verde.

Tabela 3.1 Dados Fornecidos Corredor T-7

Aplicação	Webster
Atuação	Fixa
Ciclo	130 s
Direção	Araxá – Praça Cívica
Hora Pico	Matutino
Máximo de Verde	120s
Método de Análise dos Cruzamentos	HCM 7th Edição
Mínimo Verde	12s
Modo	Single Band
Período de Análise	1 hora
Sentido	Leste - Oeste
Sincronização/ Otimização	Defasagem por cruzamento
Tempo de Amarelo	4 s
Todos vermelhos	1s
Velocidade do Pedestre	1,20 m/s
Velocidade Máxima das vias Arteriais	60 km/h
Velocidade Máxima das vias Coletoras	40 e 30 km/h

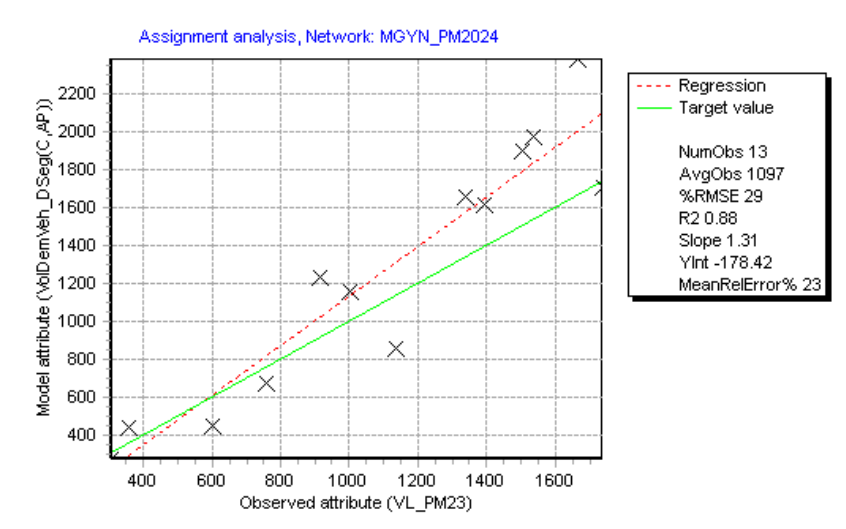
Fonte: Autor, 2024.

3.1.3 Análise PTV VISUM

Para completar e balancear os fluxos veiculares na área de estudo, foram utilizados os resultados do modelo de macro simulação construído para o projeto de pesquisa entre a UFG e a Secretaria de Planejamento e habitação de Goiânia “Estimação da matriz Origem e Destino de Goiânia”. Com os dados de contagem volumétrica atualizados para 2023, foi realizada a projeção da matriz Origem e Destino para 2023 e calibração dos fluxos de tráfegos simulados para a hora pico de manhã.

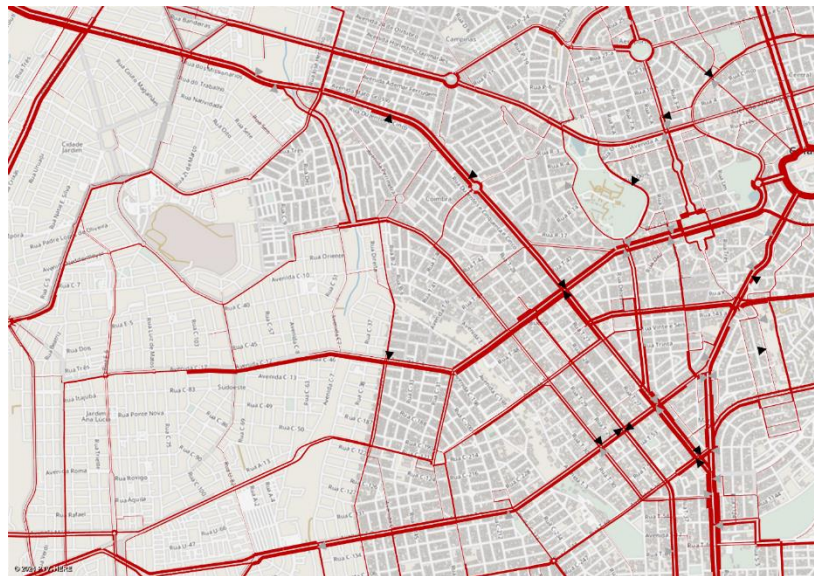
Assim, uma vez calibrado o modelo foi extraído os resultados dos fluxos calibrados para a área de estudo. A calibração dos fluxos conseguiu atingir um valor $R^2 = 0,88$ apresentando uma correlação satisfatória entre o fluxo simulados e os fluxos observados, conforme é observado na Figura 3.4. Na Figura 3.5 apresenta-se os resultados dos fluxos simulados para a área de estudo.

Figura 3.4 Resultado da Calibração do Modelo de Macrossimulação



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento em Transportes – UFG.

Figura 3.5 Resultados do Modelo de Macrossimulação



Fonte: Laboratório de Desenvolvimento em Transportes – UFG.

3.2 CENÁRIOS

3.1.4 CENÁRIO BASE

O cenário base foi construído pelos dados fornecidos pela Secretaria de Municipal de Mobilidade de Goiânia (SMM). O cenário consta apenas uma direção e o horário pico matutino. O estudo foi feito de forma isolada para permitir que o software indicasse a melhor solução para sua otimização.

3.1.5 CENÁRIO TESTES

Para o estudo de caso, foi criado diversos cenários do qual, foi separado os X melhores resultados, sendo eles separados por sua forma de otimização. A otimização fornecida pelo software foi de Algoritmo Genético e Hill Climbing, dos quais podem ser analisados nas tabelas X e Y:

3.3.2.1 Otimização Por Algoritmo Genético

A otimização pelo algoritmo genético foi realizada através de cenários testes, dos quais foram testados cada variável, demonstrada na Tabela 3.2:

Tabela 3.2 Algoritmo Genético e Variáveis

	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Número de Iterações	20	100	50
População	20	20	20
Nº de Geração sem Melhora	50	50	50
Melhoria Mínima	1 %	1%	1%
Split e Ciclo:			
Redução Permitida	4 %	1%	5%
Lower Bound	60	60	60
Upper Bound	240	240	240
Step Size	10	10	10
Otimização			
Offset	0,2 s	0,5 s	0,5 s

Fonte: Autor, 2024.

3.3.2.2 Otimização Hill Climbing

A otimização pelo método de Hill Climbing foi realizada através de cenários testes, dos quais foram testados cada variável, demonstrada na tabela Tabela 3.3:

Tabela 3.3 Hill Climbing e Variáveis

	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 9
Número de Iterações Iniciais	20	15	20
Split e Ciclo:			
Redução Permitida	5 %	5 %	4 %
Lower Bound	60	30	60
Upper Bound	240	260	240
Step Size	10	10	10
Otimização			
Offset	0,5 s	1 s	0,2 s

Fonte: Autor, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CENÁRIO BASE

A partir dos dados coletados e aplicados no PTV VISTRO, obteve-se a tabela com as análises de cruzamentos e sua operação atual no turno matutino em seu horário pico, no sentido leste oeste, ou seja, Av. Araxá até Praça Cívica. Os resultados de seu Delay, serviço e outros estão apresentados no Quadro 4.1, é importante notar que os resultados críticos foram destacados para a melhor compreensão da mudança no tempo de delay. E seu gráfico de tempo apresentados na Figura 4.1 e Figura 4.2, da qual reforça o tempo de verde efetivo e atual.

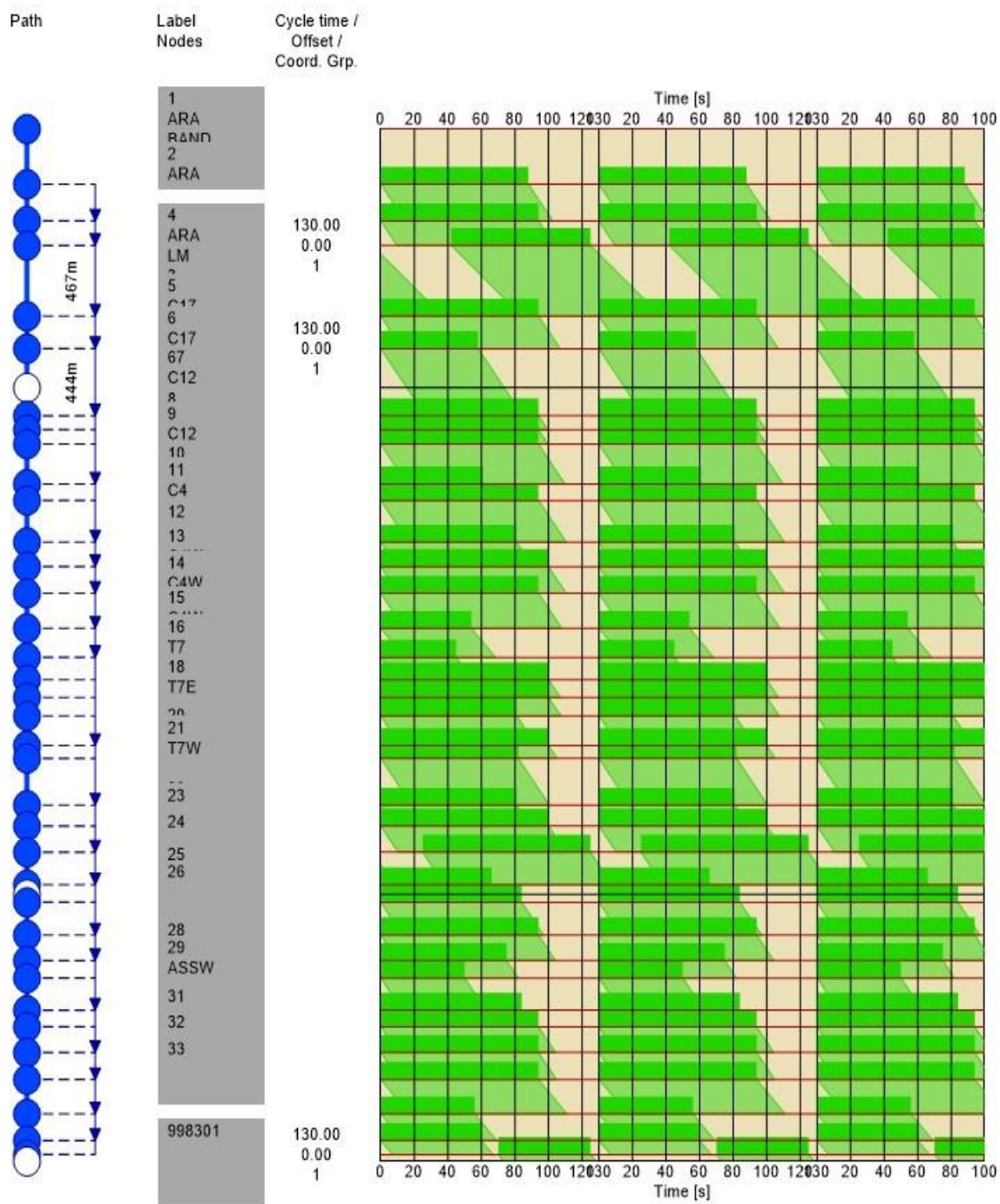
Quadro 4.1 Análise dos Cruzamentos Cenário Base

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	24,0	C
2	ARA-BH	0,450	20,2	C
3	ARX-RE2	0,110	5,7	A
4	C17-LM	0,161	12,9	B
5	C17-C73	0,392	9,0	A
6	C12-C15	0,911	63,8	E
7	C12-C56	0,370	8,3	A
8	C12-C8	0,389	9,4	A
9	C12-C55	0,359	8,5	A
10	C4-C7	0,721	33,7	C
11	C4-C107	0,413	8,8	A
12	C4 – C1	0,655	23,7	C
13	C4 – C34	0,412	6,0	A
14	C4 – C32	0,394	8,4	A
15	C4 -T7- 205	6,860	5.240,4	F
16	T7-C2	0,700	820,7	F
17	T7 -T3	0,675	14,6	B
18	T7- T30	0,698	13,9	B
19	T7 &T2	1,104	272,7	F
20	T1 2-T7	0,848	46,0	D
21	T1 1-T7	1,096	254,5	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	408,8	F
23	RUY-T7	0,466	7,5	A
24	R11- T7	0,478	8,1	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.711,3	F
26	ASS-PORT	0,631	23,9	C
27	ASS-R11	0,474	10,9	B
28	RUA 9	0,694	25,4	C
29	ASS-R7	0,880	48,8	D
30	ASS-R5	0,767	27,5	C
31	ASS-R3	0,620	12,9	B

32	Ass-R1	0,596	12,8	B
33	Assis-94	1,352	609,3	F

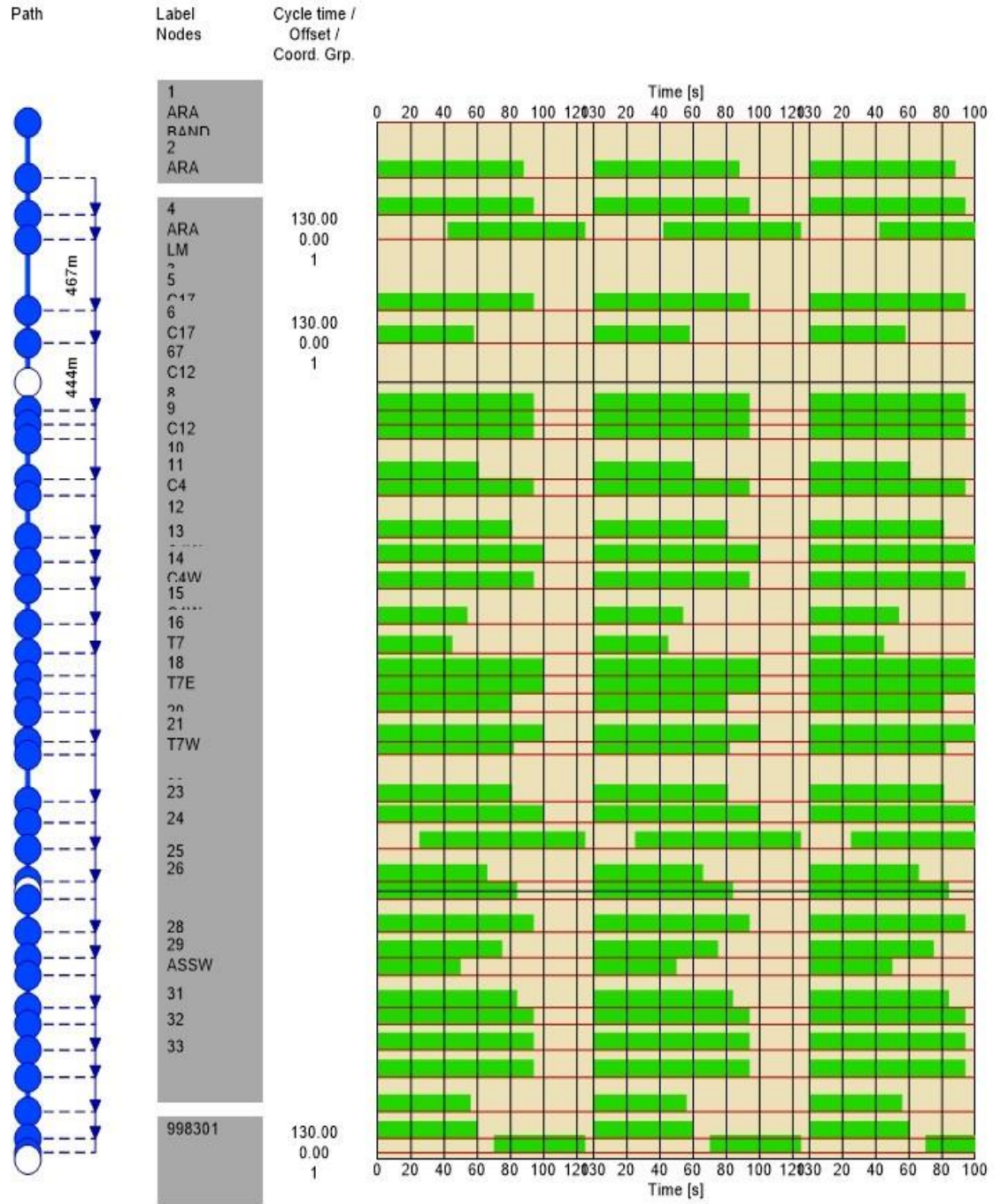
Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.1 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo - Cenário Base



Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.2 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário Base



Fonte: Autor, 2024.

4.2 CENÁRIOS TESTES

Os cenários testes apresentaram resultados significativos diante de sua análise. Fica claro ao analisar os valores de redução no delay e sua mudança de classificação nos quadros de análise dos cruzamentos de cada cenário. Vale ressaltar também a suavidade nas análises de fluxograma nas figuras fornecidas abaixo.

Os resultados abaixo, será classificado através do seu tipo de otimização, sendo eles: Algoritmo Genético e Hill Climbing.

4.2.1 Resultado Algoritmo Genético

O Algoritmo Genético mostrou-se eficiente em seus resultados, porém ao ser comparado com o Hill Climbing, sua forma de calibração se torna mais complexa devido ao número de análises manuais imputadas pelo responsável da sua calibração.

Os resultados serão expostos com tabelas e gráficos de cada cenário. Vale ressaltar que os cenários escolhidos para análises foram os melhores calibrados do estudo.

Quadro 4.2 Análise dos Cruzamentos Cenário 4- Genético

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	19,5	B
2	ARA-BH	0,450	27,6	C
3	ARX-RE2	0,110	3,9	A
4	C17-LM	0,161	17,9	B
5	C17-C73	0,392	6,2	A
6	C12-C15	0,911	68,6	E
7	C12-C56	0,370	5,7	A
8	C12-C8	0,389	7,9	A
9	C12-C55	0,359	5,9	A
10	C4-C7	0,721	40,1	D
11	C4-C107	0,413	6,1	A
12	C4 - C1	0,655	31,7	C
13	C4 - C34	0,412	4,2	A
14	C4 - C32	0,394	5,9	A
15	C4 -T7- 205	3,893	2.542,7	F
16	T7-C2	0,700	17,9	B
17	T7 -T3	0,675	13,7	B
18	T7- T30	0,698	14,3	B
19	T7 &T2	1,104	223,0	F
20	T1 2-T7	0,848	19,4	B
21	T1 1-T7	1,096	225,9	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	340,3	F
23	RUY-T7	0,466	5,3	A
24	R11- T7	0,478	6,7	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.646,8	F
26	ASS-PORT	0,631	32,8	C
27	ASS-R11	0,474	12,0	B
28	RUA 9	0,694	32,2	C
29	ASS-R7	0,880	58,5	E
30	ASS-R5	0,767	36,0	D
31	ASS-R3	0,620	12,7	B
32	Ass-R1	0,596	12,6	B
33	Assis-94	1,352	488,1	F

Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.3 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 4 Genético

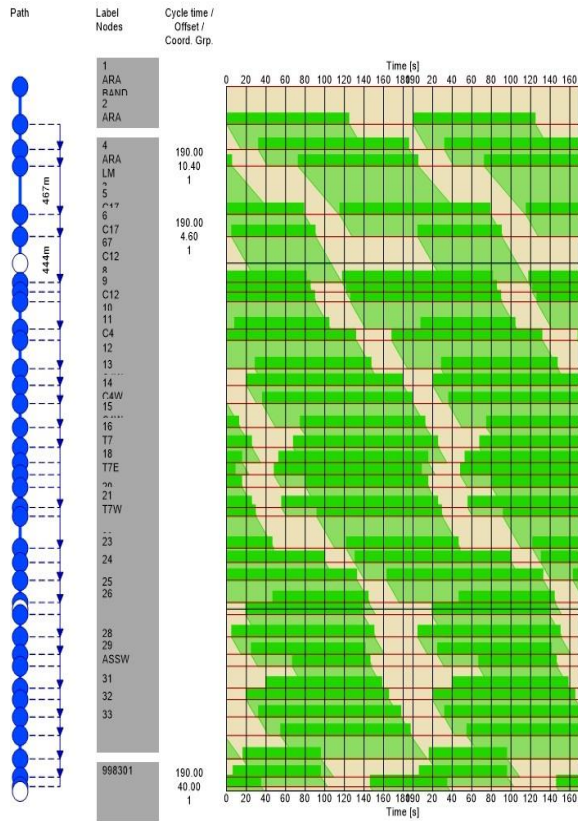
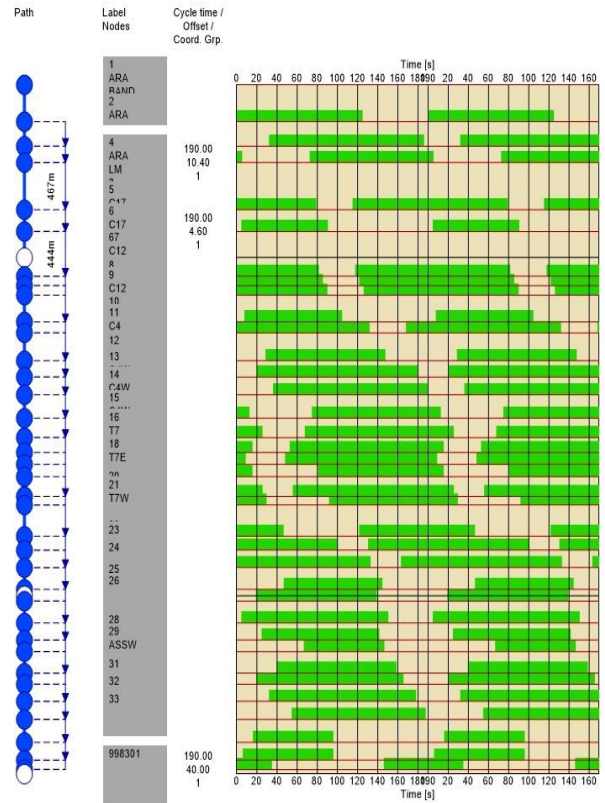


Figura 4.4 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 4- Genético



Fonte: Autor, 2024.

Quadro 4.3 Análise dos Cruzamentos Cenário 5- Genético

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	19,7	B
2	ARA-BH	0,450	26,3	C
3	ARX-RE2	0,110	4,1	A
4	C17-LM	0,161	16,4	B
5	C17-C73	0,392	7,2	A
6	C12-C15	0,911	67,5	E
7	C12-C56	0,370	6,3	A
8	C12-C8	0,389	8,3	A
9	C12-C55	0,359	6,2	A
10	C4-C7	0,721	41,0	D
11	C4-C107	0,413	6,4	A
12	C4 - C1	0,655	30,3	C
13	C4 - C34	0,412	4,4	A
14	C4 - C32	0,394	6,2	A
15	C4 -T7- 205	3,728	2.457,8	F
16	T7-C2	0,700	19,1	B
17	T7 -T3	0,675	10,3	B
18	T7- T30	0,698	10,3	B
19	T7 &T2	1,104	239,4	F
20	T1 2-T7	0,848	20,4	C
21	T1 1-T7	1,096	229,0	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	367,6	F
23	RUY-T7	0,466	5,5	A
24	R11- T7	0,478	7,4	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.655,5	F
26	ASS-PORT	0,631	30,7	C
27	ASS-R11	0,474	10,3	B
28	RUA 9	0,694	31,7	C
29	ASS-R7	0,880	55,7	E
30	ASS-R5	0,767	33,5	C
31	ASS-R3	0,620	9,7	A
32	Ass-R1	0,596	10,2	B
33	Assis-94	1,352	545,6	F

Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.5 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 5 Genético

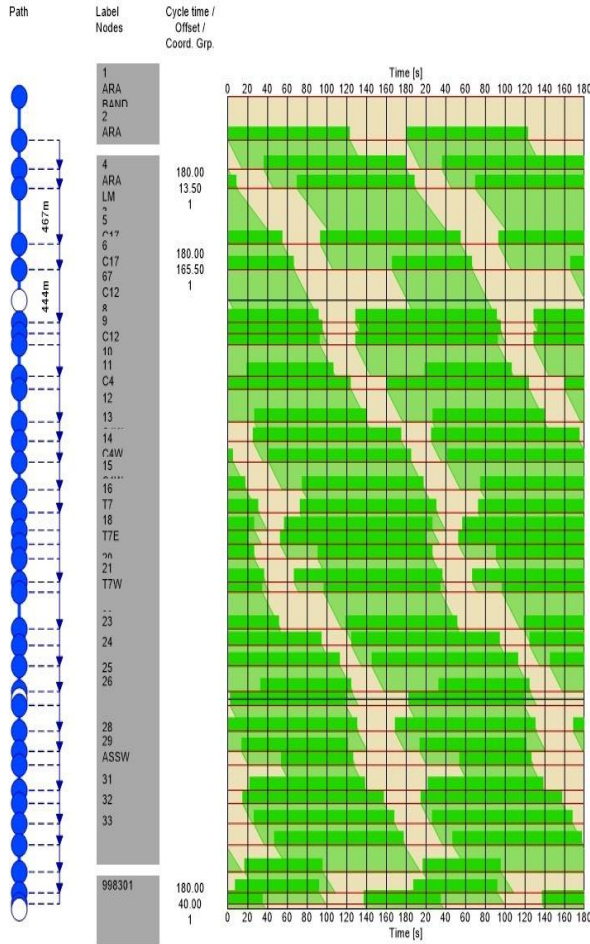
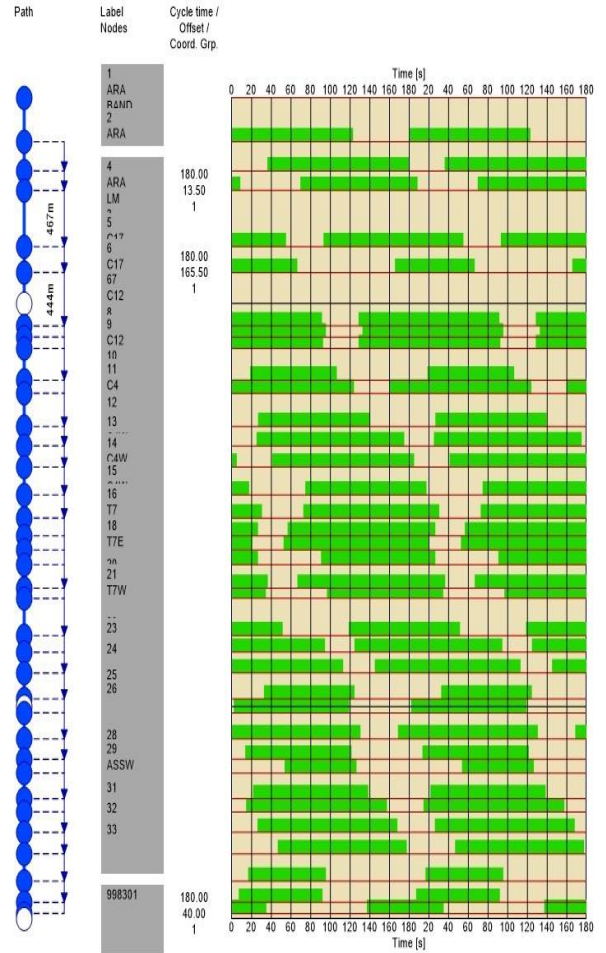


Figura 4.6 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 5- Genético



Fonte: Autor, 2024.

Quadro 4.4 Análise dos Cruzamentos Cenário 6- Genético

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	19,5	B
2	ARA-BH	0,450	27,6	C
3	ARX-RE2	0,110	3,9	A
4	C17-LM	0,161	16,7	B
5	C17-C73	0,392	9,0	A
6	C12-C15	0,911	68,6	E
7	C12-C56	0,370	5,7	A
8	C12-C8	0,389	9,5	A
9	C12-C55	0,359	5,9	A
10	C4-C7	0,721	40,1	D
11	C4-C107	0,413	6,4	A
12	C4 - C1	0,655	30,3	C
13	C4 - C34	0,412	4,2	A
14	C4 - C32	0,394	5,9	A
15	C4 -T7- 205	3,893	2.542,7	F
16	T7-C2	0,700	17,9	B
17	T7 -T3	0,675	10,8	B
18	T7- T30	0,698	12,8	B
19	T7 &T2	1,104	223,0	F
20	T1 2-T7	0,848	19,4	B
21	T1 1-T7	1,096	225,9	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	340,3	F
23	RUY-T7	0,466	8,4	A
24	R11- T7	0,478	9,4	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.644,1	F
26	ASS-PORT	0,631	31,4	C
27	ASS-R11	0,474	12,0	B
28	RUA 9	0,694	32,2	C
29	ASS-R7	0,880	57,4	E
30	ASS-R5	0,767	34,7	C
31	ASS-R3	0,620	8,8	A
32	Ass-R1	0,596	12,6	B
33	Assis-94	1,352	488,1	F

Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.7 : Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 6 Genético

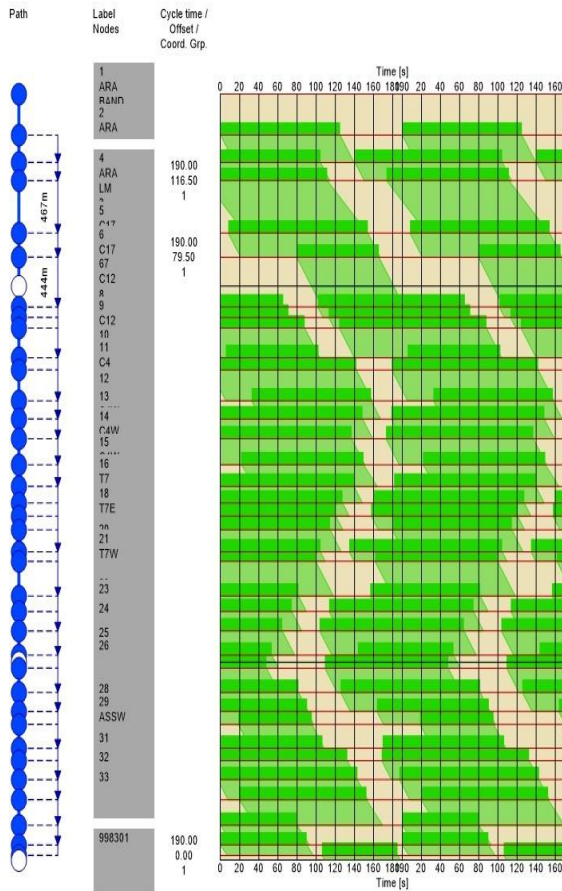
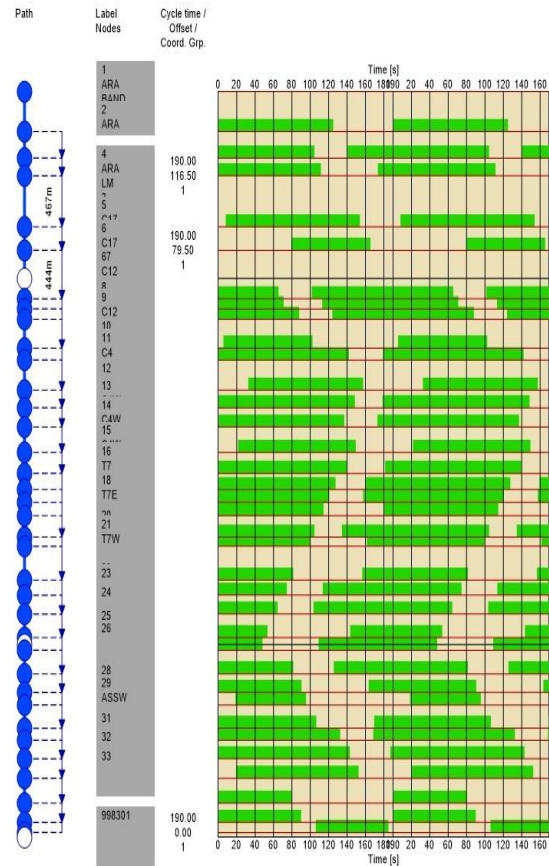


Figura 4.8 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 6- Genético



Fonte: Autor, 2024.

4.2.2 Resultado Otimização Hill Climbing

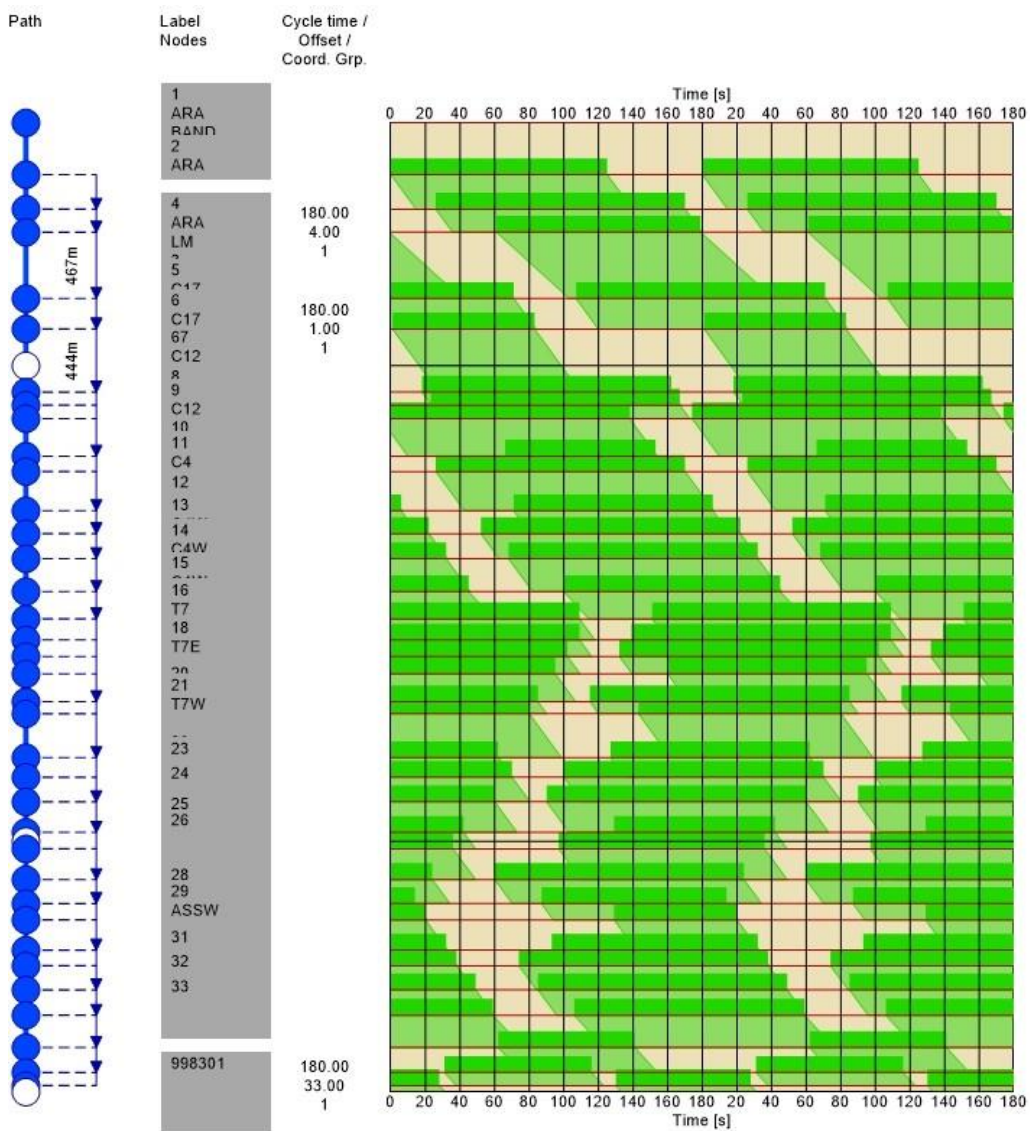
A otimização por Hill Climbing se mostrou eficaz para o sistema, obtendo assim o melhor resultado de todos quanto a baixa no seu delay. Vale ressaltar que o melhor cenário encontrado para o sistema isolado, parte matutina, uma direção, sentido leste-oeste, foi o cenário 2, que será demonstrada no Quadro 4.5, Figura 4.9 e Figura 4.10. Outros comparativos também foram gerados e serão apresentados a seguir para comparações.

Quadro 4.5 Análise dos Cruzamentos Cenário 2- Hill Climbing

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	19,7	B
2	ARA-BH	0,450	26,3	C
3	ARX-RE2	0,110	4,1	A
4	C17-LM	0,161	16,6	B
5	C17-C73	0,392	6,5	A
6	C12-C15	0,911	66,7	E
7	C12-C56	0,370	6,0	A
8	C12-C8	0,389	8,0	A
9	C12-C55	0,359	6,2	A
10	C4-C7	0,721	41,7	D
11	C4-C107	0,413	6,4	A
12	C4 - C1	0,655	29,7	C
13	C4 - C34	0,412	4,4	A
14	C4 - C32	0,394	6,2	A
15	C4 - T7- 205	3,612	2.398,7	F
16	T7-C2	0,700	19,1	B
17	T7 -T3	0,675	10,3	B
18	T7- T30	0,698	9,2	A
19	T7 &T2	1,104	246,7	F
20	T1 2-T7	0,848	20,4	C
21	T1 1-T7	1,096	230,3	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	383,5	F
23	RUY-T7	0,466	5,5	A
24	R11- T7	0,478	6,8	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.652,8	F
26	ASS-PORT	0,631	30,4	C
27	ASS-R11	0,474	9,7	A
28	RUA 9	0,694	32,1	C
29	ASS-R7	0,880	56,1	E
30	ASS-R5	0,767	33,4	C
31	ASS-R3	0,620	9,3	A
32	Ass-R1	0,596	9,3	A
33	Assis-94	1,352	574,3	F

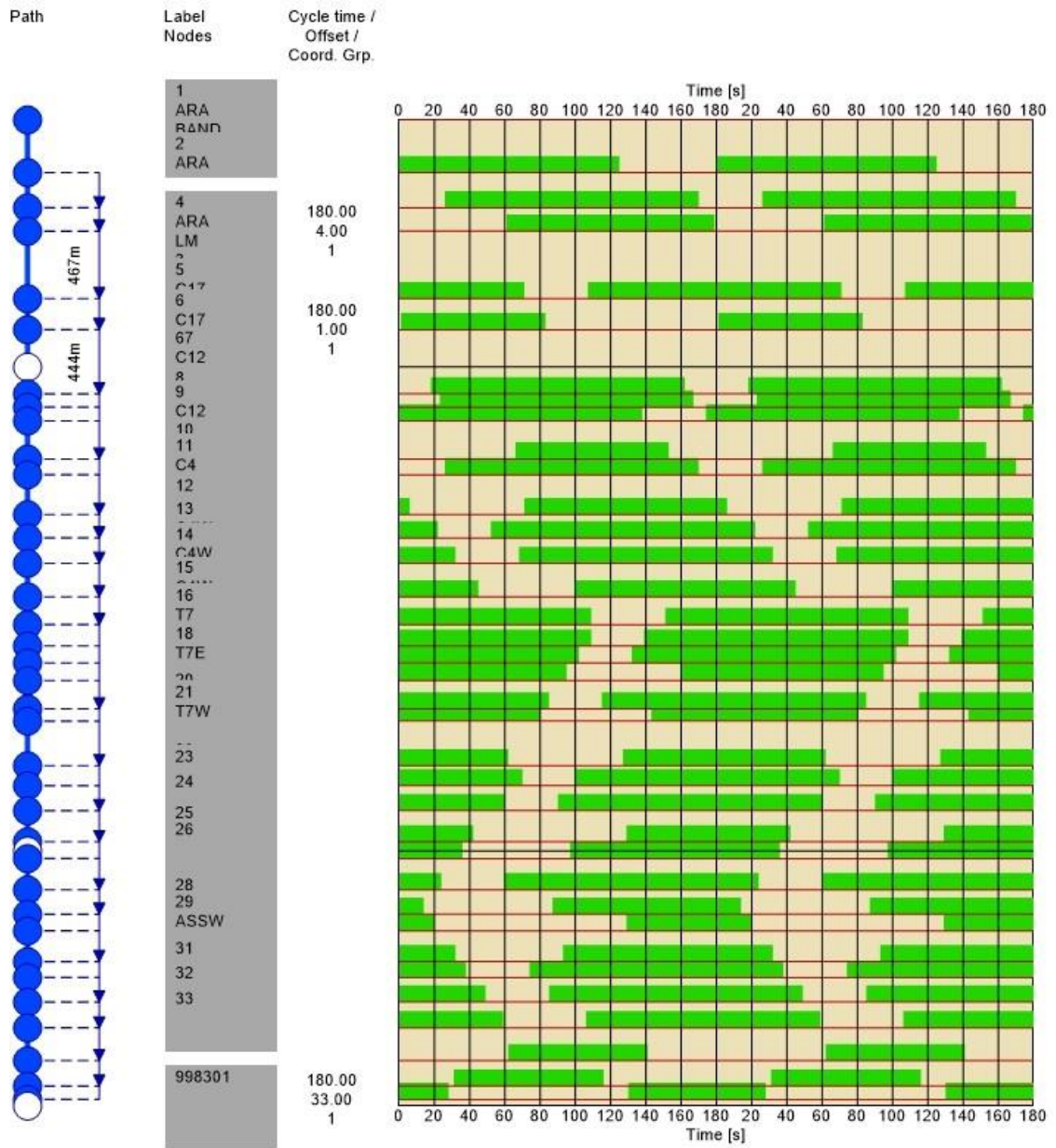
Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.9 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 2 Hill Climbing



Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.10 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 2 Hill Climbing



Fonte: Autor, 2024

Quadro 4.6 Análise dos Cruzamentos Cenário 1- Hill Climbing

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	19,5	B
2	ARA-BH	0,450	27,6	C
3	ARX-RE2	0,110	3,9	A
4	C17-LM	0,161	17,1	B
5	C17-C73	0,392	6,2	A
6	C12-C15	0,911	68,6	E
7	C12-C56	0,370	5,7	A
8	C12-C8	0,389	10,2	B
9	C12-C55	0,359	8,5	A
10	C4-C7	0,721	40,1	D
11	C4-C107	0,413	8,9	A
12	C4 - C1	0,655	30,1	C
13	C4 - C34	0,412	4,2	A
14	C4 - C32	0,394	5,9	A
15	C4 -T7- 205	3,893	2.542,7	F
16	T7-C2	0,700	17,9	B
17	T7 -T3	0,675	9,8	A
18	T7- T30	0,698	8,7	A
19	T7 &T2	1,104	223,0	F
20	T1 2-T7	0,848	19,4	B
21	T1 1-T7	1,096	225,9	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	340,3	F
23	RUY-T7	0,466	8,4	A
24	R11- T7	0,478	9,4	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.646,8	F
26	ASS-PORT	0,631	32,8	C
27	ASS-R11	0,474	12,0	B
28	RUA 9	0,694	32,5	C
29	ASS-R7	0,880	58,5	E
30	ASS-R5	0,767	36,0	D
31	ASS-R3	0,620	8,8	A
32	Ass-R1	0,596	12,6	B
33	Assis-94	1,352	488,1	F

Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.11 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 1 Hill Climbing

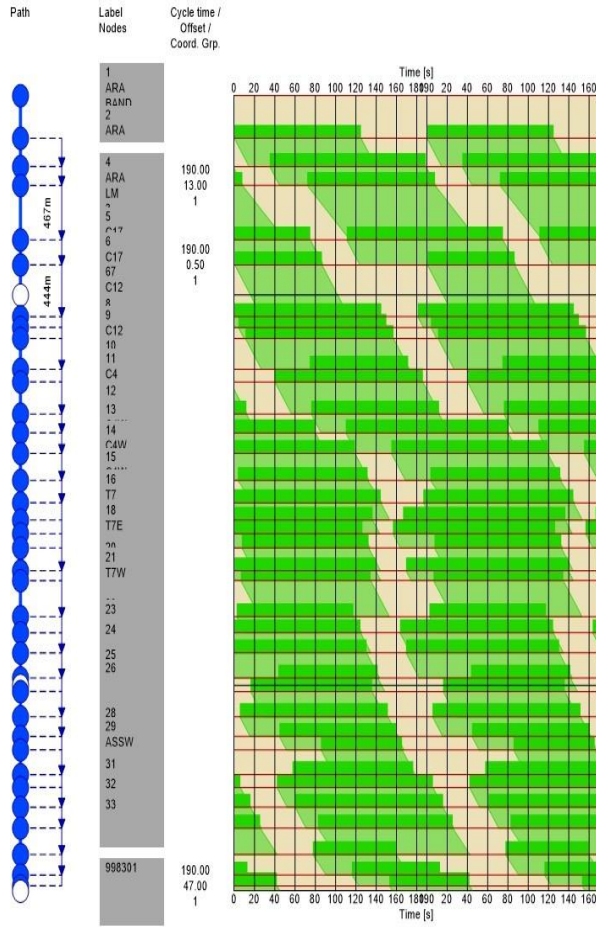
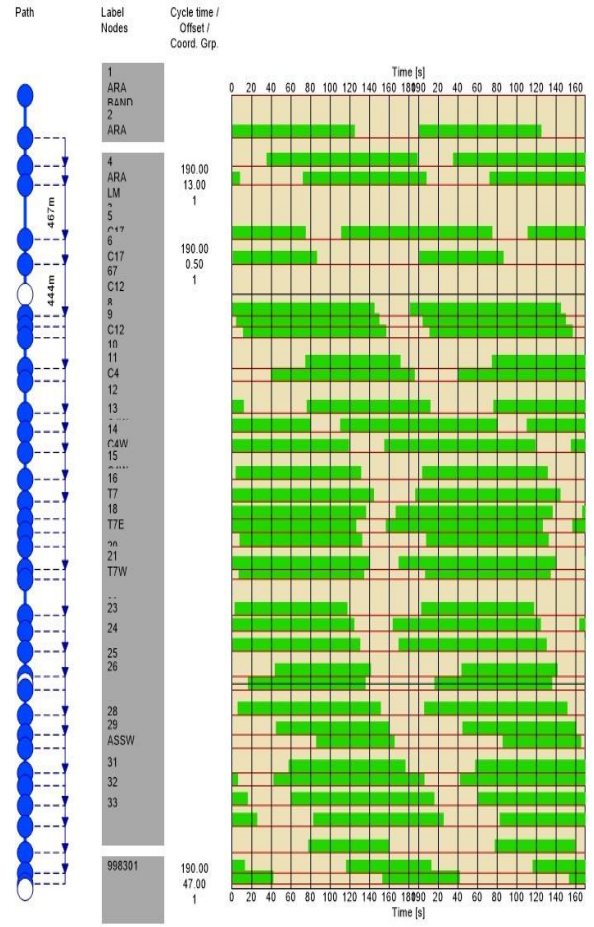


Figura 4.12 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 1 Hill Climbing



Fonte: Autor, 2024.

Quadro 4.7 Análise dos Cruzamentos Cenário 9- Hill Climbing

ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	0,585	19,7	B
2	ARA-BH	0,450	26,3	C
3	ARX-RE2	0,110	4,1	A
4	C17-LM	0,161	16,4	B
5	C17-C73	0,392	6,5	A
6	C12-C15	0,911	67,5	E
7	C12-C56	0,370	6,0	A
8	C12-C8	0,389	9,5	A
9	C12-C55	0,359	8,2	A
10	C4-C7	0,721	38,9	D
11	C4-C107	0,413	6,4	A
12	C4 - C1	0,655	31,2	C
13	C4 - C34	0,412	4,4	A
14	C4 - C32	0,394	6,2	A
15	C4 -T7- 205	3,987	2.615,9	F
16	T7-C2	0,700	19,1	B
17	T7 -T3	0,675	13,9	B
18	T7- T30	0,698	13,7	B
19	T7 &T2	1,104	225,9	F
20	T1 2-T7	0,848	20,4	C
21	T1 1-T7	1,096	228,1	F
22	CASTELO BRANCO-T7	1,225	349,3	F
23	RUY-T7	0,466	8,0	A
24	R11- T7	0,478	9,0	A
25	T7-ASSIS	2,348	1.654,2	F
26	ASS-PORT	0,631	31,3	C
27	ASS-R11	0,474	11,5	B
28	RUA 9	0,694	31,0	C
29	ASS-R7	0,880	56,5	E
30	ASS-R5	0,767	34,1	C
31	ASS-R3	0,620	11,7	B
32	Ass-R1	0,596	12,2	B
33	Assis-94	1,352	502,4	F

Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.13 Diagrama Espaço Tempo do Fluxo – Cenário 9 Hill Climbing

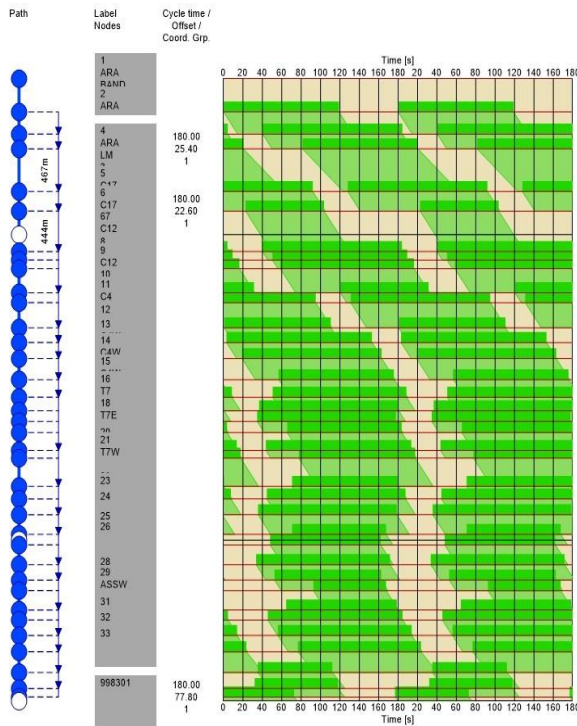
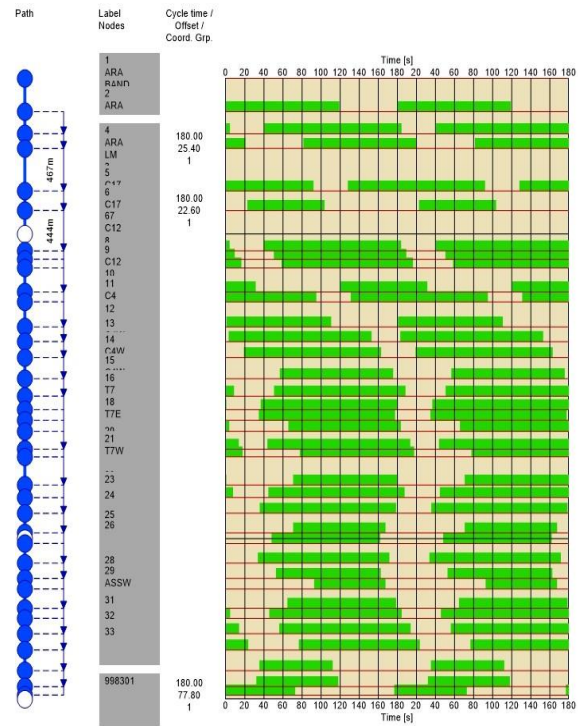


Figura 4.14 Diagrama de Espaço tempo Da Banda Arterial- Cenário 9 Hill Climbing



Fonte: Autor, 2024.

4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Realizando a comparação entre o Cenário Base, que serve como referência, e as otimizações implementadas nos Cenários 6 (utilizando o Algoritmo Genético) e 2 (Hill Climbing), observa-se uma notável disparidade nos resultados obtidos, tanto em termos quantitativos quanto nos gráficos apresentados na Figura 4.15 e Figura 4.16. A Tabela 4.1 proporciona uma análise comparativa dos resultados, evidenciando melhorias significativas no tempo de resposta, representado pelo delay, em alguns casos otimizados.

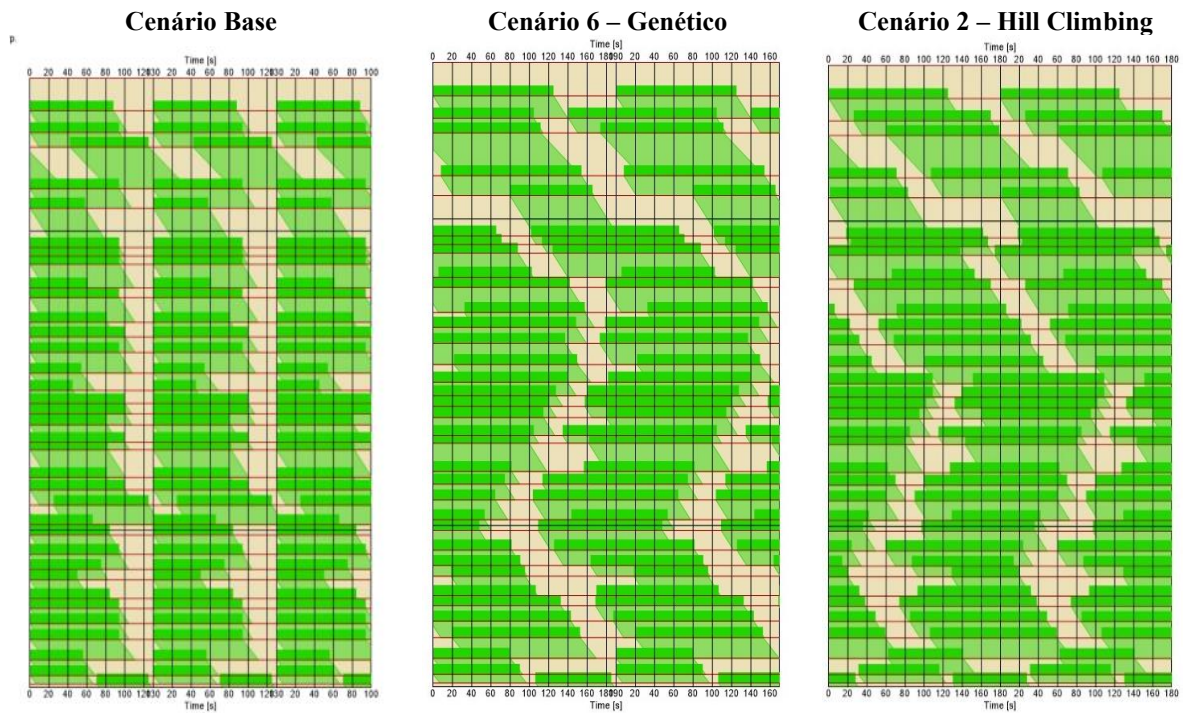
Ao analisar os gráficos correspondentes, é possível destacar claramente o comportamento diferenciado da *green wave*, indicando uma sincronização mais eficiente entre os semáforos. Essas observações reforçam a eficácia das estratégias implementadas nos Cenários 6 e 2, demonstrando não apenas uma redução no delay, mas também um impacto positivo na fluidez do tráfego.

Tabela 4.1 Comparação dos Cenários

	ID	Cruzamento	V/C	Delay (s/veh)	LOS
Cenário Base	1	ARA – BAND	0,585	24,0	C
	15	C4 – T7 – C205	6,860	5.240,4	F
	22	T7 – CASTELO BRANCO	1,225	408,8	F
	25	T7 – ASSIS	2,348	1.711,3	F
	33	ASSIS - 94	1,352	609,3	F
Cenário 6 - Genético	1	ARA – BAND	0,585	19,5	B
	15	C4 – T7 – C205	3,896	2.542,7	F
	22	T7 – CASTELO BRANCO	1,225	340,3	F
	25	T7 – ASSIS	2,348	1.644,1	F
	33	ASSIS - 94	1,352	488,1	F
Cenário 2 – Hill Climbing	1	ARA – BAND	0,585	19,7	B
	15	C4 – T7 – C205	3,612	2.398,7	F
	22	T7 – CASTELO BRANCO	1,225	383,5	F
	25	T7 – ASSIS	2,348	1.652,8	F
	33	ASSIS - 94	1,352	574,3	F

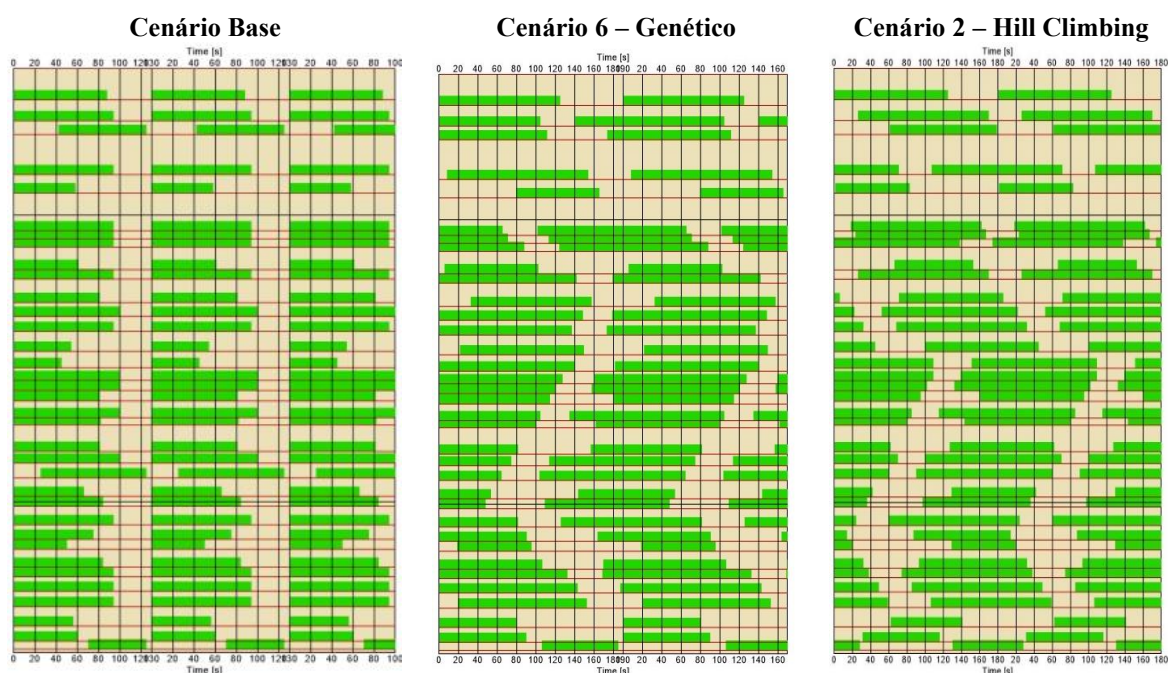
Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.15 Comparação Diagrama Espaço Tempo do Fluxo



Fonte: Autor, 2024.

Figura 4.16 Comparação Diagrama Espaço Tempo da Banda Arterial



Fonte: Autor, 2024

4.4 DISCUSSÃO

O estudo de caso demonstrou a viabilidade da sincronização, apresentando resultados positivos tanto em números quanto em gráficos, atingindo o objetivo desejado de obter a onda verde. Contudo, é essencial destacar algumas considerações e levantar questionamentos sobre a validação dos resultados.

No decorrer da análise, o estudo concentrou-se em um único horário de pico, especificamente na parte matutina e em um sentido de fluxo (leste-oeste), utilizando apenas uma banda. Embora tenha sido considerado o Corredor T-7 como líder na sincronização, é crucial reconhecer que a Avenida de grande fluxo, como a Castelo Branco, pode desempenhar um papel central na sincronização, dado o seu maior volume volumétrico.

Além disso, foram realizados testes de otimização do sistema, considerando diferentes abordagens, como por fluxo ou por cruzamentos. A análise passo a passo

revelou que o sistema apresenta um desempenho mais eficaz com a sincronização de banda.

Durante a implementação no sistema PTV VISTRO, algumas dificuldades foram identificadas em relação à aceitação de determinadas geometrias, especialmente na rotatória localizada na Av. Assis Chateaubriand com a Rua Gercina Borges Teixeira. O sistema também enfrentou desafios na análise de entroncamentos, como Av. C-04 com Av. C-05, Av. T-07 e T-7 com Av. Assis Chateaubriand.

É relevante observar que, durante a análise, os semáforos exclusivos para travessias de pedestres foram desconsiderados, omitindo o modelo no qual o pedestre aciona o botão para iniciar a travessia.

Outro ponto a ser considerado é a limitação nos dados volumétricos fornecidos pela Secretaria Municipal de Mobilidade, que contava apenas com a contagem dos cruzamentos equipados com radares. Em virtude dessa limitação, foi utilizado o macromodelo do projeto de pesquisa “Estimação da Matriz Origem e Destino de Goiânia” atualizado para o ano 2023.

O estudo atingiu seu objetivo de alcançar a onda verde, porém levanta algumas questões a serem aprimoradas para sua aplicação prática na sincronização das principais avenidas de Goiânia e para futuras pesquisas. Algumas dessas questões incluem:

- Qual o melhor horário de pico a ser analisado?
- Entre os corredores, qual deve ser considerado líder para a sincronização? Aquele com maior volume ou o fluxo estudado?
- Existem outros métodos de otimização?
- Se o sistema for online e modificado por hora de pico, o fluxo melhora?

4.4.1 Curiosidade

O software PTV VISTRO revelou estudos complementares que podem agregar valor a análises distintas. Uma observação pertinente destaca-se na análise das emissões de gases, evidenciando uma redução expressiva da emissão de carbono com a implementação da onda verde. A Tabela 4.2 apresenta uma comparação entre o Cenário Base e o Cenário 2, destacando essa diferença significativa nos níveis de emissões.

Tabela 4.2 Comparação de Emissão de Gases Poluentes

	Consumo Total de Combustível (L/h)	Emissão de CO (g/h)	Emissão de NOX (g/h)	Emissão de VOC (G/H)
Cenário Base	39.238,3	724.559,2	140.972,9	16.7923,6
Cenário 2	26.606,1	491.298,5	95.588,8	113863,2

Fonte: Autor, 2024.

Esses resultados apontam não apenas para a eficácia da sincronização na otimização do tráfego, mas também para seus impactos positivos no meio ambiente, com uma clara correlação entre a melhoria do fluxo de veículos e a redução das emissões poluentes. Essa constatação destaca a importância não apenas do ponto de vista da mobilidade urbana, mas também do aspecto ambiental, reforçando os benefícios multifacetados da implementação da onda verde no contexto analisado.

5 CONCLUSÃO

O estudo de caso que abordou a implementação da *green wave* pode ser considerado satisfatório, alcançando sua proposta inicial de conduzir uma análise prática e efetuar a aplicação da onda verde como banda no Corredor T-7.

Uma observação notável foi a expressiva redução no delay do sistema, indicando eficácia na otimização do fluxo de tráfego. Adicionalmente, o estudo proporcionou insights valiosos ao examinar as emissões de gases poluentes, evidenciando uma diminuição significativa dessas emissões durante a implementação da onda verde.

Contudo, observa-se de que a análise de corredores de onda verde em Goiânia pode ser mais proveitosa se realizado em rede, já que as prioridades entre avenidas podem ter pesos distintos e pode impactar na sincronização da onda verde. Também se observa que é necessário estudar sincronizações para os três períodos pico já que os fluxos podem apresentar comportamentos diferentes e que numa análise de sincronização em rede é possível identificar as prioridades em corredores

Com base nos resultados obtidos, surgiram oportunidades para análises mais aprofundadas em futuros estudos. Essas possíveis abordagens incluem a comparação entre diferentes horários de banda, a avaliação dos sentidos de deslocamento, a aplicação de técnicas adicionais de otimização, investigação da sincronia online entre outros.

Esses resultados, além de consolidarem o sucesso do estudo atual, abrem portas para novas pesquisas no campo da onda verde, destacando a relevância contínua desse tópico na busca por soluções eficazes para a gestão do tráfego urbano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS

BARCELÓ, Jaume. Models, traffic models, simulation, and traffic simulation. **Fundamentals of traffic simulation**, p. 1-62, 2010. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4419-6142-6_1. Acesso em: 15 de ago. 2023.

CIVITAS Initiative, 2013. About Us. CIVITAS: Cleaner and Better Transport in Cities. **Intelligent Transport Systems and traffic management in urban areas**. 2015. Disponível em: <http://www.civitas-initiative.org/about-us-page>. Acesso em: 20 de ago. 2023.

DE CARVALHO, Carlos Henrique Ribeiro. **Desafios da mobilidade urbana no Brasil**. Texto para discussão, 2016. Disponível em: <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/144634/1/861075560.pdf>. Acesso em: 20 de ago. 2023.

DENATRAN - DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRÂNSITO. **CTB - Código de trânsito Brasileiro**: Instituído pela Lei no 9.503 de 23 de Setembro de 1997 - Brasília.

DNER - DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Classificação funcional do sistema rodoviário do Brasil**, 1974.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de projeto geométrico de travessias urbanas**, 2010

FUSCO, Gaetano; BIELLI, Maurizio; CIPRIANI, Ernesto; GORI, Stefano; NIGRO, Marialisa. **Signal settings synchronization and dynamic traffic modelling**. European Transport - Trasporti Europei, [S. l.], n. 53, p. 1–25, 2013. Disponível em: <https://www.openstarts.units.it/server/api/core/bitstreams/24d89d20-f401-49cc-9c3c-22f2d9421ef0/content>. Acesso em: 30 de ago. 2023.

GARTNER, Nathan H.; ASSMAN, Susan F.; LASAGA, Fernando; HOU, Dennis L. A multi-band approach to arterial traffic signal optimization. **Transportation Research Part B**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 55–74, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0191261591900139>. Acesso em: 30 de ago. 2023.

HIGHWAY CAPACITY MANUAL. Washington, D.C.: Transportation Research Board, 2010.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2010

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2022

Ji, L., & Cheng, W. **Method of Bidirectional Green Wave Coordinated Control for Arterials under Asymmetric Release Mode**. Electronics (Switzerland), [S. l.], v. 11, n. 18, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/18/2846> .Acesso em:

JOHN D. C.; LITTLE. **The Synchronization of traffic signals by mixed integer linear programming**. MIT, [S. l.], 1972. Disponível em: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD0480955.pdf> . Acesso em: 18 de set. 2023.

LLANQUE AYALA, Rosemary Janneth. **Procedimento para identificação dos principais parâmetros dos microssimuladores a serem considerados no processo de calibração**. 2013. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/13892>. Acesso em: 01 de set. 2023.

MAIA, F. V. B. **Calibração e Validação de Modelos de Meso e Microssimulação do Tráfego para a Avaliação de Intervenções Tático-Operacionais na Malha Viária Urbana**. Dissertação de Mestrado, Programa de Mestrado em Engenharia de Transportes, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, 2007. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/1556>. Acesso em: 01 de set. 2023.

MEDEIROS, Miranda, et al. **Gestão Semafórica em Tempo Real: Estudo de um trecho da Avenida dos Autonomistas na Cidade de Osasco e Comparação com o Modelo de São Paulo**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2018. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4924130/mod_resource/content/0/TCC_Gestao_semaforica_em_tempo_real.pdf. Acesso em: 01 de set. 2023.

MENESES, Hamifrancy Brito; LEANDRO, Carlos Henrique Pires; LOUREIRO, Carlos Felipe Grangeiro. Indicadores de Desempenho para Sistemas Centralizados de Controle do Tráfego Urbano em Tempo Real. In: **XVII Congresso da ANPET**. 2003. Disponível em: https://www.sinaldetransito.com.br/artigos/indicadores_de_desempenho_para_sistemas_centralizados.pdf . Acesso em: 06 de set. 2023.

MIRANDA, CAROLINA DE MEDEIROS. **GESTÃO SEMAFÓRICA EM TEMPO REAL**. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4924130/mod_resource/content/0/TCC_Gestao_semaforica_em_tempo_real.pdf . Acesso em: 02 de set. 2023.

NETO, J.C. NT243 - **Semáforo ser ou não ser inteligente?: Uma comparação entre o controle semafórico em tempos fixos e o em tempo real**. São Paulo: Companhia de Engenharia de Tráfego - CET, 2016. Disponível em: https://nou.sinaldetransito.com.br/wp-content/uploads/2021/03/semaforo_ser_ou_nao_ser.pdf . Acesso em: 08 de set. 2023

PERON, L. **Contribuição metodológica para aplicação de prioridade semafórica condicional em corredores de ônibus**. Dissertação de Mestrado, PTR, USP, São Paulo, SP, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-05112015-103715/pt-br.php>. Acesso em: 08 de set. 2023.

PIETRANTONIO, Hugo. Manual de procedimento de pesquisa para análise de conflitos de tráfego em interseções. **São Paulo: Seção de Engenharia de Tráfego e Transporte de Passageiros–IPT**, 1991. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/p/hugo.pietrantonio/Manual91.pdf>. Acesso em : 18 de ago. 2023.

PIETRANTONIO, H. **Notas de aula sobre engenharia de tráfego**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Transportes da POLI-USP, 2018.

RESENDE. U. P. de. **Dinâmicas e contradições na produção do espaço da Cidade: análise da especulação imobiliária a partir da Implantação do parque cascavel**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2012. Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/mestrado/trabalhos-mestrado/mestrado-ubiratan-pereira.pdf>. Acesso em: 28 de ago. 2023

SINATRAN - SINDICATO DOS AGENTES DE TRÂNSITO DE GOIÂNIA

SELINGER, M. P. E.; SCHMIDT, L. **Adaptive Traffic Control Systems in the United States**. HDR Engineering, Inc. 2009. Disponível em: <http://cdnassets.hw.net/da/ad/6d673e3b4202b71314ab5eff3446/3675-adaptive-traffic-control-systems-in-the-united-states-updated-summary-and-comparison.pdf> . Acesso em: 10 de set. 2023.

SINDIPEÇAS. **Relatório da Frota Circulante**. 2019. Disponível em: https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2019/RelatorioFrotaCirculante_Mai_o_2019.pdf . Acesso em: 08 de set. 2023.

STEVANOVIC, A. **Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and foreign state of practice**. 1.ed. Washington: NCHRP, 2010. Disponível em: <http://elibrary.pcu.edu.ph:9000/digi/NA02/2010/14364.pdf> . Acesso em: 12 de set. 2023.

WEBSTER, F. V. **Traffic Signal settings, Road Research Technical**, Paper No.39. Londres: HSMO, 1958. Disponível em : <https://trid.trb.org/view/113579> . Acesso em :

WEBSTER, F. V.; COBBE, B. M. **1966**. "Traffic signal." Road Research Technical Paper No. 56, Her Majesty's Stationery Office, London. Disponível em: <https://nou.sinaldetransito.com.br/wp-content/uploads/2021/03/webster2.pdf> . Acesso em: 12 de set. 2023.

WIEDEMANN, R. **Simulation des Strassenverkehrsflusses**. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen der Universität Karlsruhe, Band 8, Karlsruhe, Alemanha. 1974. Disponível em: <https://trid.trb.org/view/596235> . Acesso em: 12 de set. 2023.

ANEXO A- RELATÓRIOS PTV VISTRO

Table of Contents

Intersection Analysis Summary	2
Study Intersections	5
Lane Configuration and Traffic Control	6
Traffic Volume - Base Volume	11
Time Space Diagram - Flowing Off	16
Route 1:	16
Time Space Diagram - Arterial Band	18
Route 1:	18

Intersection Analysis Summary

ID	Intersection Name	Control Type	Method	Worst Mvmt	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	Signalized	HCM 7th Edition	SB Left	0,585	24,0	C
2	ARA X BH	Signalized	HCM 7th Edition	SB Right	0,450	20,2	C
3	ARX-RE2	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	0,110	5,7	A
4	C17-LM	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,161	12,9	B
5	C17-C73	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	0,392	9,0	A
6	C12-C15	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	0,911	63,8	E
7	C12-C56	Signalized	HCM 7th Edition	EB Thru	0,370	8,3	A
8	C12-C8	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,389	9,4	A
9	C12-C55	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,359	8,5	A
10	C4-C7	Signalized	HCM 7th Edition	SB Left	0,721	33,7	C
11	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,413	8,8	A
12	Av. C4 & C1	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	0,655	23,7	C
13	Av. C4 & C34	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,412	6,0	A
14	Av. C4 & C32	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,394	8,4	A
15	AV C4 & T7 & AV 205	Signalized	HCM 7th Edition	EB Left	6,860	5.240,4	F
16	T7 & C2	Signalized	HCM 7th Edition	EB Thru	0,700	820,7	F
17	T7 & T3	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,675	14,6	B
18	T7 & T30	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,698	13,9	B

19	T7 &T2	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	1,104	272,7	F
20	T1_2-T7	Signalized	HCM 7th Edition	WB Thru	0,848	46,0	D
21	T1_1-T7	Signalized	HCM 7th Edition	EB Thru	1,096	254,5	F
22	CASTELO BRANCO-T7	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	1,225	408,8	F
23	RUY-T7	Signalized	HCM 7th Edition	SB Right	0,466	7,5	A
24	R11- T7	Signalized	HCM 7th Edition	NB Left	0,478	8,1	A
25	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition	SB Left	2,348	1.711,3	F
26	ASS-PORT	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,631	23,9	C
27	ASS-R11	Signalized	HCM 7th Edition	NB Left	0,474	10,9	B
28	RUA 9	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,694	25,4	C
29	ASS-R7	Signalized	HCM 7th Edition	SB Right	0,880	48,8	D
30	ASS-R5	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	0,767	27,5	C
31	ASS-R3	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,620	12,9	B
32	Ass-R1	Signalized	HCM 7th Edition	SB Left	0,596	12,8	B
33	Assis-94	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	1,352	609,3	F
34	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition		0,000	0,0	A
35	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition		0,000	0,0	A
36	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition		0,000	0,0	A
67	PEDESTRE	Unknown	?		?	?	?
201	Entrada T1 W	Unknown	?		?	?	?
202	Entrada T1 E	Unknown	?		?	?	?
256	ABERTURA ASSIS	Unknown	?		?	?	?

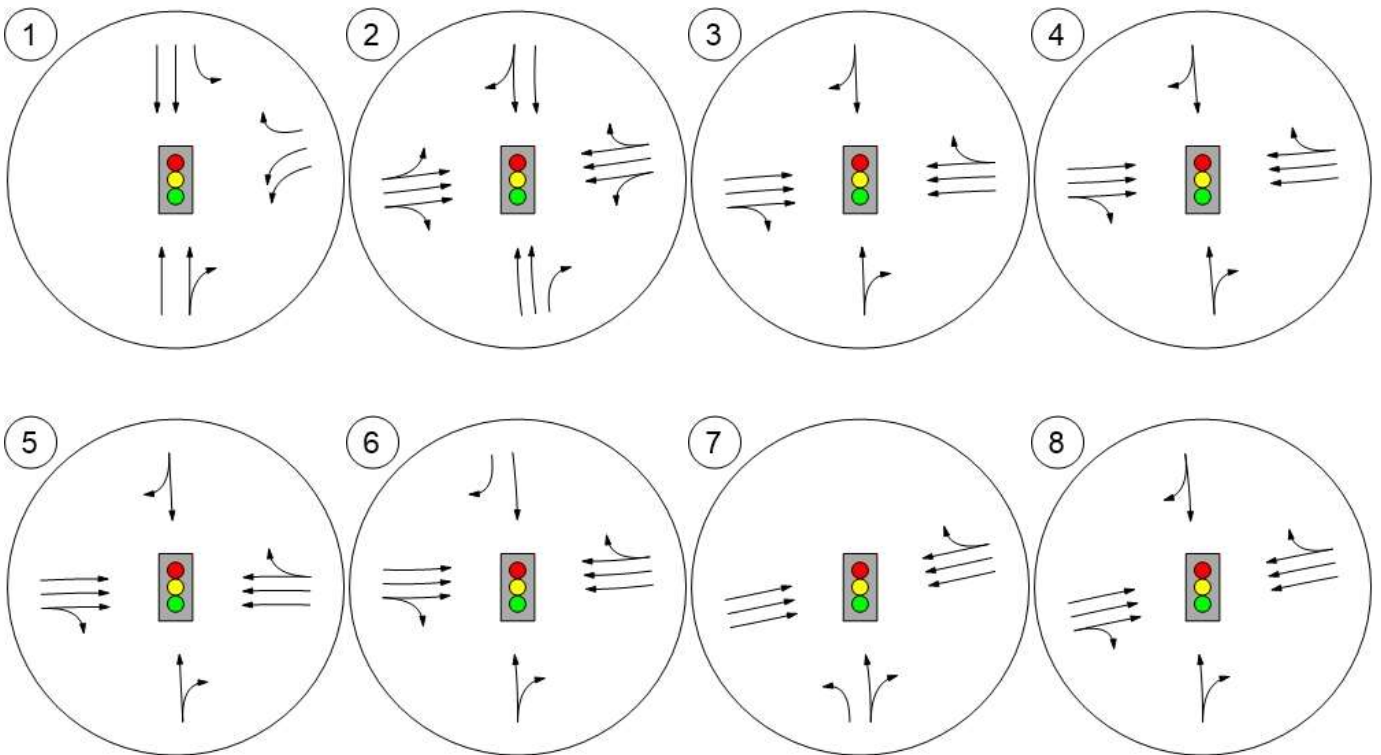
V/C, Delay, LOS: For two-way stop, these values are taken from the movement with the worst (highest) delay value. For

all other control types, they are taken for the whole intersection.

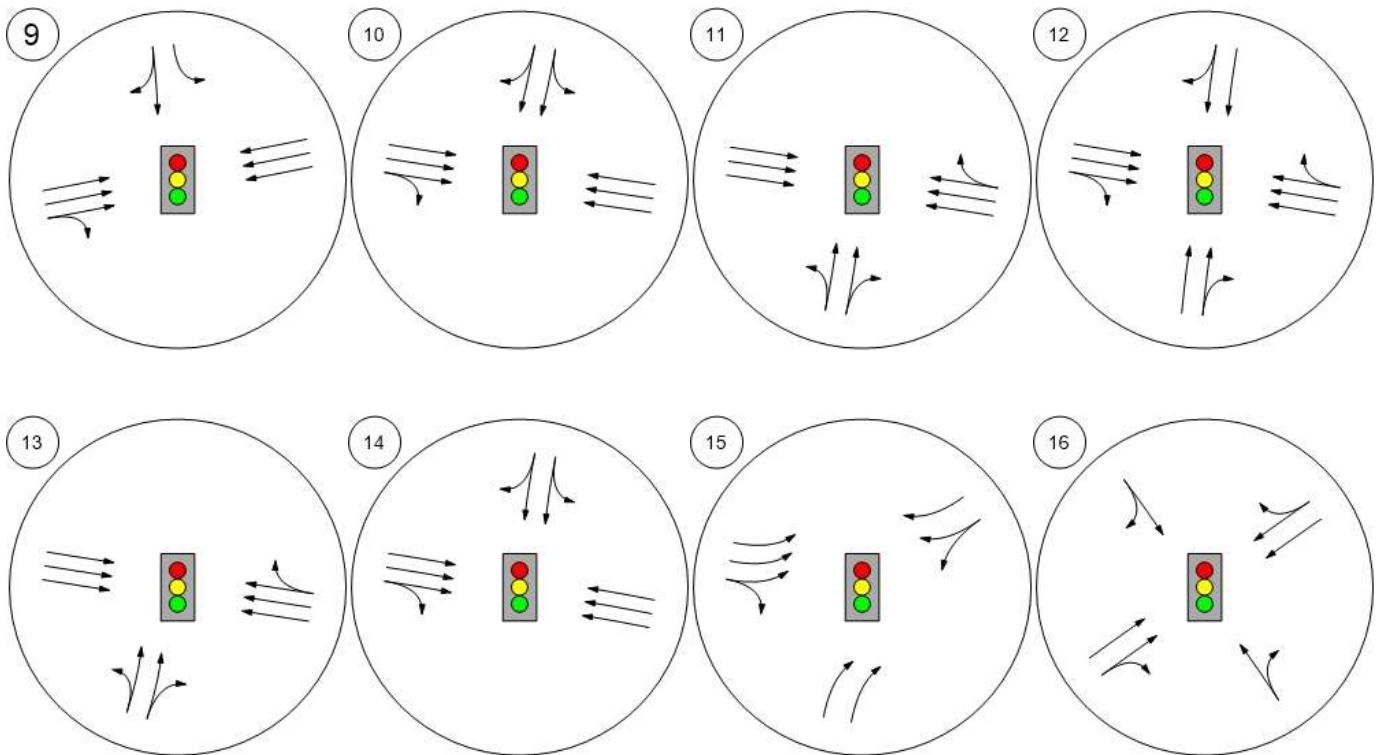
Study Intersections



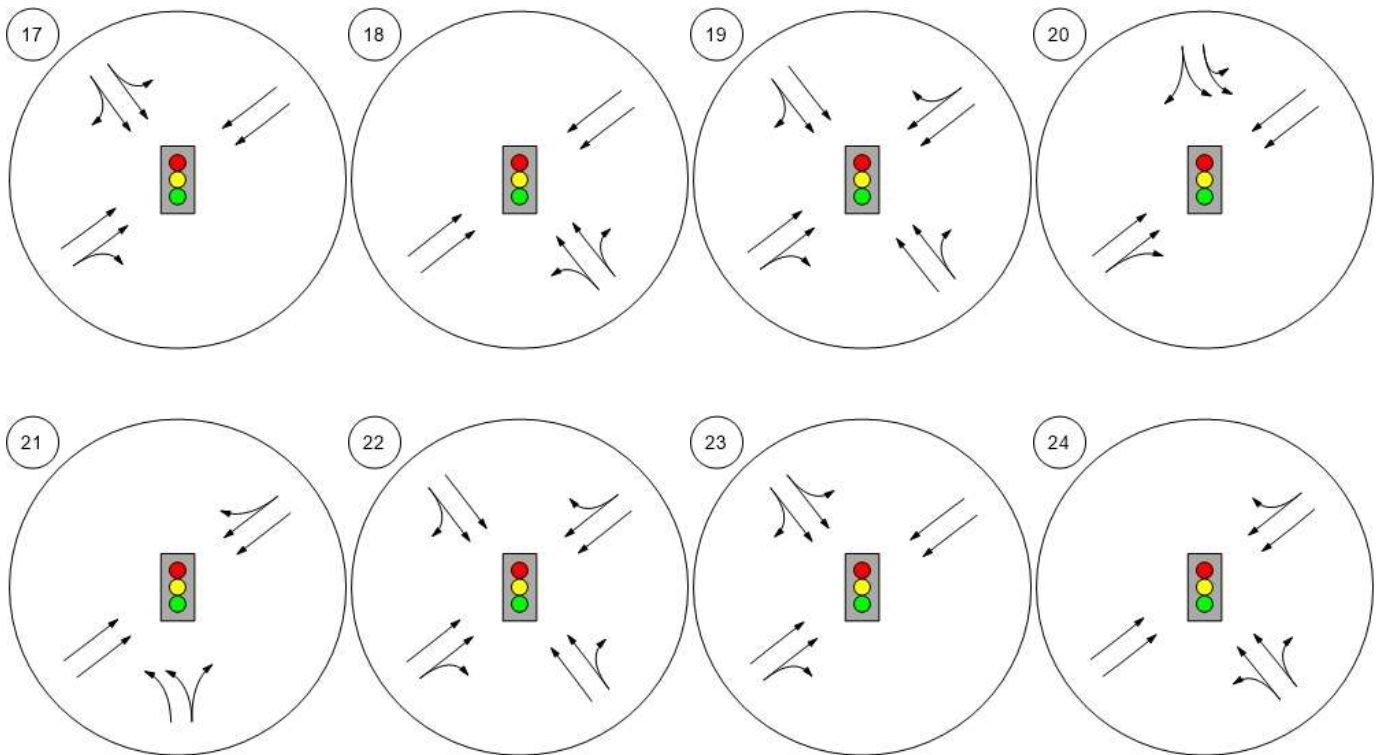
Lane Configuration and Traffic Control



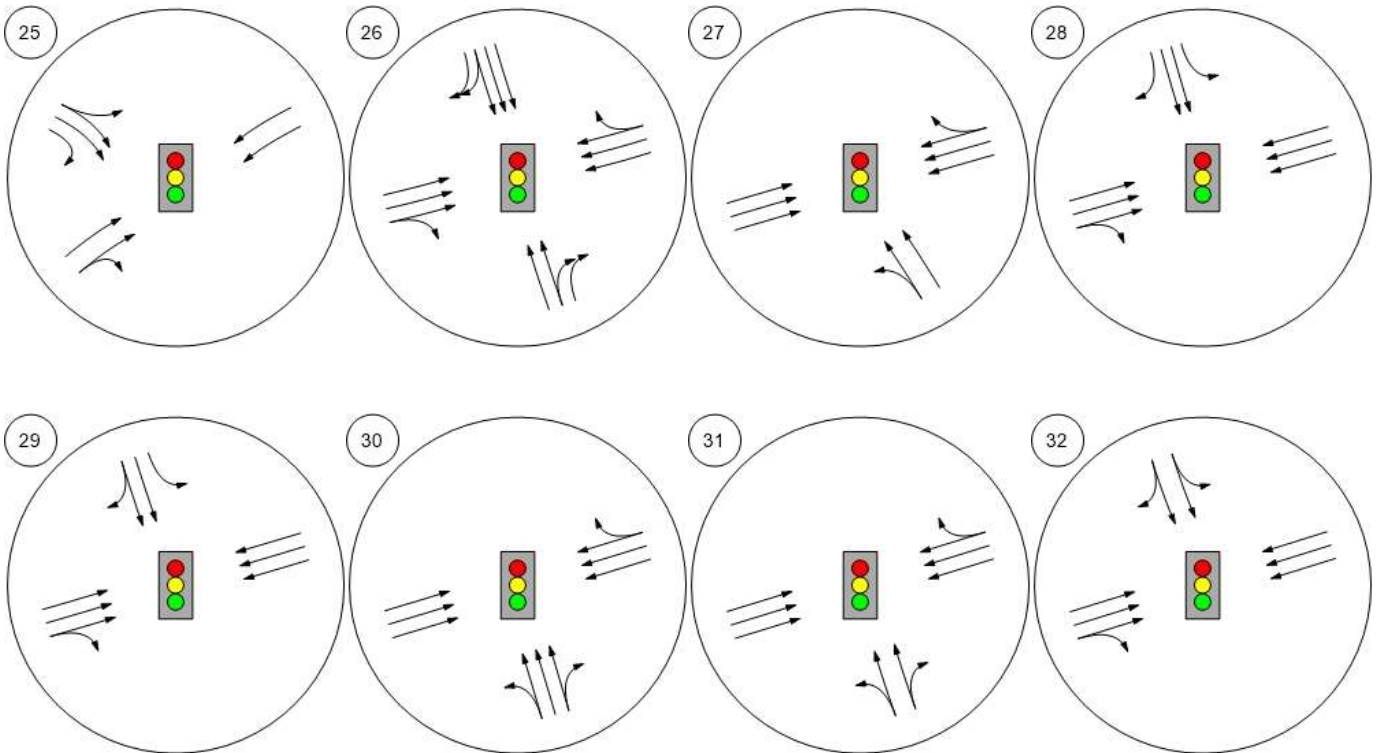
Lane Configuration and Traffic Control



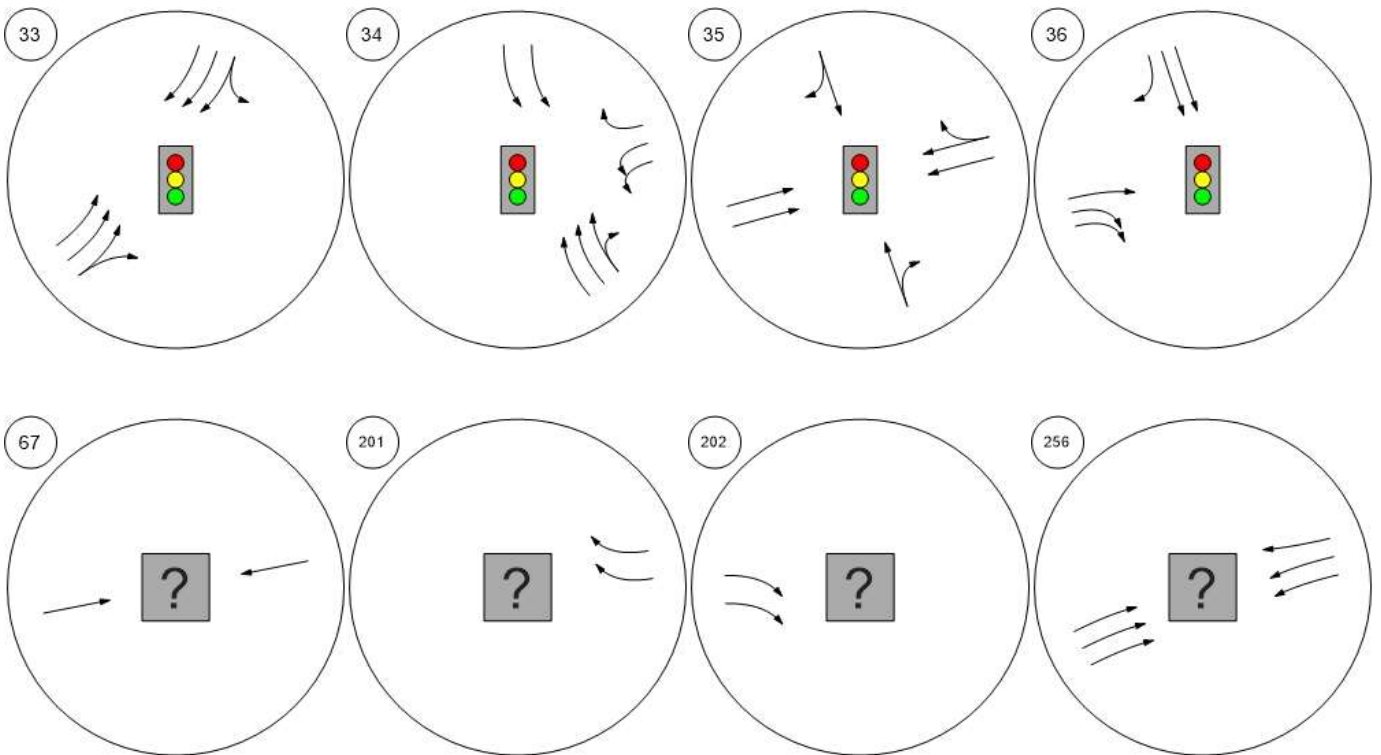
Lane Configuration and Traffic Control



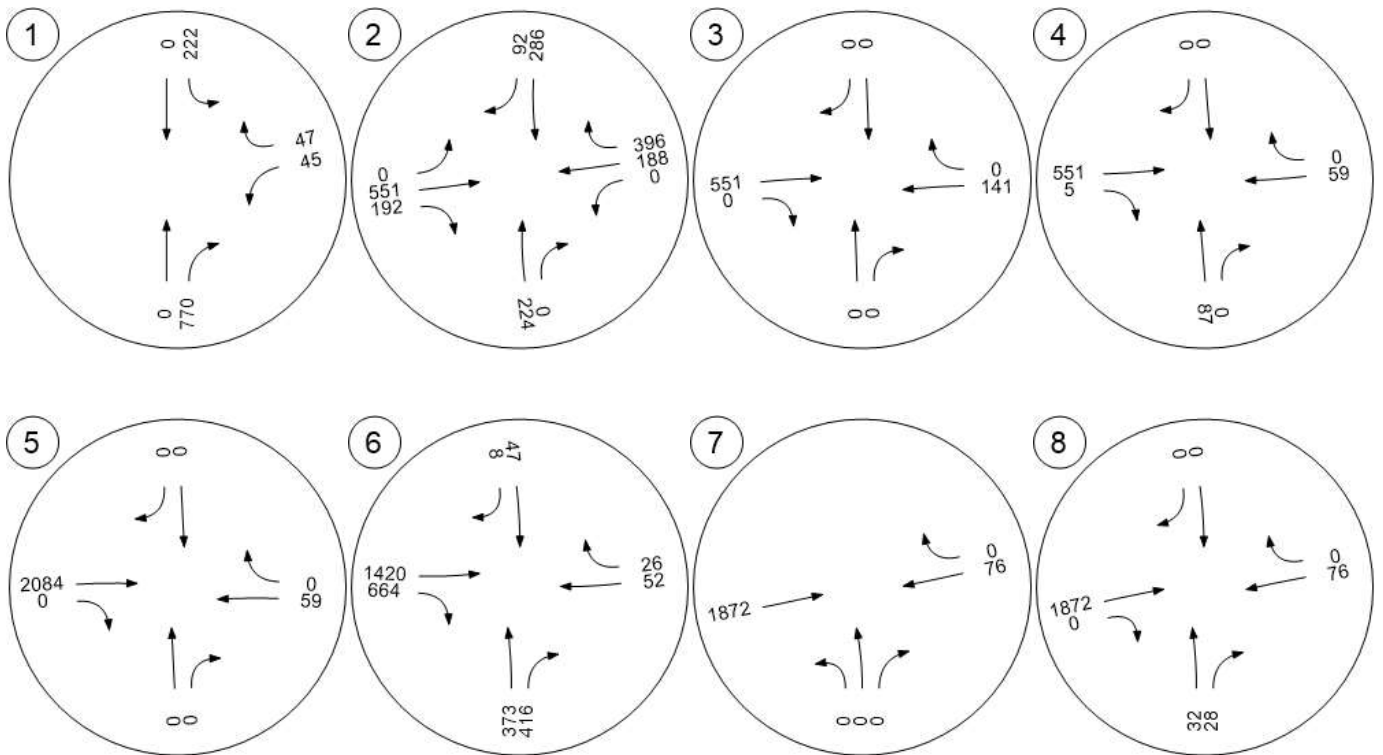
Lane Configuration and Traffic Control



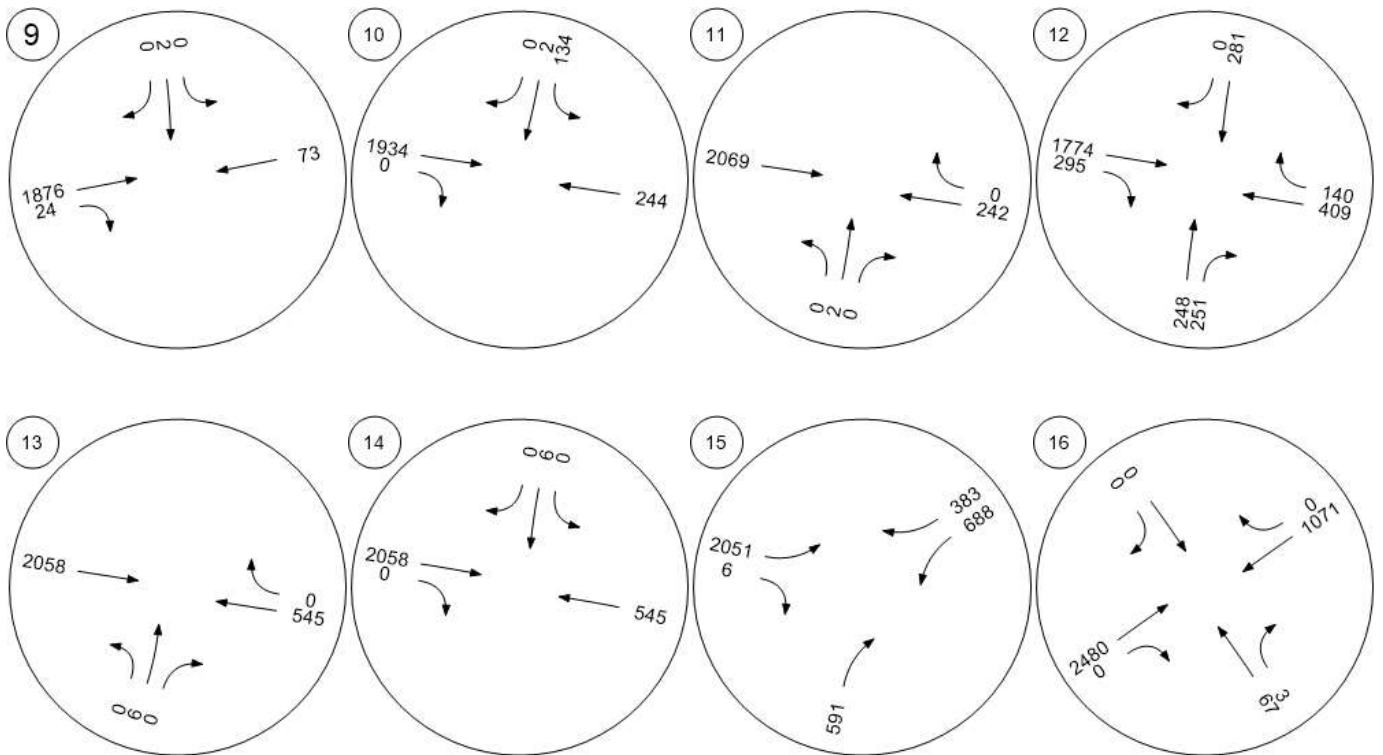
Lane Configuration and Traffic Control



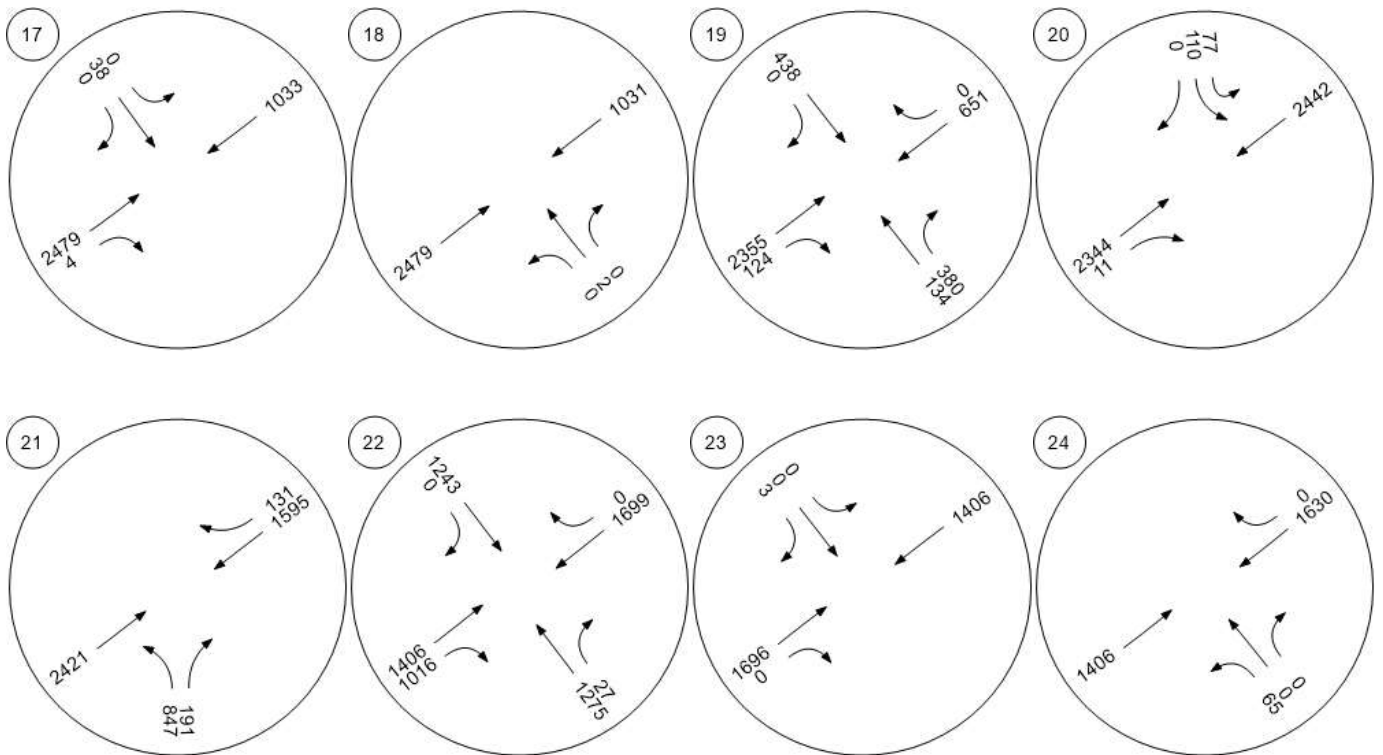
Traffic Volume - Base Volume



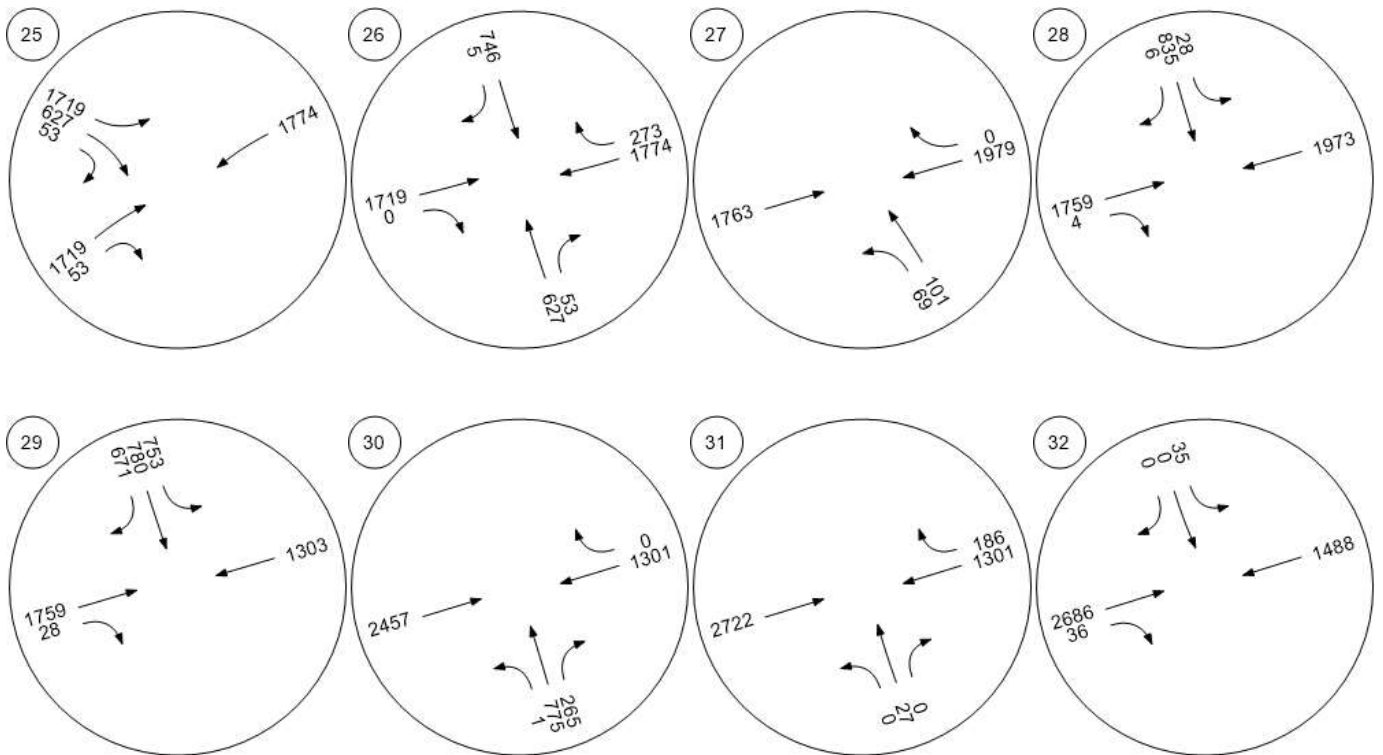
Traffic Volume - Base Volume



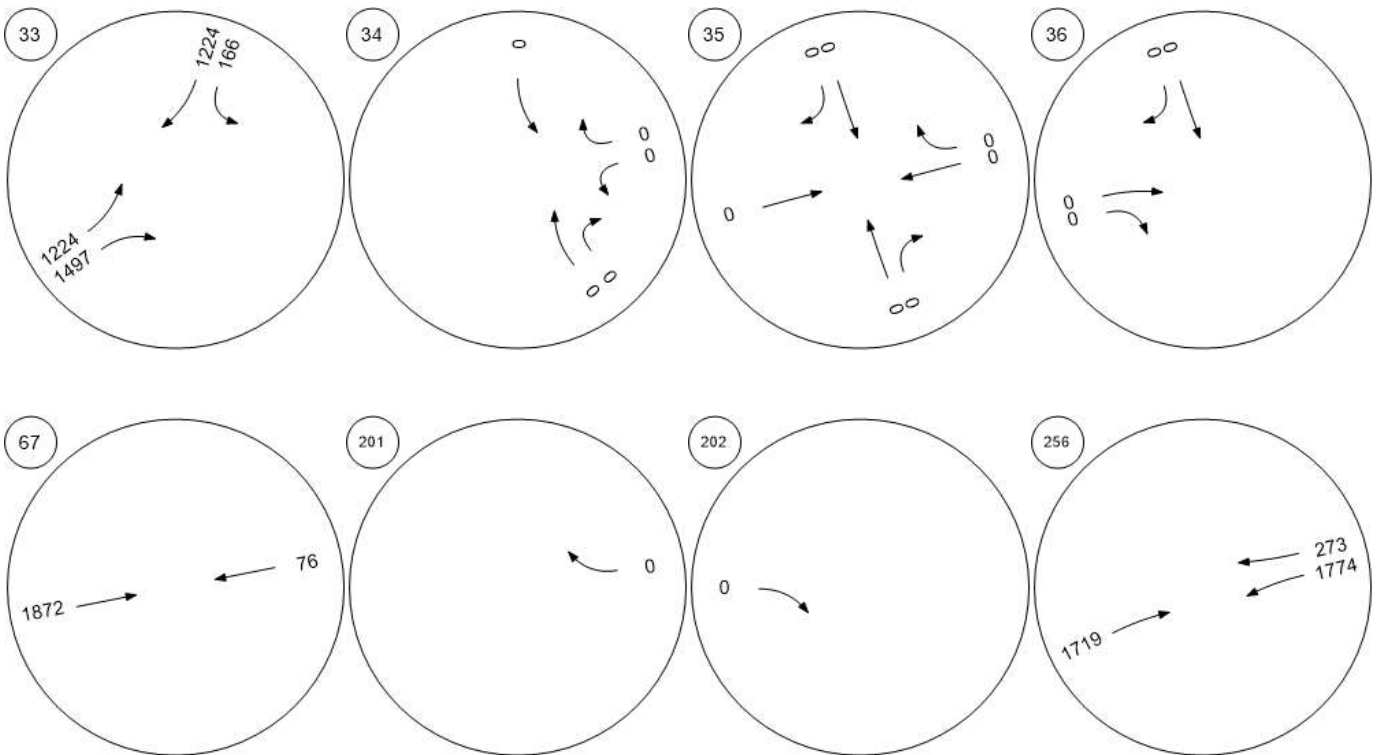
Traffic Volume - Base Volume

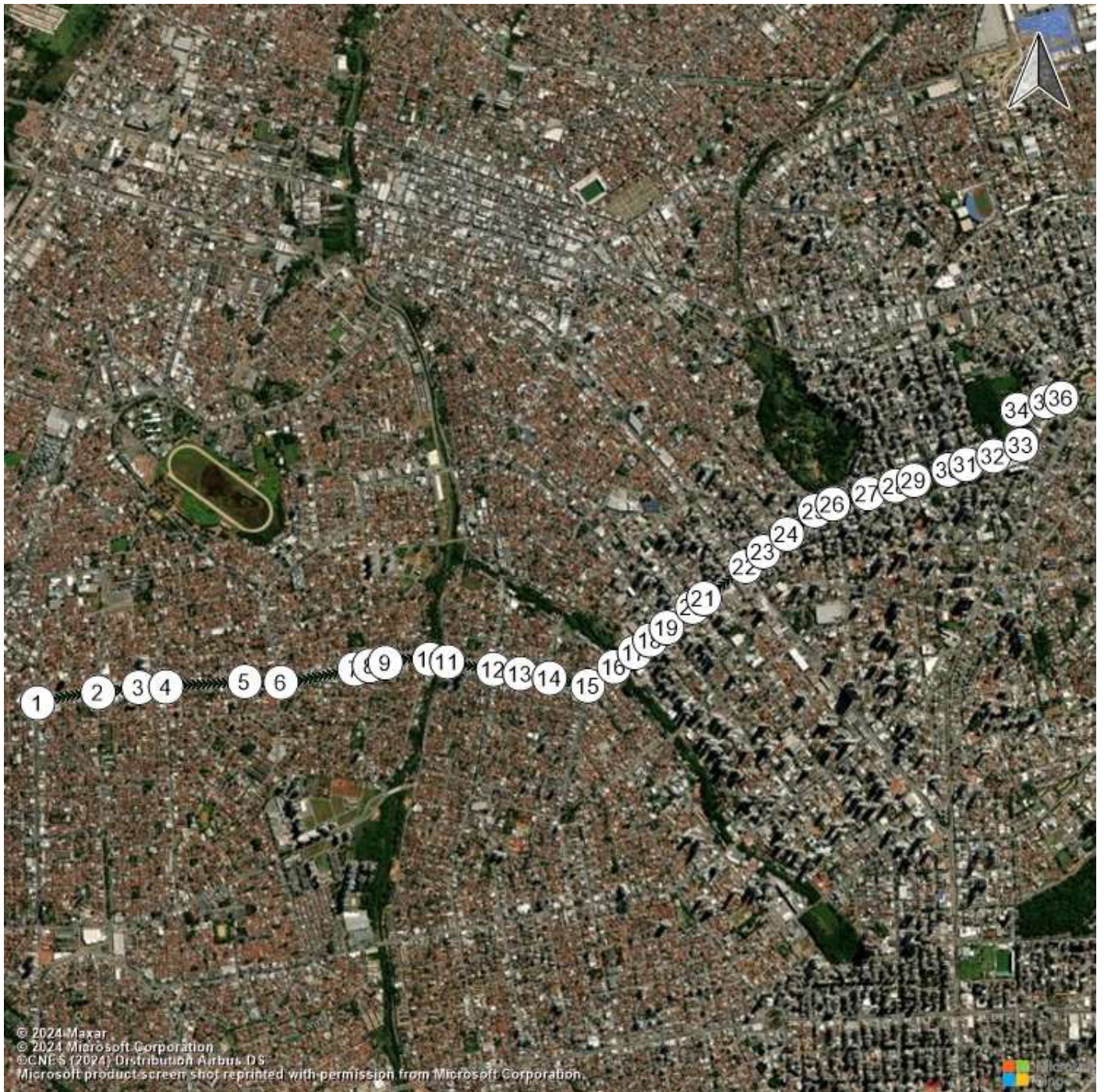


Traffic Volume - Base Volume

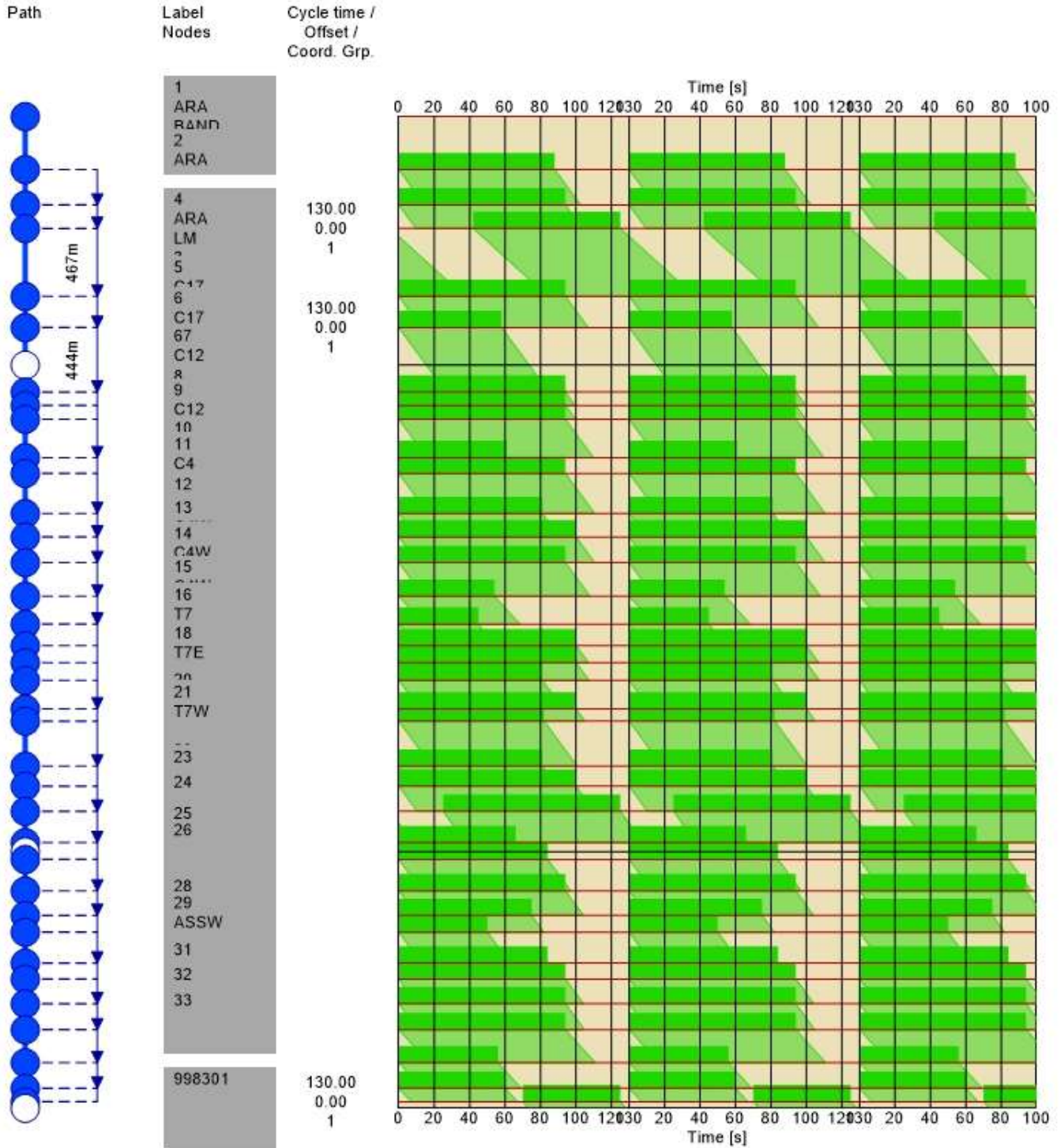


Traffic Volume - Base Volume



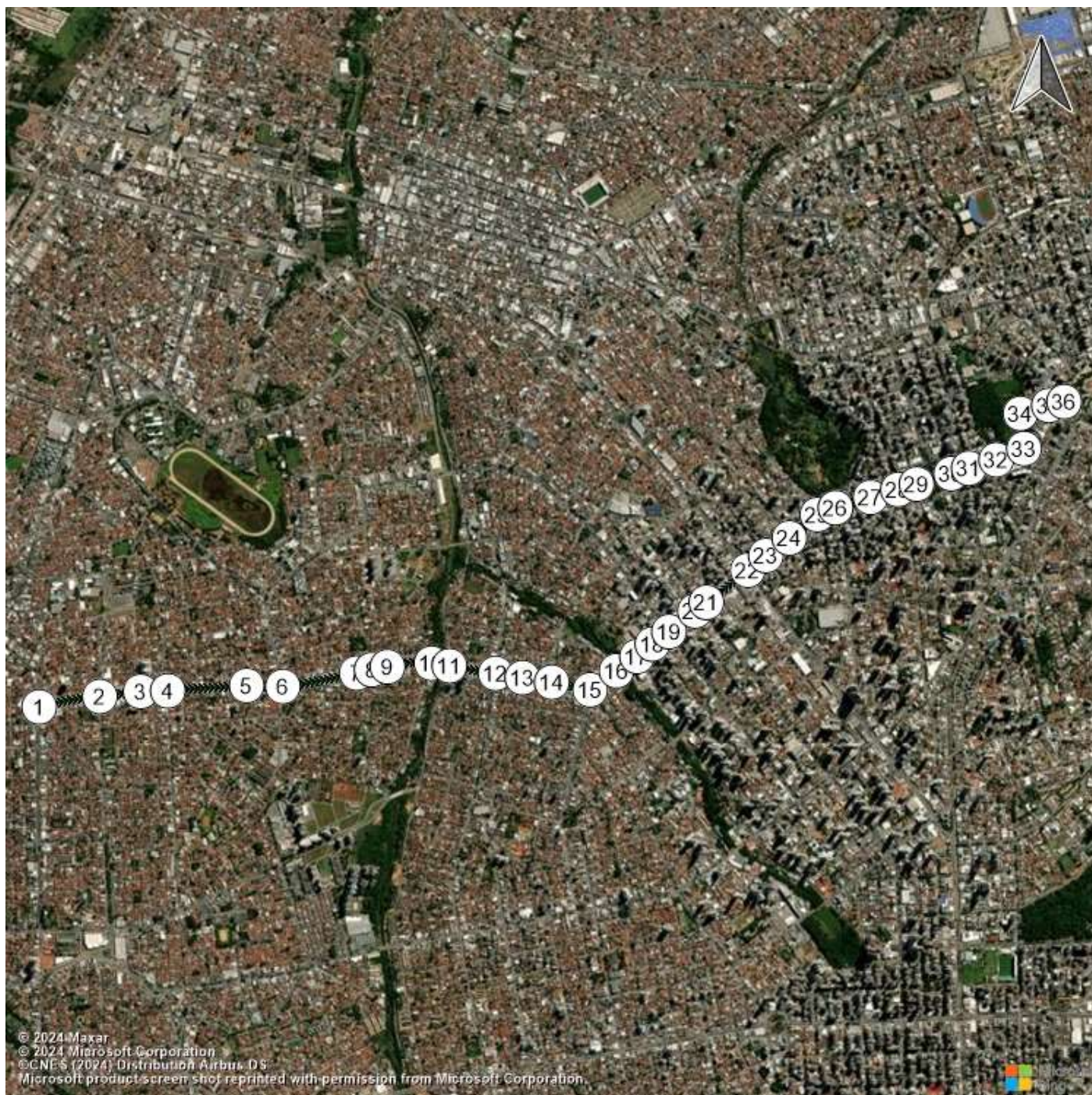


Route 1:



Time Space Diagram - Arterial Band

Route 1:



Route 1:

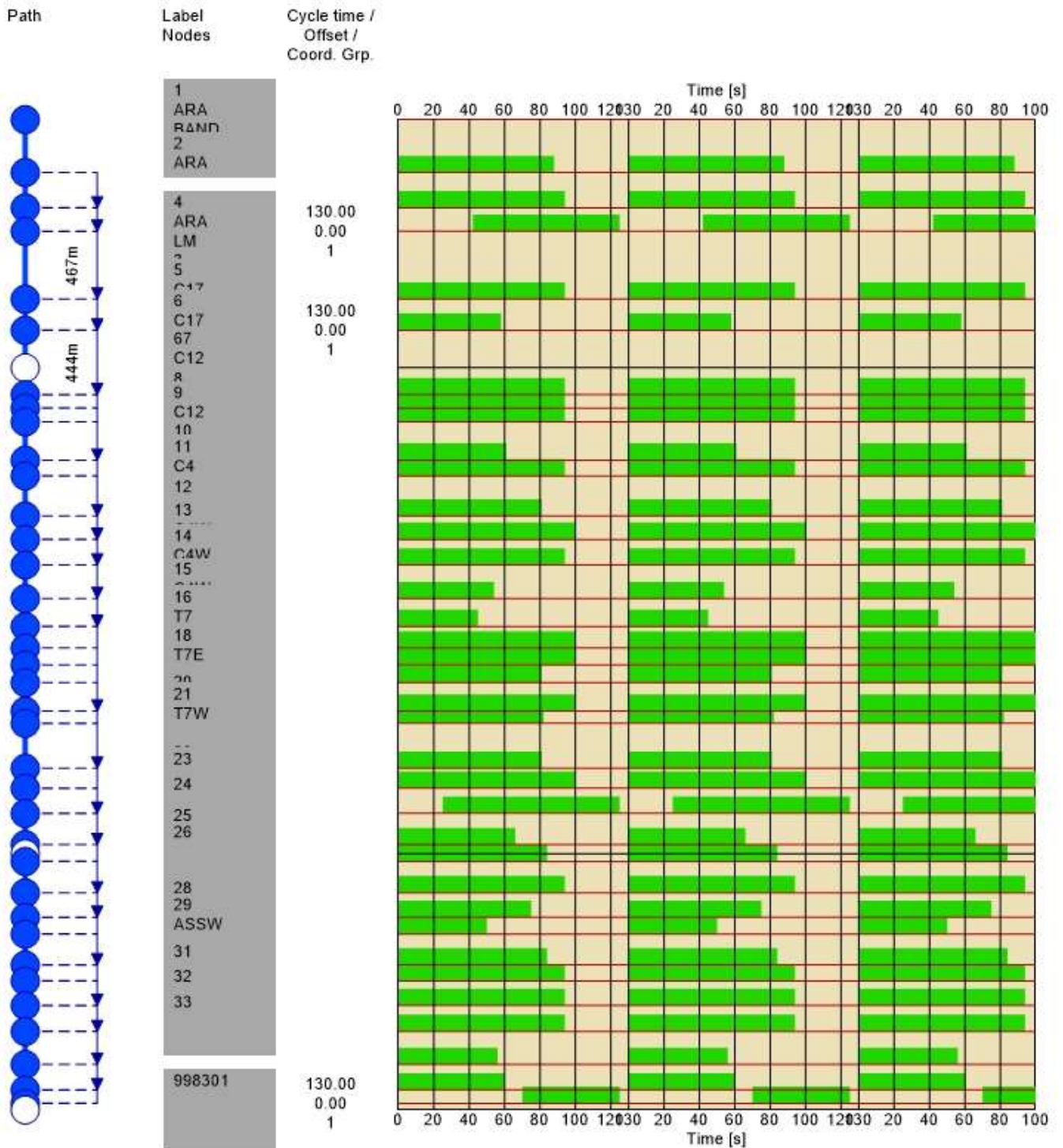


Table of Contents

Intersection Analysis Summary	2
Study Intersections	5
Time Space Diagram - Flowing Off	6
Route 1:	6
Time Space Diagram - Arterial Band	8
Route 1:	8

Intersection Analysis Summary

ID	Intersection Name	Control Type	Method	Worst Mvmt	V/C	Delay (s/veh)	LOS
1	ARA-BAND	Signalized	HCM 7th Edition	WB Right	0,585	19,7	B
2	ARA X BH	Signalized	HCM 7th Edition	SB Right	0,450	26,3	C
3	ARX-RE2	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	0,110	4,1	A
4	C17-LM	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,161	16,6	B
5	C17-C73	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	0,392	6,5	A
6	C12-C15	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	0,911	66,7	E
7	C12-C56	Signalized	HCM 7th Edition	EB Thru	0,370	6,0	A
8	C12-C8	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,389	8,0	A
9	C12-C55	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,359	6,2	A
10	C4-C7	Signalized	HCM 7th Edition	SB Left	0,721	41,7	D
11	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,413	6,4	A
12	Av. C4 & C1	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	0,655	29,7	C
13	Av. C4 & C34	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,412	4,4	A
14	Av. C4 & C32	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,394	6,2	A
15	AV C4 & T7 & AV 205	Signalized	HCM 7th Edition	EB Left	3,612	2.398,7	F
16	T7 & C2	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,700	19,1	B
17	T7 & T3	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,675	10,3	B
18	T7 & T30	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,698	9,2	A

19	T7 &T2	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	1,104	246,7	F
20	T1_2-T7	Signalized	HCM 7th Edition	SBL2	0,848	20,4	C
21	T1_1-T7	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	1,096	230,3	F
22	CASTELO BRANCO-T7	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	1,225	383,5	F
23	RUY-T7	Signalized	HCM 7th Edition	SB Right	0,466	5,5	A
24	R11- T7	Signalized	HCM 7th Edition	NB Left	0,478	6,8	A
25	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition	WB Thru	2,348	1.652,8	F
26	ASS-PORT	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,631	30,4	C
27	ASS-R11	Signalized	HCM 7th Edition	NB Left	0,474	9,7	A
28	RUA 9	Signalized	HCM 7th Edition	SB Thru	0,694	32,1	C
29	ASS-R7	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	0,880	56,1	E
30	ASS-R5	Signalized	HCM 7th Edition	NB Right	0,767	33,4	C
31	ASS-R3	Signalized	HCM 7th Edition	NB Thru	0,620	9,3	A
32	Ass-R1	Signalized	HCM 7th Edition	SB Left	0,596	9,3	A
33	Assis-94	Signalized	HCM 7th Edition	EB Right	1,352	574,3	F
34	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition		0,000	0,0	A
35	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition		0,000	0,0	A
36	New Intersection	Signalized	HCM 7th Edition		0,000	0,0	A
67	PEDESTRE	Unknown	?		?	?	?
201	Entrada T1 W	Unknown	?		?	?	?
202	Entrada T1 E	Unknown	?		?	?	?
256	ABERTURA ASSIS	Unknown	?		?	?	?

V/C, Delay, LOS: For two-way stop, these values are taken from the movement with the worst (highest) delay value. For

all other control types, they are taken for the whole intersection.

Study Intersections

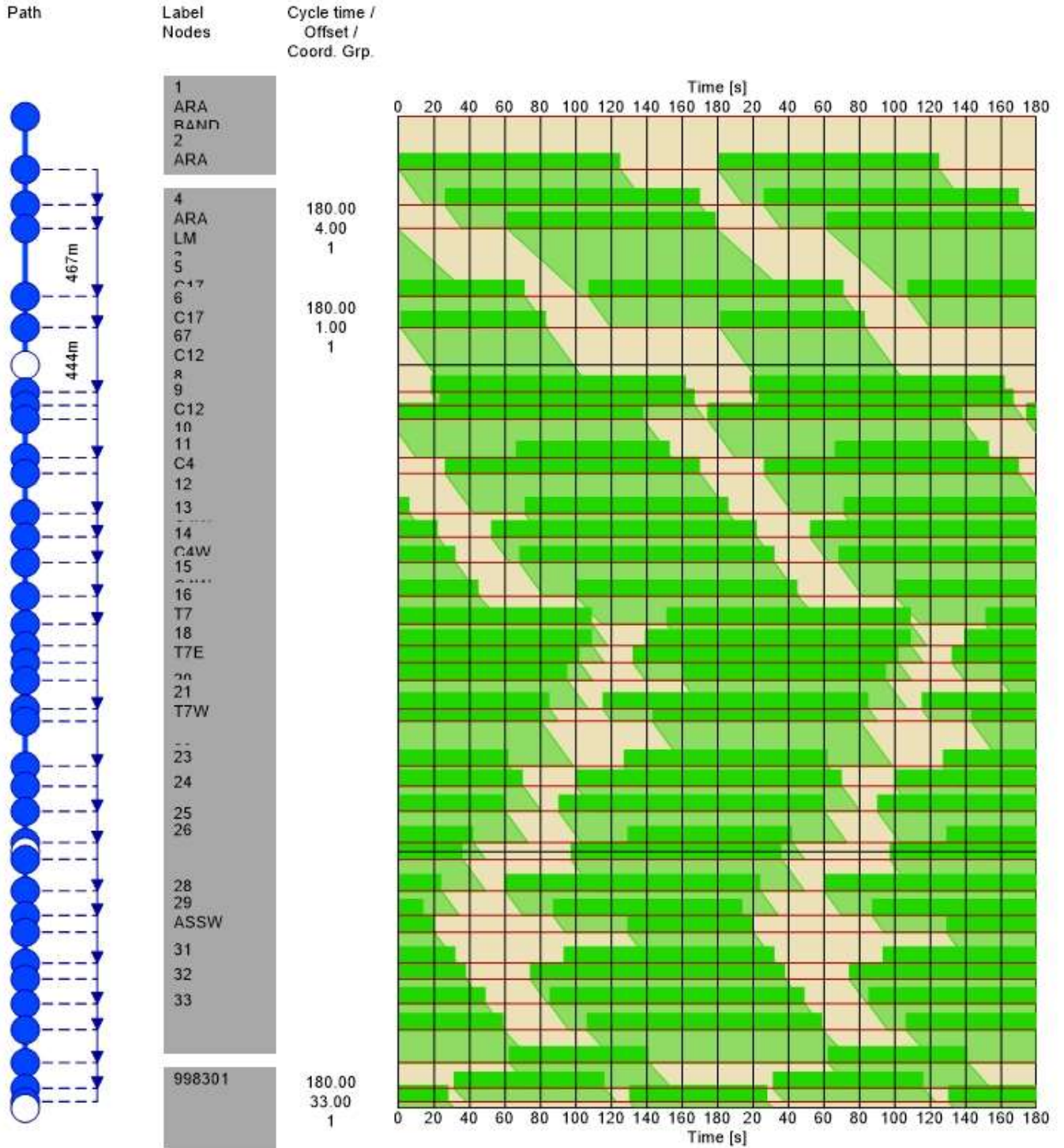


Time Space Diagram - Flowing Off

Route 1:

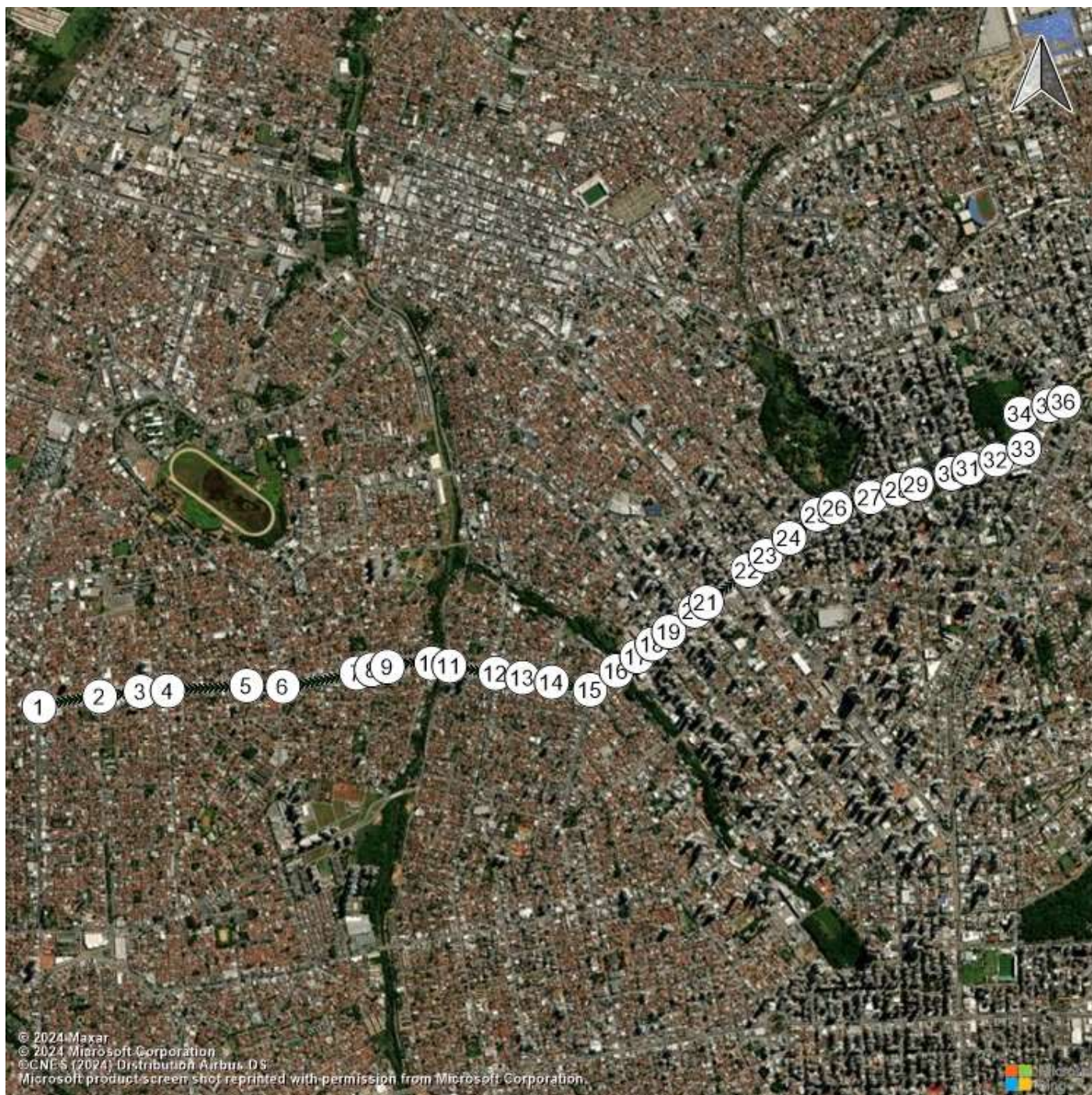


Route 1:



Time Space Diagram - Arterial Band

Route 1:



Route 1:

