

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE AUTOMAÇÃO E SISTEMAS**

Eduardo Delagnelo Barbeta

**Controle Atuado de Interseções Isoladas com
Princípios da Técnica LHOVRA**

Florianópolis
2017

Eduardo Delagnelo Barbeta

**Controle Atuado de Interseções Isoladas com
Princípios da Técnica LHOVRA**

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a aprovação na disciplina **DAS 5511: Projeto de Fim de Curso** do curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador(a): Prof. Werner Kraus Junior

Florianópolis
2017

Eduardo Delagnelo Barbeta

Controle Atuado de Interseções Isoladas com Princípios da Técnica LHOVRA

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina DAS5511: Projeto de Fim de Curso e aprovada na sua forma final pelo Curso de Engenharia de Controle e Automação.

Florianópolis, _____ de _____ de _____

Banca Examinadora:

<nome do orientador na empresa/instituto>
Orientador na Empresa
Nome da Empresa

Prof. Werner Kraus Junior
Orientador no Curso
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Max Hering de Queiroz
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

Sergio Maurício Prolo Santos Junior
Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

Rong Jiarui
Debatedor
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Professor Werner Kraus Junior pelo apoio e pelas orientações passadas ao longo do semestre com a oportunidade deste projeto.

Agradeço também ao professor Rodrigo Castelan Carlson pela ajuda prestada, quase como co-orientador, nas ausências do orientador.

Por último, agradeço a empresa Brascontrol que forneceu a problemática que originou este trabalho.

RESUMO

Em cidades de pequeno porte (até 100 mil habitantes), ou em bairros periféricos de cidades maiores, é comum encontrar-se interseções isoladas com fluxo de tráfego alto o suficiente para serem controladas por semáforos. Por estarem distantes de outras interseções, as chegadas de veículos tendem a ser independentes; isto é, não ocorre a chegada de grupos de veículos (ou “pelotões”) que teriam sido liberados por outra interseção a montante. O ajuste dos tempos de semáforos, nestes casos, pode ser dificultado pela variabilidade das chegadas. Tanto que é comum observar o desligamento dos semáforos em interseções isoladas após um certo período de operação. Além do desperdício de recursos, a desativação implica perda de desempenho operacional nos períodos de maior movimento, nos quais o semáforo aumentaria a capacidade da interseção. Para contornar o problema, este trabalho visa a obtenção de técnica de controle automático realimentado com prioridade para transporte público coletivo para interseções isoladas. Usa-se como referência a técnica LHOVRA, que reúne várias funcionalidades para controle desse tipo de interseção, adaptando-a para os casos de interesse. Comparações são realizadas com o ajuste do controle a tempos fixos (malha aberta) e com técnica simples de extensão de verde. Os resultados obtidos em simulador microscópico de tráfego urbano mostram o desempenho superior da técnica desenvolvida.

Palavras-chave: Controle Semafórico. LHOVRA. Controle Atuado.

ABSTRACT

In small cities (up to 100,000 inhabitants), or in peripheral neighborhoods of larger cities, it is common to find isolated intersections with traffic flows high enough to justify the installation of traffic lights. Being distant from other intersections, vehicle arrivals tend to be independent; that is, there is no arrival of groups of vehicles (or "platoons") that would have been released by another upstream intersection. The adjustment of semaphore times, in these cases, can be made difficult by the variability of the arrivals. So much that it is common to observe the deactivation of traffic lights at isolated intersections after a certain period of operation. In addition to the waste of resources, the deactivation implies loss of operational performance during periods of high traffic, in which the traffic light would increase intersection capacity. To overcome this problem, this work aims to obtain an automatic feedback technique with priority for collective public transport for isolated intersections. The LHOVRA technique, which combines several functionalities to control this kind of intersection, is used as a reference and adapted to the cases of interest. Comparisons are made with the adjustment of the control to fixed times (open loop control) and with a simple technique of extension of green. Results obtained in an urban traffic microscopic simulator show the superior performance of the developed technique.

Key-words: Semaphore Control. LHOVRA. Acted Control.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	10
1.1	Motivação.....	11
1.2	Objetivos.....	11
1.3	Local de Trabalho.....	12
2	Conceitos e Definições.....	13
2.1	Elementos Básicos da Programação Semafórica.....	13
2.1.1	Grupo de Movimento.....	13
2.1.2	Grupo Semafórico.....	14
2.1.3	Estágio.....	14
2.1.4	Diagrama de Estágios.....	14
2.1.5	Entreverdes.....	15
2.1.6	Vermelho Geral.....	15
2.1.7	Ciclo.....	16
2.1.8	Intervalo Luminoso.....	16
2.1.9	Plano Semafórico.....	16
2.1.10	Diagrama de intervalos luminosos ou diagrama de barras.....	16
2.2	Características do tráfego em intersecções.....	17
2.2.1	Pelotões.....	17
2.2.2	Zona de Dilema.....	17
2.3	Elementos do Cálculo de Tempos Semafóricos.....	19
2.3.1	Volume de Tráfego.....	19
2.3.2	Volume de Tráfego Equivalente.....	19
2.3.3	Taxa de Fluxo.....	20
2.3.4	Fluxo de Saturação.....	20
2.3.5	Tempo Perdido de um Ciclo.....	21
2.3.6	Taxa de Ocupação.....	22
2.3.7	Grupo de Movimentos Crítico.....	22
2.3.8	Tempo de Entreverdes.....	22
2.3.9	Capacidade.....	23
2.3.10	Grau de Saturação.....	24
2.3.11	Tempo de Ciclo.....	24

	8
2.3.12 Tempo de verde real e tempo de verde efetivo.....	26
2.3.13 Tempo de verde de segurança.....	26
2.4 Conclusão de Conceitos e Definições.....	27
3 Técnicas de Controle Semafórico.....	28
3.1 Classificações dos Tipos de Controle.....	28
3.1.1 Quanto à atuação.....	28
3.1.2 Quanto à Espacialidade.....	29
3.1.3 Quanto ao Modo de Operação.....	29
3.1.4 Quanto à Lei de controle.....	30
3.2 LHOVRA – Controle sueco moderno.....	31
3.3 Controlador Proposto.....	34
4 Ambiente de desenvolvimento e Caracterização do problema.....	35
4.1 Aimsun.....	35
4.2 Caracterização e modelagem do Problema.....	37
4.3 Fluxos do Modelo.....	40
5 Controladores em simulações.....	42
5.1 Planejamento das Condições de Simulação.....	42
5.2 Projeto do Controlador de Tempo Fixo.....	44
5.2.1 Etapa I.....	44
5.2.2 Etapa II.....	47
5.2.3 Etapa III.....	47
5.3 Projeto Controlador por Extensão de Verde.....	49
5.3.1 Etapa I e Etapa II.....	50
5.3.2 Etapa III.....	50
5.4 Projeto Controlador Proposto.....	53
5.4.1 Definição dos estágios.....	53
5.4.2 Seleção do Estágio Seguinte.....	54
5.4.3 Ação da função L.....	54
5.4.4 Ação da função H.....	57
5.4.5 Ação da função O.....	57
6 resultados das simulações.....	58
6.1 Comparativo na condição nominal.....	58
6.2 Comparativo com fluxo maior.....	59

	9
6.3 Comparativo com fluxo reduzido.....	61
6.4 Comparativo geral.....	63
6.5 Resultados de Simulações Complementares.....	67
6.5.1 Simulações considerando Pedestres.....	67
6.5.2 Resultados dos Efeitos dos Parâmetros do Controlador Proposto.....	70
7 Considerações finais e perspectivas futuras.....	76
REFERÊNCIAS.....	78
Anexo A – Controlador tempo fixo.....	79
Anexo B – Controlador extensão de verde.....	86
Anexo C – Controlador proposto.....	93

1 INTRODUÇÃO

Associado ao crescimento e desenvolvimento das cidades ocorre o aumento do número de veículos. Com o crescimento dos fluxos de tráfego, em particular aqueles decorrentes do uso de automóveis particulares, os problemas de tráfego tendem a se agravar, sobretudo nas intersecções da malha viária. O número de colisões traseiras e emissão de poluentes, com sérios efeitos negativos de curto, médio e longo prazo na qualidade de vida dos cidadãos. Estes problemas podem ser amenizados pela implantação de estratégias de controle semafórico.

O manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica [DENATRAN 2014] apresenta duas técnicas de controle visando reduzir os atrasos nas aproximações de uma intersecção isolada, isto é, que não sofre influência de outras intersecções em sua vizinhança. A primeira é baseada em controle de tempo fixo, que controla em malha aberta sem atuação. A segunda se baseia no controlador por extensão de verde, ou seja, estende o tempo de verde, por exemplo, se um veículo é detectado.

Ainda que difundidas mundialmente, estas técnicas negligenciam alguns dos problemas principais decorrentes da semaforização, como as colisões traseiras e os atrasos provocados a veículos de alta capacidade, em particular o transporte coletivo.

As colisões traseiras ocorrem normalmente na mudança do sinal verde para o amarelo quando dois ou mais veículos se encontram na chamada zona do dilema, uma condição espaço-temporal, em que o condutor do veículo não tem clareza se tem condições de avançar e cruzar a intersecção em segurança. Caso não haja condições de avançar, o condutor deve optar por parar (tipicamente abruptamente).

A semaforização tende a dar tratamento uniforme aos diferentes tipos de veículos. Isso implica que um ônibus com quarenta passageiros está sujeito ao mesmo atraso no semáforo que um automóvel com um único passageiro. Esta incoerência, do atraso por passageiro maior, pode ser em alguma medida resolvida com a priorização do transporte coletivo na intersecção. Porém, a prioridade para transporte público exige cautela para não degradar, dentro do possível, o tráfego em geral [Heydecker 1983]. Uma vez que esta degradação pode ter consequências negativas para o próprio desempenho do transporte público.

A técnica sueca LHOVRA trata destes e de outros problemas em suas seis funções, cujos nomes no idioma sueco formam a sigla LHOVRA [SRA 2002]. Esta técnica visa as regiões rurais da Suécia e portanto se aplicam a interseções isoladas. Por outro lado, algumas de suas funcionalidades são impraticáveis nos cenários urbanos brasileiros.

Este trabalho propõem um controlador com os princípios da técnica LHOVRA, adaptando algumas das funções para em áreas urbanas do Brasil. É feito um comparativo com as técnicas de controle de tempo fixo, controle por extensão de verde e o controlador proposto.

1.1 Motivação

Em cidades de pequeno-médio porte (até 200 mil habitantes), ou em bairros periféricos de cidades maiores, é comum encontrar interseções isoladas com bastante movimento em certos horários do dia, candidatas a serem controladas por semáforos. Entretanto, pela condição de distância de outras interseções, as chegadas de veículos tendem a ser independentes e aleatórias. Isto é, não ocorre a chegada de grupos de veículos (ou “pelotões”) que teriam sido liberados por outra interseção a montante. Neste contexto, o padrão de chegadas é basicamente aleatório, sem componente determinista de intervalos entre veículos isto implica que o ajuste dos tempos de semáforos. Tanto que, após um certo período de operação, é comum observar o desligamento dos semáforos em instalações com características isoladas, como ocorre em Ilhota ou em Jurerê em Florianópolis. Além do desperdício de recursos, a desativação implica a perda de desempenho operacional nos períodos de maior movimento, nos quais o semáforo aumentaria a capacidade da interseção.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como principal objetivo um controle semaforico numa interseção isolada com prioridade para veículos de transporte coletivo sem degradar o tráfego em geral. Para este fim o projeto busca:

- Estudo das técnicas descritas no manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semaforica [DENATRAN 2014] e da técnica LHOVRA;
- Caracterização do tipo de cruzamento a ser atendido;

- Discussão sobre a zona do dilema buscando formas de reduzir colisões;
- Adaptação de três funções do LHOVRA para ambiente urbano;
- Projeto de controladores para o cruzamento caracterizado pelas técnicas estudadas;
- Comparação do desempenho dos controladores por meio de simulações.

1.3 Local de Trabalho

O presente trabalho foi desenvolvido no Departamento de Automação e Sistemas do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Contudo o trabalho teve origem com uma problemática proposta pela empresa Brascontrol¹, interessada numa solução para o problema.

Próximo ao espaço designado para o projeto deste trabalho, estavam outros projetos de mobilidade urbana. Desta forma, a troca de experiências entre os projetos foi natural e permitiu uma rápida adaptação à ferramenta de simulação utilizada. A equipe também apoiou indicando materiais para consulta da área.

1 <http://www.brascontrol.com.br>

2 CONCEITOS E DEFINIÇÕES

Neste capítulo serão apresentados conceitos e definições segundo a nomenclatura presente na resolução de controle semafórico brasileiro [DENATRAN 2014]. Em seguida é feita a classificação das estratégias de controle e por fim, os elementos de programação de controle semafórico.

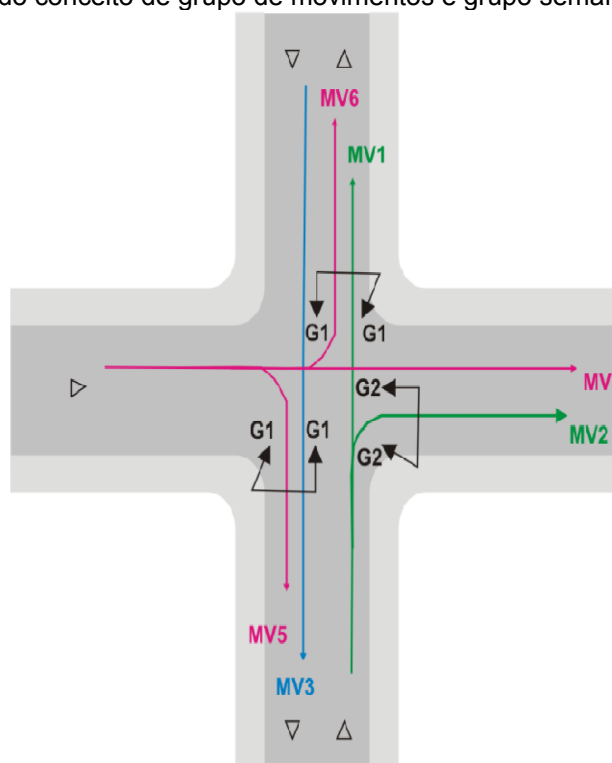
2.1 Elementos Básicos da Programação Semafórica

Na definição do controle semafórico são empregados os termos segundo a nomenclatura brasileira.

2.1.1 Grupo de Movimento

Define o conjunto de veículos que em uma mesma aproximação da intersecção recebem simultaneamente o direito de passagem. A figura 2.1 mostra uma intersecção com seus respectivos grupos de movimento. Nesta intersecção há uma via com sentido único cruzando uma via de mão dupla, não sendo permitida a conversão à esquerda pela aproximação vinda da parte superior da figura, movimento 3 (MV3).

Figura 2.1 – Ilustração do conceito de grupo de movimentos e grupo semafórico



Fonte: [DENATRAN 2014]

Os movimentos possíveis na intersecção da figura 2.1 são representados pelas setas identificadas pela sigla “MV” com o número de identificação. Como não há conflito entre os movimentos MV1 e MV2 eles podem ficar no mesmo grupo, assim como os movimentos MV4, MV5 e MV6. Portanto os grupos de movimento presentes na intersecção são:

- Grupo de movimento 1: Composto pelos movimentos MV1 e MV2;
- Grupo de movimento 2: Composto pelo movimento MV3;
- Grupo de movimento 3: Composto pelos movimentos MV4, MV5 e MV6.

2.1.2 Grupo Semafórico

Grupo semafórico é o conjunto de grupos de movimento que recebem simultaneamente o direito de entrar na intersecção. Na intersecção mostrada na figura 2.1 há três grupos semafóricos sendo representados pela letra “G” e o número de identificação. Os grupos semafóricos da figura são:

- Grupo semafórico 1 (G1): conjunto de semáforos que controla os grupos de movimentos 1 e 2;
- Grupo semafórico 2 (G2): conjunto de semáforos que controla o grupo de movimentos 3.

2.1.3 Estágio

Um estágio é o intervalo de tempo que compreende uma determinada configuração do direito de passagem dos grupos semafóricos, contendo o tempo de verde e o tempo de entreverdes que o segue.

2.1.4 Diagrama de Estágios

O diagrama de estágios é a representação gráfica dos grupos de movimento permitidos ou impedidos em cada estágio do ciclo. Para exemplificar os diagramas,

cruzaram no amarelo possam deixar a região de conflito da intersecção antes dos próximos veículos ganharem o direito de passagem.

2.1.7 Ciclo

O conjunto de todos os estágios em ordem define um ciclo, sendo o tempo total para execução da sequência definida o tempo de ciclo. O tempo de ciclo pode ser obtido pela soma dos tempos de todos os estágios de uma intersecção.

2.1.8 Intervalo Luminoso

Dada uma configuração luminosa da intersecção o intervalo luminoso é o período no qual a configuração permanece inalterada.

2.1.9 Plano Semafórico

O plano semafórico consiste da sequência de estágios desejada e dos tempos associados à permanência em cada intervalo luminoso. Normalmente, existem planos para horários de pico, entrepicos, e horários de baixo fluxo (madrugada, p.ex.).

2.1.10 Diagrama de intervalos luminosos ou diagrama de barras

O diagrama de intervalos luminosos ou diagrama de barras é uma representação dos intervalos luminosos, em sequência, para cada estágio, com suas respectivas durações. A Figura 2.3 ilustra um exemplo de diagrama de intervalos luminosos para um caso semelhante ao da figura 2.2. Pode se notar no diagrama da Figura 2.3 os intervalos de vermelho geral entre os tempos de 34 s e 36 s assim como entre os tempos de 78 s e 80 s e a duração total do ciclo de 80 s.

Figura 2.3 – Exemplo de diagrama de intervalos luminosos

DIAGRAMA DE INTERVALOS LUMINOSOS									
INSTANTE (s)	0		30	34	36		74	78	80
G1	[0, 30] (verde)		[30, 34] (amarelo)	[34, 36] (vermelho)	[36, 80] (vermelho)				
G2	[0, 36] (vermelho)				[36, 74] (verde)		[74, 78] (amarelo)	[78, 80] (vermelho)	
INTERVALOS	1		2	3	4		5	6	
DURAÇÃO (s)	30		4	2	38		4	2	
% CICLO	38		5	2	48		5	2	
ESTÁGIOS	1			2					

Fonte: [DENATRAN 2014]

2.2 Características do tráfego em intersecções

Além dos elementos específicos do controle semafórico apresentados anteriormente, é preciso definir as características do tráfego veicular. Nesta seção, apresentam-se os elementos mais importantes no contexto do tráfego urbano.

2.2.1 Pelotões

Um pelotão é um agrupamento compacto de veículos em circulação. Este fenômeno pode ser observado num semáforo após o período de retenção, mas também é possível em outras situações onde o trânsito de alguma forma seja bloqueado formando um agrupamento de veículos sem parar.

Os pelotões apresentam uma tendência a se dispersarem com o tempo, sendo dificilmente encontrados após uma longa seção de via sem intersecções.

2.2.2 Zona de Dilema

Um veículo transita numa via no momento em que o sinal semafórico para uma via é alterado de sinal verde para sinal amarelo. Se o veículo estiver afastado além de um certo ponto da intersecção ele parará na linha de retenção da intersecção, no entanto, se no momento da mudança o veículo estiver mais próximo

que um segundo ponto da intersecção ele continuará sem parar na linha de retenção. A área entre os dois pontos é denominada de zona de dilema por haver grande discordância no comportamento dos condutores.

Segundo o órgão de administração rodoviária americano, a zona de dilema é definida por:

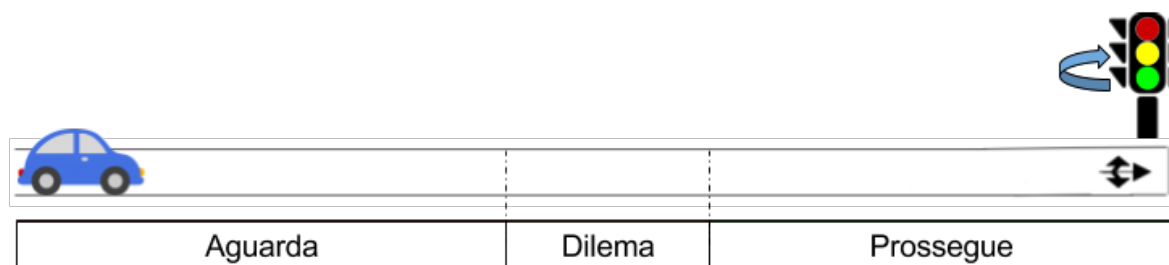
A área na qual é difícil para o condutor decidir se para ou prossegue pela intersecção devido à mudança para sinal amarelo. Também pode ser referenciada como “zona de opção” ou “zona da indecisão [FHWA 2009].”

A zona de dilema ideal seria apenas um ponto da via em que dividiria as ações dos condutores, no entanto, na prática sempre será uma área onde os condutores apresentarão comportamentos diferentes, o que pode levar a acidentes, principalmente colisões traseiras devido aos condutores envolvidos terem assumido ações diferentes em relação ao dilema.

A Figura 2.4 representa a aproximação de um veículo a uma intersecção. No momento que o sinal do verde mudar para amarelo, o veículo poderá estar numa das três zonas possíveis. Se o veículo estiver na zona de aguarda, o veículo aguardará o sinal vermelho. Se o veículo estiver na zona de prossegue ele avançará para a intersecção no sinal amarelo. No entanto, se o veículo estiver na zona de dilema ele estará no dilema do que fazer.

A zona de dilema pode ser ampliada ou reduzida por ações dos controladores semafóricos, como, por exemplo, um semáforo em que há uma contagem regressiva no sinal verde pode provocar uma sensação no condutor de que o amarelo será muito curto, levando a ação de parar. Assim o dilema se propaga para parte do sinal verde e estende a zona de dilema, levando o seu início para mais longe da intersecção.

Figura 2.4 – Veículo se aproximando duma intersecção com zona do dilema



Fonte: Arquivo pessoal.

2.3 Elementos do Cálculo de Tempos Semafóricos

A seguir são apresentados alguns elementos utilizados como parâmetros para projeto de um controlador semafórico.

2.3.1 Volume de Tráfego

O volume de tráfego é o número de veículos ou pedestres que passam por uma determinada seção num período de tempo. Na prática o termo volume de tráfego é utilizado em períodos de uma hora, um dia, um mês ou um ano. O termo fluxo de tráfego é aplicado com o mesmo significado que o volume de tráfego com a contagem de veículos em períodos de tempo menores, como quinze minutos (15 m).

O fluxo varia ao longo do dia e do dia da semana, por isso é recomendável realizar medições repetidas vezes em diferentes horas e dias, acompanhando a variação e permitindo melhor ajuste do controlador.

2.3.2 Volume de Tráfego Equivalente

Como diferentes categorias de veículos apresentam desempenho diferente para a contagem do fluxo de tráfego, buscou-se padronizar com unidades de carros de passeio (ucp) a contagem para o fluxo, buscando valores equivalentes das outras categorias.

Volume de tráfego equivalente é o volume de tráfego ajustado para o fluxo equivalente em unidades de carros de passeio. A Tabela 2.1 apresenta os fatores de equivalência usualmente utilizados segundo o manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica.

Tabela 2.1 – Fator de equivalência para diferentes tipos de veículos

TIPO	FATOR DE EQUIVALÊNCIA
Automóvel	1,00
Moto	0,33
Ônibus	2,00
Caminhão (2 eixos)	2,00
Caminhão (3 eixos)	3,00

Fonte: [DENATRAN 2014]

2.3.3 Taxa de Fluxo

O número de veículos esperado numa dada secção de via em um determinado intervalo de tempo inferior a uma hora é denominado taxa de fluxo. A taxa de fluxo pode ser estimada a partir dos volumes de tráfegos da secção de via.

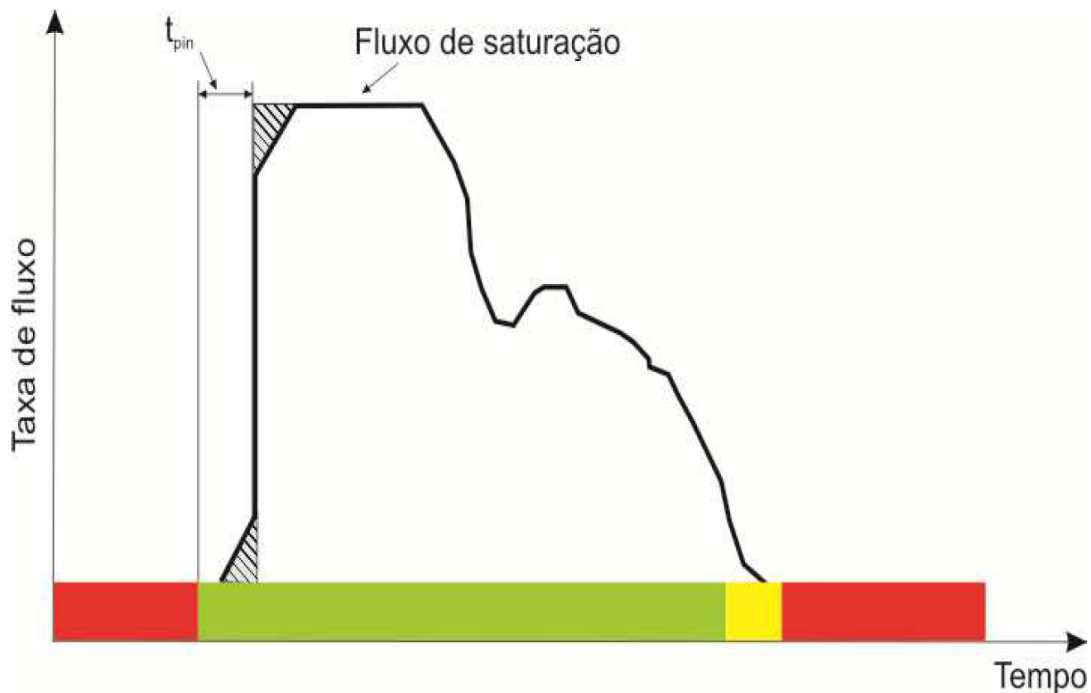
2.3.4 Fluxo de Saturação

O fluxo de saturação de um grupo de movimento é o número máximo de veículos que poderiam passar por uma secção de aproximação de uma intersecção no período de uma hora com direito de passagem contínuo.

O fluxo de saturação pode ser observado no início do descarregamento de filas, logo após a mudança para o sinal verde. Nesta situação os veículos tentam avançar o mais rápido possível, reduzindo o espaçamento entre os veículos. A Figura 2.5 apresenta um gráfico do fluxo em função do tempo na mudança para o sinal verde. Nota-se nesta figura os tempos perdidos inicial e final e que o fluxo satura no valor do fluxo de saturação.

O elemento fluxo de saturação tem grande importância no projeto de controladores semafóricos. Com o fluxo de saturação pode-se definir o tempo necessário de verde para atender ao fluxo de cada aproximação.

Figura 2.5 – Variação do fluxo ao longo do tempo de verde com fluxo saturando



Fonte: [DENATRAN 2014]

2.3.5 Tempo Perdido de um Ciclo

Tempo perdido de um ciclo, ou tempo perdido total, é a soma de todos os intervalos de tempo em que os veículos são impedidos de entrar na intersecção.

Algumas das causas do tempo perdido são: o não aproveitamento total do verde, o tempo do primeiro veículo na fila acelerar e passar pela linha de retenção; tempo de vermelho geral; estágio exclusivo para pedestres. Para calcular o tempo perdido total, usa-se a expressão:

$$T_P = t_{EP} + \sum_{i=1}^n (t_{Pini} + t_{Pfini}) \quad (2.1)$$

Em que,

T_P - Tempo perdido total em segundos;

t_{EP} - Tempo de estágio exclusivo para pedestres;

n - Número de estágios;

t_{Pini} - Tempo perdido no início do estágio i em segundos

t_{Pfini} - Tempo perdido no final do estágio i em segundos

2.3.6 Taxa de Ocupação

Taxa de ocupação é representada pelo símbolo y definida como a razão entre a taxa de fluxo e o fluxo de saturação para um grupo de movimento. Portanto pode ser calculada como:

$$y = \frac{F}{FS} \quad (2.2)$$

Em que,

y - Taxa de ocupação;

F - Taxa de fluxo do grupo de movimento, em veículos por hora, ou ucp por hora;

FS - Fluxo de saturação do grupo de movimento, em veículos por hora, ou ucp por hora;

2.3.7 Grupo de Movimentos Crítico

O grupo de movimento crítico de um estágio é aquele que apresenta a maior taxa de ocupação entre os grupos de movimento, que recebem o direito de passagem naquele estágio.

2.3.8 Tempo de Entreverdes

O intervalo de tempo entre o fim do tempo de verde de um estágio e o início do tempo de verde do estágio seguinte é denominado entreverdes.

Para o caso de grupos focais veiculares, o entreverdes é composto pelo tempo de amarelo somado com o tempo de vermelho geral. Para o caso de grupos focais de pedestres, o entreverdes é composto pelo tempo de vermelho intermitente somado com o tempo de vermelho geral.

O tempo de entreverdes para grupos semaforicos veiculares pode ser calculado por:

$$t_{ent} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm i g)} + \frac{d_2 + c}{v} \quad (2.3)$$

Em que,

t_{ent} - Tempo de entreverdes para o grupo focal de veículos, em segundos;

t_{pr} - Tempo de percepção e reação dos condutores, em segundos;

v - Velocidade dos veículos, em m/s ;

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

i - inclinação da via na aproximação, sendo positivo em rampas ascendentes e negativo em rampas descendentes (m/m);

g - Aceleração da gravidade, em m/s^2 ;

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

c - comprimento do veículo, em metros.

O tempo de amarelo, parcela do tempo de entreverdes, deve corresponder a soma das duas primeiras parcelas da equação 2.3. Portanto:

$$t_{am} = t_{pr} + \frac{v}{2(a_{ad} \pm i g)} \quad (2.4)$$

Em que,

t_{am} - Tempo de amarelo.

A terceira parcela da equação 2.3 corresponde ao tempo de vermelho geral.

Logo:

$$t_{vg} = \frac{d_2 + c}{v} \quad (2.5)$$

Em que,

t_{vg} - Tempo de vermelho geral.

2.3.9 Capacidade

A capacidade de um grupo de movimento é definida como o número máximo de veículos que podem passar em uma aproximação controlada por semáforos no período de uma hora. A capacidade é calculada segundo a equação 2.6.

$$Cap = FS \times \frac{t_{v,efet}}{t_c} \quad (2.6)$$

Em que,

Cap - Capacidade, em veículos por hora ou ucps por hora;

FS - Fluxo de saturação, em veículos por hora ou ucp/h;

$t_{v,efet}$ - Tempo de verde efetivo, em segundos;

t_c - Tempo de ciclo, em segundos.

O tempo de verde efetivo refere-se ao tempo de verde que de fato há veículos passando pela linha de retenção. Este elemento será melhor detalhado na Seção 2.3.12

2.3.10 Grau de Saturação

O grau de saturação é uma grandeza que indica o quão saturado está um grupo de movimento. Um grau de saturação baixo indica que o grupo de movimento possui capacidade de atender um fluxo maior, se necessário. Assim como um valor alto indica que o grupo de movimento está próximo da saturação.

A definição do grau de saturação é a razão entre a taxa de fluxo com a capacidade de atender este fluxo durante uma hora, representada na equação 2.7:

$$x = \frac{F}{Cap} \quad (2.7)$$

Em que,

x - Grau de saturação;

F - Taxa de fluxo do grupo de movimento, em veículos por hora, ou ucp por hora;

Cap - capacidade, em veículos por hora, ou ucp por hora.

2.3.11 Tempo de Ciclo

A sequência completa de estágios é denominada de ciclo. Logo, tempo de ciclo é o tempo de execução de cada sequência completa de estágios.

Tempos de ciclo muito elevados provocam muita espera para os condutores. Por isso, em situações normais de trânsito, o tempo de ciclo não deve ser maior que cento e vinte segundos (120 s).

No manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica são apresentados dois métodos para calcular o tempo de ciclo: Método do grau de saturação máximo e Método de Webster.

Método do grau de saturação máximo

Este método se baseia no grau máximo de saturação definido pelo projetista para o grupo de movimento.

O método primeiramente calcula a fração de verde requisitada por estágio para atender ao grau máximo de saturação definido pelo projetista. O cálculo da fração de verde é dado por:

$$p_i = \frac{y_i}{xm_i} \quad (2.8)$$

Em que,

p_i - Fração de verde necessária ao estágio i ;

y_i - Taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i ;

xm_i - Grau de saturação máximo definido para o grupo de movimentos crítico do estágio i .

Com as frações de verde de cada estágio é possível calcular o tempo de ciclo com a equação 2.9:

$$t_c = \frac{T_p}{1 - \sum_{i=1}^n p_i} \quad (2.9)$$

Em que,

t_c - Tempo de ciclo, em segundos;

T_p - Tempo perdido total, em segundos;

n - Número de estágios.

Método de Webster

Segundo o trabalho de Webster, este método calcula o tempo de ciclo ótimo, de forma com que o tempo de espera dos veículos seja mínimo. Este método assume aproximações de veículos à intersecções aleatórias.

O tempo de ciclo é calculado por:

$$t_{co} = \frac{1,5 \times T_p + 5}{1 - \sum_{i=1}^n y_i} \quad (2.10)$$

Em que,

t_{co} - Tempo de ciclo ótimo, em segundos;

2.3.12 Tempo de verde real e tempo de verde efetivo

O tempo em que o sinal verde é mostrado é o tempo de verde real. No entanto, nem todo este tempo é aproveitado pelos veículos em razão dos atrasos envolvendo a percepção dos condutores, dinâmicas de aceleração ou paradas ao final do estágio.

O tempo de verde efetivo de um estágio é definido como o tempo de verde em que de fato seria utilizado pelo fluxo do grupo de movimento crítico numa situação de saturação.

O cálculo do tempo de verde efetivo depende do método utilizado no cálculo do tempo de ciclo. Caso tenha sido o método do grau de saturação máximo usa-se a equação 2.11.

$$t_{v,ef,i} = p_i \times t_c \quad (2.11)$$

Caso do tempo de ciclo calculado pelo método de Webster se utiliza a equação 2.12:

$$t_{v,ef,i} = (t_c - T_p) \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \quad (2.12)$$

Em que,

$t_{v,ef,i}$ - Tempo de verde efetivo para o estágio i , em segundos;

t_c - Tempo de ciclo calculado, em segundos;

p_i - Fração do tempo de verde requerida para o estágio i ;

T_p - Tempo perdido total, em segundos;

y_i - taxa de ocupação do grupo de movimentos crítico do estágio i ;

n - Número de estágios.

2.3.13 Tempo de verde de segurança

Tempos de verde excessivamente curtos podem gerar situações de risco através da frustração dos condutores. Outro ponto é quando há pedestres se movendo paralelamente aos grupos de movimento, o tempo de verde deve permitir a travessia do pedestre, evitando conflitos de pedestres com outros grupos de movimento. Por estas razões, há o parâmetro tempo de verde de segurança.

O tempo de verde de segurança define o valor mínimo que o tempo de verde pode assumir. Assim $t_v \geq t_{v,seg}$ em que, t_v é tempo de verde e $t_{v,seg}$ é tempo de verde de segurança.

2.4 Conclusão de Conceitos e Definições

Os conceitos apresentados são importantes para o cálculo dos tempos semafóricos da técnica de “tempo fixo”, isto é, aquela que opera sem a medição dos fluxos vigentes nas aproximações da interseção. Sendo a técnica mais usada na prática, torna-se uma referência de fato contra a qual são comparadas as demais técnicas de controle apresentadas neste trabalho.

Algumas técnicas de controle podem utilizar outros elementos específicos, como tempo de verde mínimo, extensão de verde e tempo de verde máximo. Estes elementos estão associados a detecção de fluxos, funcionalidades não presentes num controlador de malha aberta. O capítulo 3 Técnicas de Controle Semafórico apresentará com mais detalhes as técnicas estudadas neste trabalho.

3 TÉCNICAS DE CONTROLE SEMAFÓRICO

Neste capítulo são apresentadas as classificações que um controlador pode ter e algumas técnicas de controle.

3.1 Classificações dos Tipos de Controle

Os controladores semafóricos podem ser classificados quanto à atuação, à espacialidade, ao modo de operação e à lei de controle empregada.

3.1.1 Quanto à atuação

Há dois tipos de controladores, os sem atuação e os atuados. Os controladores atuados podem ser subdivididos em semiatuados e totalmente atuados.

Sem Atuação

Os controladores sem atuação apresentam um comportamento com tempos fixos com base em planos semafóricos. Por isso os controladores sem atuação são chamados controladores de tempo fixo.

Um controlador de tempo fixo pode utilizar diversos planos semafóricos. Desta forma, é possível ajustar o controlador para atender variações previstas nos fluxos. Por exemplo, um cruzamento sofre grande fluxo de uma de suas aproximações de manhã cedo, devido a população se dirigir ao local de trabalho, mas no período da tarde há um fluxo muito reduzido no mesmo cruzamento. Neste caso, pode se fazer um plano semafórico para ser executado durante a manhã e um outro plano semafórico para ser executado durante a tarde.

Semiatuado

O controlador semiatuado possui detectores em ao menos uma aproximação, mas não em todas.

Estes controladores são empregados quando se tem muita diferença nos fluxos entre as aproximações. Assim, pode se definir a técnica de atuação a fim de priorizar a aproximação de maior fluxo.

Totalmente Atuado

O controlador totalmente atuado utiliza detectores em todas as aproximações. Desta forma o controlador tem capacidade de monitorar os fluxos e alterar os tempos de verde conforme a demanda.

3.1.2 Quanto à Espacialidade

As estratégias de controle definem como será o controle de uma intersecção em relação às outras intersecções nas proximidades, podendo ser controle isolado ou controle em rede.

Controle Isolado

As intersecções são controladas independentemente das demais. Cada controlador considera apenas a demanda observada em suas respectivas aproximações.

Esta estratégia pode comprometer a circulação de tráfego em regiões com intersecções muito próximas entre si.

Controle em Rede

Os controladores são projetados para cooperar entre si como uma rede. A rede pode ser aberta visando melhorar a circulação de tráfego numa via específica, comumente referido controle corredor. Por outro lado a rede pode ser fechada com os controladores atuando para atender a uma região em geral, denominado controle em área.

Nesta estratégia deve se considerar a formação e o comportamento de pelotões.

3.1.3 Quanto ao Modo de Operação

Os controladores podem ser conectados de forma centralizada ou descentralizada.

Controle local

Também conhecido como modo descentralizado, no modo controle local a programação semafórica é feita diretamente no controlador, em campo.

Controle centralizado

Neste modo os controladores são conectados a um sistema central responsável por gerenciar a operação conjunta dos controladores.

3.1.4 Quanto à Lei de controle

Cada intersecção pode ser controlada por métodos diferentes. Os métodos mais comuns de controle semafórico no Brasil são tempo fixo, extensão de verde e brecha máxima.

Malha Aberta

O controlador de malha aberta não possui atuação, apresentando os tempos pré-definidos conforme o projeto, por isso também são chamados de controladores de tempo fixo. Como não possuem atuação, logo não dependem de detectores para seus corretos funcionamentos, podendo serem utilizados como um método de redundância em caso de falha nos detectores.

O controlador executa ciclicamente um plano semafórico pelo período de funcionamento do plano. Pode se planejar diferentes planos para diferentes horários de diferentes dias e, assim, melhor atender as variações previstas no projeto do controlador. No entanto, este controlador é suscetível a variações aleatórias no fluxo de tráfego, como o aumento de fluxo em função de condições climáticas.

Extensão de verde para passagem

Dependendo de como este controlador for projetado ele pode ser semiatuado ou totalmente atuado.

A ação do controlador consiste em aumentar o tempo de verde em execução para que veículos que passaram pelo detector da aproximação possam entrar na intersecção. Assim o controlador consegue descarregar filas e reduzir o efeito de chegadas aleatórias.

Desta forma são necessários três outros elementos de programação:

- Verde mínimo: Tempo mínimo de verde admissível para a via;
- Extensão de verde: O quanto de tempo de verde será acrescentado;

- Verde máximo: Valor limite que o tempo de verde pode assumir para evitar um verde permanente.

Brecha Máxima

O controlador de brecha máxima pode ser usado tanto como sendo semiatuado quanto totalmente atuado.

Este controlador trabalha com o intervalo entre os veículos na aproximação. O controlador mantém o sinal verde enquanto o intervalo entre os veículos não superar o valor definido em projeto. Portanto utiliza parâmetros semelhantes aos do controlador de extensão de verde pra passagem, com exceção da extensão de verde que para o controlador de brecha máxima é utilizado como o intervalo máximo entre veículos.

MOVA – Controle Britânico Moderno

A sigla “MOVA” refere-se a “Microprocessor Optimised Vehicle Actuation”. Esta técnica foi desenvolvida pelo Transport and Road Research Laboratory (TRRL) entre os anos de 1982 e 1988 [TFK 1993].

A técnica do MOVA exige um controlador totalmente atuado e suas leis de controle se baseiam em estágios. Isto se deve pelos microprocessadores disponíveis na época, os quais eram caros e com pouca capacidade de memória e processamento em relação aos atuais.

LHOVRA

A técnica do LHOVRA exige um controlador totalmente atuado. Este controlador se baseia nos grupos de movimento, sem apresentar uma sequência pré-definida de estágios, conforme afirmado por Kronborg em seu trabalho comparando com a técnica MOVA [TFK 1993].

Serão apresentados maiores detalhes desta técnica no item 3.2 LHOVRA – Controle sueco moderno.

3.2 LHOVRA – Controle sueco moderno

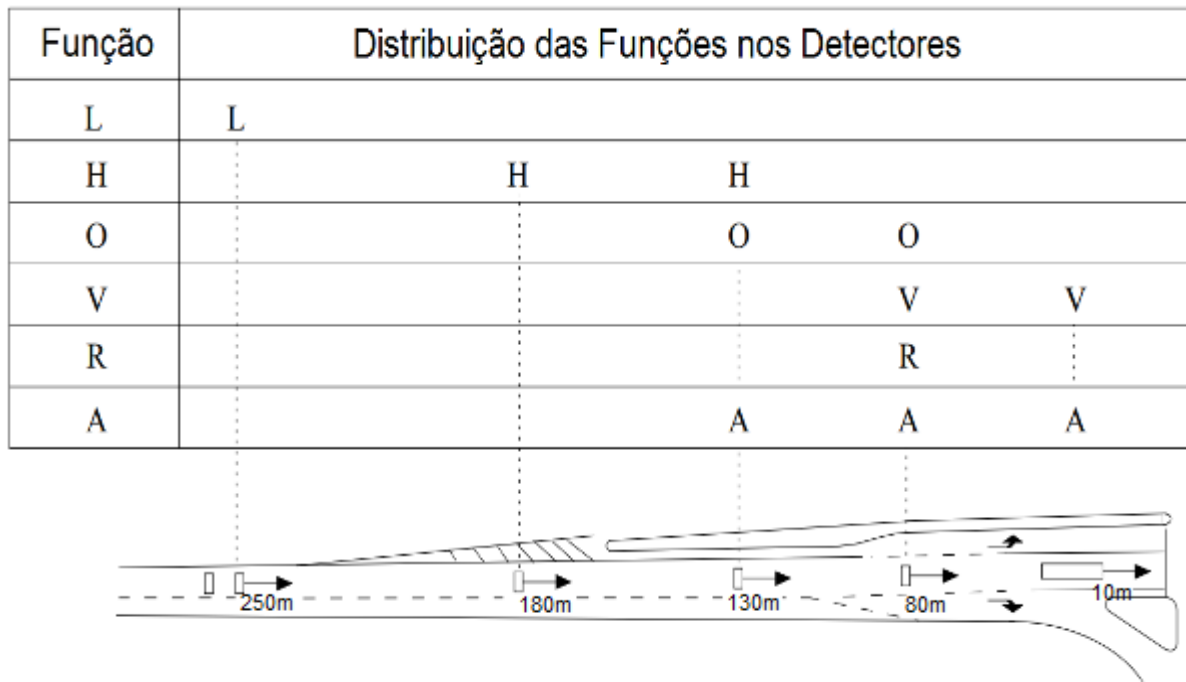
O projeto sueco LHOVRA, iniciado em 1979 [TFK 1993], apresenta um conjunto modular de ferramentas para controladores semafóricos. As

funcionalidades do algoritmo de tomada de decisão são de seis tipos, cujas iniciais formam, no idioma sueco, a sigla LHOVRA.

A função L apresenta métodos para definir prioridade a uma categoria de veículos específica, enquanto a função H determina a preferência semafórica à via principal. A função O tem a finalidade de reduzir colisões traseiras em veículos presentes na zona de dilema. Com a finalidade de reduzir o tempo perdido total nos entreverdes, a função V reduz o tempo de amarelo. A função R trata veículos com alta probabilidade de avançar no sinal vermelho. Por fim a função A permite a um grupo semafórico reassumir o sinal verde logo após o sinal amarelo.

Para poder realizar as funções do LHOVRA é necessário um conjunto de sensores em cada pista de aproximação. Cada sensor fica responsável por uma ou mais operações de cada função do LHOVRA. Desta forma, os controladores LHOVRA devem ser totalmente atuados e baseados nos grupos semafóricos sem sequência de estágios pré-definida. A Figura 3.1 mostra a disposição dos sensores recomendada pelo manual sueco de controle semafórico para uma via de 70 Km/h assim como as funções atribuídas a cada sensor.

Figura 3.1 – Distribuição das funções do LHOVRA para uma via de 70 Km/h.



Fonte: Modificada do manual sueco de design de estrada.

As seis funções da técnica LHOVRA são apresentadas na sequência:

Função L

Esta função dá prioridade a veículos pesados, ônibus e caminhões.

Para este fim ela utiliza um par de detectores, que estão a 8 m de distância entre si e o mais próximo da intersecção para uma via de 70 km/h está a 250 m da intersecção fazendo uso das premissas [SRA 2002]:

- O tempo de viagem do primeiro ao segundo sensor deve corresponder a uma velocidade acima de 60 km/h.
- Os dois detectores são acionados simultaneamente.

Função H

O propósito desta função é melhorar o acesso das vias principais à intersecção.

A atuação desta função é pela extensão do tempo de verde para chegadas tardias à intersecção.

Função O

Com a finalidade de reduzir o número de colisões traseiras, a função O busca minimizar o número de veículos na zona de dilema na transição do sinal verde para o sinal amarelo.

A atuação desta função se dá pela adição de um tempo de verde suficiente para o veículo atravessar a zona de dilema.

Função V

Esta função divide o tempo de amarelo em duas parcelas, uma fixa e uma variável. Ao detectar veículos se aproximando da intersecção durante o tempo de amarelo, o controlador adiciona a parcela variável, respeitando o valor máximo, para que os veículos possam passar.

Função R

A função R tem como finalidade a redução de acidentes por avanços no sinal vermelho. Esta função atua no tempo de vermelho geral dividindo-o em duas parcelas, uma fixa e outra variável. A parcela variável será utilizada para elevar o tempo de vermelho geral quando detectar um veículo avançando ao sinal vermelho.

Função A

A função A tem como finalidade reduzir o tempo perdido em situações em que um determinado grupo de movimento está perdendo o direito de passagem, mas o mesmo grupo foi selecionado para a sequência. Assim, a função A retira o tempo de vermelho da sequência fazendo com que o sinal volte ao verde após o amarelo.

3.3 Controlador Proposto

Este trabalho propõem um controlador semaforico com os princípios da técnica LHOVRA. Como o LHOVRA, este controlador é baseado nos grupos de movimento com um algoritmo para selecionar a sequência de sinais semaforicos com uma adaptação do LHOVRA para ambientes urbanos brasileiros.

O LHOVRA é focado em regiões rurais com baixo fluxo, sendo algumas de suas funções inviáveis para ambientes urbanos. Por exemplo, a função V altera o tempo de amarelo, que seria impraticável em malhas viárias urbanas com várias interseções semaforizadas pois haveria perda de consistência das indicações semaforicas.

O controlador proposto utiliza as funções L, H e O adaptadas do LHOVRA. A função L será para dar prioridade aos veículos de transporte público de acordo com o algoritmo de seleção dos sinais semaforicos, este algoritmo será melhor detalhado na Seção 5.4.2. A função H será adaptada para um ambiente urbano com base num controlador de extensão de verde por passagem. A função O será adaptada para a intersecção que será estudada no capítulo 4.

4 AMBIENTE DE DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Neste capítulo será detalhado o problema do trabalho após a apresentação da ferramenta utilizada. Assim, pontos do modelo relevantes para as simulações poderão ser melhor entendidos.

4.1 Aimsun

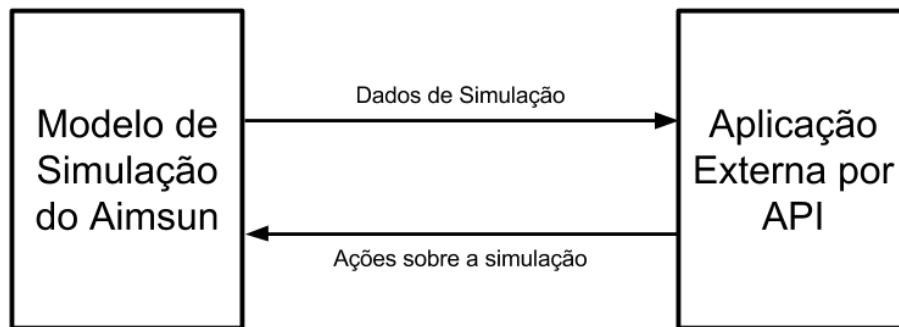
Aimsun é uma ferramenta de modelagem de tráfego comercial desenvolvida e distribuída pela TSS-Transport Simulation Systems. Aimsun se destaca pela velocidade de simulação e agrupa modelagem de demanda de tráfego, designações estáticas e dinâmicas de tráfego em simulações mesoscópicas, microscópicas e híbridas.

O Aimsun representa cada elemento da malha viária como um objeto, sendo os veículos representados individualmente. Com isso a ferramenta consegue armazenar estatísticas da simulação em cada objeto para a avaliação de desempenho.

A simulação do Aimsun é orientada a tempo discreto e pode se atribuir aplicações externas para a simulação. Essas aplicações externas são feitas por meio de interface para programa de aplicação (API, ou "application program interface" em inglês). A Figura 4.1 representa a interface entre a simulação e a aplicação externa.

Com os dados da simulação é possível enviar entradas de detectores presentes no modelo. Desta forma é possível implementar os controladores estudados por "API". O código recebe da simulação as marcações de tempo e entradas dos detectores e responde com ações sobre os sinais luminosos.

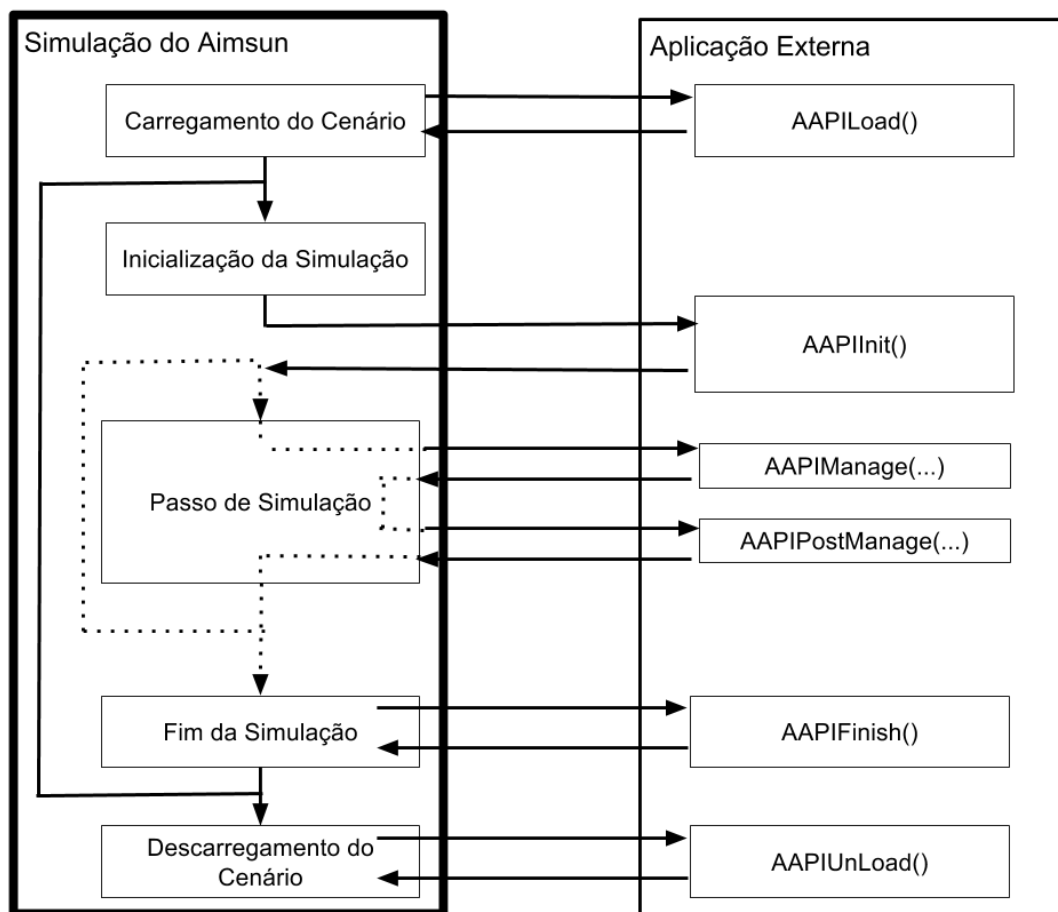
Figura 4.1 – Interface de dados entre simulação e aplicações dos controladores



Fonte: Modificado do Manual de API do Aimsun [TSS 2015].

O Aimsun executa a aplicação através de chamadas de funções próprias num código com linguagem Python ou C++. As diferentes funções são executadas em diferentes momentos da simulação. A Figura 4.2 ilustra as chamadas das funções e seus respectivos momentos.

Figura 4.2 – Chamadas das Funções das “API”s



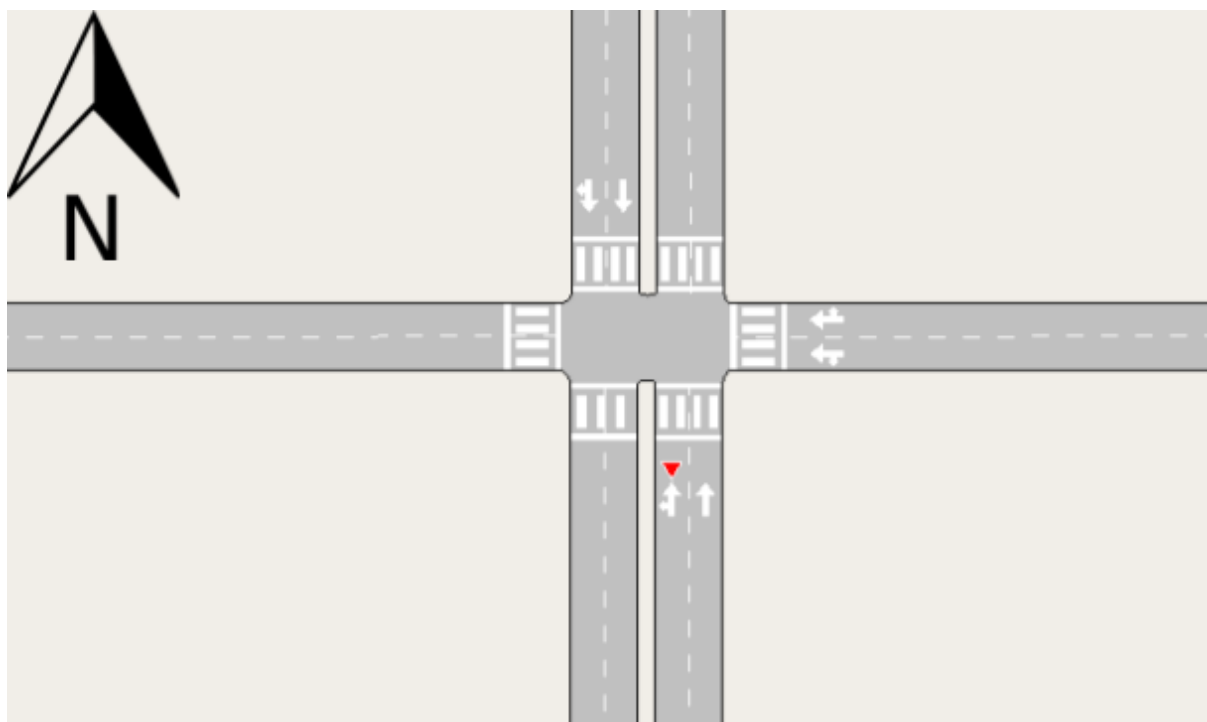
Fonte: Modificado do Manual de API do Aimsun [TSS 2015].

4.2 Caracterização e modelagem do Problema

Neste trabalho foi elaborado um modelo feito na ferramenta Aimsun com base numa intersecção comum. Primeiramente é feita uma descrição da intersecção e depois observações para o modelo.

A intersecção a ser controlada é entre uma via principal com uma via secundária. A via principal é de mão dupla com duas faixas onde a velocidade máxima é de setenta quilômetros por hora. A via secundária tem sentido único e duas faixas com velocidade máxima de cinquenta quilômetros por hora. Pela via principal no sentido norte é permitido a conversão à esquerda. Essa intersecção é ilustrada na Figura 4.3.

Figura 4.3 – Intersecção a ser controlada



Fonte: Arquivo pessoal.

Considera-se que a intersecção fica distante o bastante de outras intersecções, de modo que os pelotões já se diluíram no tráfego; assim, a aproximação de veículos pode ser considerada aleatória. O tráfego de veículos que passam pela intersecção é relativamente leve, implicando num fluxo de veículos pequeno para as vias.

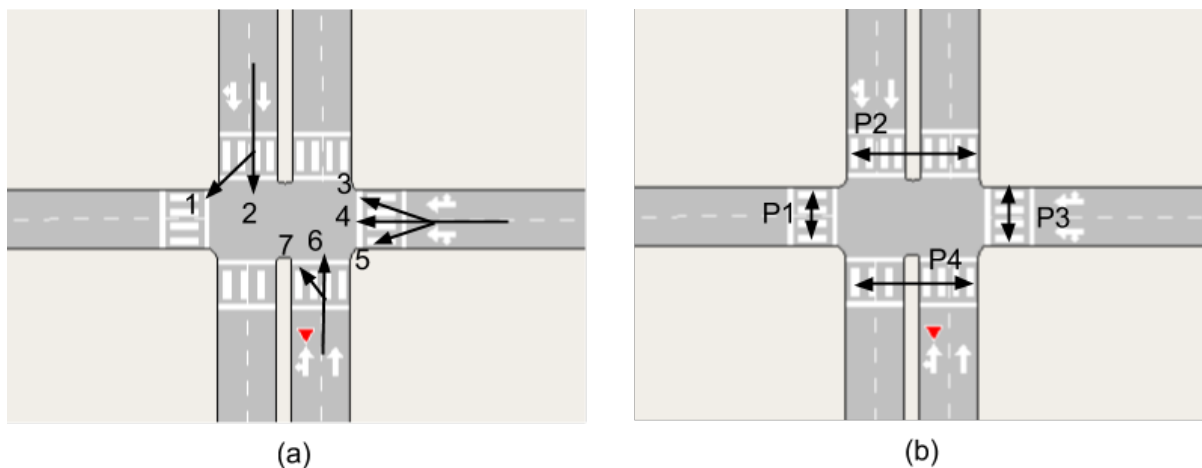
Há três linhas de transporte coletivo que atravessam a intersecção. Sendo uma com origem no sul e destino oeste, outra com origem no leste e destino no norte e a terceira com origem no norte seguindo para o sul.

Os controladores devem apresentar algumas características limites para segurança dos condutores. O tempo de ciclo máximo para a intersecção é de cento e vinte segundos, com tempo de amarelo menor ou igual a cinco segundos [DENATRAN 2014]; os tempos de verde de segurança adotados para a via principal e para a via secundária são de doze segundos.

A intersecção a ser controlada apresenta sete grupos de movimentos para veículos e quatro grupos de movimentos para pedestres. Os grupos de movimento

são ilustrados na Figura 4.4, em que (a) mostra os grupos de movimentos veiculares enquanto em (b) os grupos de movimentos de pedestres.

Figura 4.4 – Grupos de Movimentos da Intersecção a ser controlada



Fonte: Arquivo pessoal.

Nos grupos de movimentos identificados há conflitos entre eles, isto é, a trajetória de um intercepta a trajetória de outro, podendo gerar acidentes. A Tabela 4.1 apresenta os conflitos facilitando no projeto dos controladores a definição dos grupos semaforicos sem que haja conflito entre eles.

Tabela 4.1 – Grupos de movimentos conflitantes

	1	2	3	4	5	6	7	P1	P2	P3	P4
1				X			X	X	X		
2				X	X		X		X		X
3						X			X	X	
4	X	X				X	X	X		X	
5		X				X	X			X	X
6			X	X	X				X		X
7	X	X		X	X			X			X
P1	X			X			X				
P2	X	X	X			X					
P3			X	X	X						

P4		X			X	X	X				
----	--	---	--	--	---	---	---	--	--	--	--

4.3 Fluxos do Modelo

Os fluxos de tráfego no modelo dependem do número de veículos alocados a cada centroide do modelo. Centroides são objetos de modelagem da ferramenta Aimsun que funcionam tanto como origem quanto como terminação de seções de via, podendo realocar os veículos que chegam ao fim da seção para o começo de outra seção.

No modelo foram utilizados três centroides sendo um retirando veículos da seção sul no sentido sul da via principal e fornecendo para a seção sul no sentido norte da via principal. O segundo centroide retira os veículos da seção norte no sentido norte da via principal e fornece veículos para a seção norte no sentido sul da via principal. O terceiro centroide retira os veículos da seção oeste da via secundária e fornece veículos para a seção leste da via secundária. Os valores nominais associados aos centroides estão representados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Distribuição dos veículos nas aproximações

Destino	Sul	Oeste	Norte	Total
Origem	(veículos/hora)	(veículos/hora)	(veículos/hora)	(veículos/hora)
Norte	-	200	400	600
Leste	200	-	250	450
Sul	400	200	-	600
Total	600	400	650	1650

A partir de simulações com estes valores associados aos centroides, foi possível simular e medir o fluxo de saturação pelo método descrito no manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica [DENATRAN 2014]. Também foi possível medir os fluxos de veículos resultantes em cada aproximação. O método para se obter o fluxo de saturação calcula uma média do tempo que o n-ésimo veículo demora a passar pela linha de retenção. Com esta média se calcula quantos veículos poderiam passar pela aproximação no período de uma hora (1 hora) considerando sinal verde contínuo para a aproximação.

Os valores obtidos do fluxo de saturação e os valores de fluxo medidos pela ferramenta de Aimsun são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Fluxos nominais e fluxos de saturação

Aproximação:	Fluxo (veículos/hora)	Fluxo de Saturação (veículos/hora)
Norte	581	4349
Leste	437	3659
Sul	593	3830

5 CONTROLADORES EM SIMULAÇÕES

Neste capítulo são apresentados os métodos utilizados em ambiente simulado para controle do modelo de intersecção descrito anteriormente. Primeiro é feito um planejamento geral das simulações, definindo índices e condições para comparações entre os métodos de controle estudados. Em seguida são elaborados os projetos dos métodos de controle.

5.1 Planejamento das Condições de Simulação

Para este trabalho foi escolhido o ambiente de simulação de tráfego comercial Aimsun 8.1, pois ele permite com facilidade incorporar novos códigos para criar e testar novos controladores. Outra facilidade desta ferramenta é na aquisição de dados feitas com confiabilidade e simplicidade.

Tendo a facilidade da ferramenta neste trabalho foi planejado o uso de simulação para comparar três técnicas de controladores semafóricos. O primeiro controlador a ser projetado e testado é o controlador de tempo fixo. O segundo controlador que se planeja testar é o controlador atuado por extensão de verde. Estes dois foram escolhidos por estarem descritos no manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica como os dois mais utilizados em intersecções isoladas no país.

O terceiro controlador a ser implementado é baseado na técnica sueca LHOVRA. Apresentando uma abordagem diferente para a sequência de estágios e funções que podem melhorar a segurança no trânsito.

Pelas características dos controladores propostos é difícil definir condições justas de comparação com estágio exclusivo de pedestres. Por esta razão, para fins comparativos, não serão considerados os pedestres nas simulações.

Foi simulado o período de uma hora.

Para comparar as técnicas de controle, foram definidos os seguintes índices de desempenho:

Tempo de atraso (s/km): Média dos tempos em que os veículos demoram a mais para atravessar a intersecção em relação a um fluxo contínuo para a via. A medição deste índice é feita automática pela ferramenta de simulação.

Fila máxima (unidades de veículos): Média das maiores filas de veículos registradas em cada ciclo. A medição deste índice é feita automática pela ferramenta de simulação.

Tempo de Viagem (s/km): Média dos tempos necessários para os veículos percorrerem um comprimento de via. A medição deste índice é feita automática pela ferramenta de simulação.

Velocidade Média Espacial (km/h): Média das velocidades para os veículos percorrerem um comprimento de via. A medição deste índice é feita automática pela ferramenta de simulação.

Tempo médio de verde (s): Média dos tempos em que teve sinal verde na simulação. A medição deste índice é feita por código próprio coletando os tempos de verde e calculando a média ao final da simulação.

Número de veículos na zona de dilema (unidades de veículos): Média do número de veículos identificados na zona de dilema. A medição deste índice é feita por código próprio monitorando a entrada da zona de dilema.

Neste trabalho se deseja a preferência a veículos de transporte coletivo, portanto também serão observados nas simulações os índices: tempo de atraso, tempo de viagem e velocidade média espacial para veículos de categoria ônibus.

Serão realizadas três simulações para cada controlador para uma demanda de veículos nominal. Outras três simulações com os mesmos controladores para uma demanda de veículos vinte por cento (20%) superior. Por fim, serão realizadas três simulações com os mesmos controladores para uma demanda de veículos vinte por cento (20%) menor em relação a demanda nominal. Assim será possível avaliar o desempenho dos controladores considerando variações em relação a situação para a qual foram projetados com menor influência da aleatoriedade de eventos.

Com a finalidade de reforçar alguns pontos observados no desenvolvimento do trabalho foram planejadas algumas simulações complementares. Sendo três simulações para o fluxo nominal dos controladores considerando pedestres e medindo o tempo entre os estágios de pedestres. Como há pedestres, o controlador de tempo fixo deve ser recalculado. Outras seis simulações com fluxo nominal para cada parâmetro do controlador proposto para avaliar o efeito do parâmetro em valores extremos, ou seja, três simulações para um valor do parâmetro muito baixo e outras três para um valor muito elevado.

5.2 Projeto do Controlador de Tempo Fixo

Este controlador apresenta tempos de ciclo e estágios fixos. Não utiliza nenhum detector. O manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica do DENATRAN determina quatro etapas para programação deste tipo de controlador:

Etapa I - Definição das condições em que a programação irá operar. No caso de reprogramação de sinalização semafórica existente, muitas vezes essa etapa não é realizada, pois são adotadas as condições preexistentes.

Etapa II - Determinação das características operacionais do tráfego.

Etapa III - Cálculo da programação semafórica.

Etapa IV - Implementação da programação e avaliação dos resultados. Esta é uma etapa que deve ser cumprida sempre, mesmo que seja através da simples avaliação visual caso não existam recursos para efetivar uma avaliação mais elaborada.

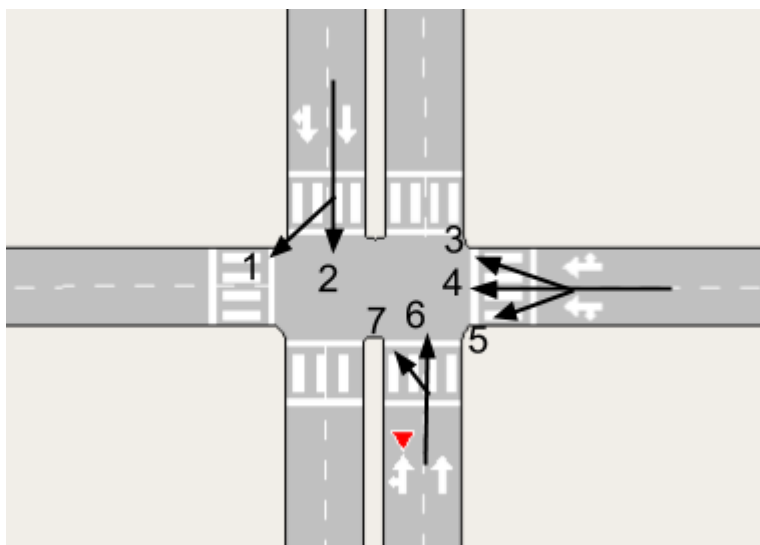
[DENATRAN 2014]

5.2.1 Etapa I

Nesta etapa são identificados os grupos de movimento e definidos os estágios do controlador. Para cada estágio é calculado o tempo de entreverdes respeitando os aspectos de segurança para o tempo de amarelo e para o tempo de vermelho geral.

Conforme mencionado anteriormente, para fins comparativos justos, os grupos de movimentos de pedestres serão desconsiderados. Portanto os controladores serão projetados apenas para atender aos sete grupos de movimento veiculares representados na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Grupos de Movimentos veiculares da Intersecção a ser controlada



Fonte: Arquivo pessoal

Os grupos de movimentos serão divididos em grupos semafóricos de modo a não haver conflitos dentro do mesmo grupo semafórico. Assim são obtidos três grupos semafóricos sendo:

- Grupo semafórico I: composto pelos grupos de movimentos 1 e 2;
- Grupo semafórico II: composto pelos grupos de movimentos 3, 4 e 5;
- Grupo semafórico III: composto pelos grupos de movimentos 6 e 7;

Por medida de segurança se optou por não atender aos grupos semafóricos I e III simultaneamente. Não há recuos na via principal, sendo esta uma via de velocidades altas, setenta quilômetros por hora e há fluxo de tráfego relativamente alto. Assim o controlador de tempo fixo será composto de três estágios. A sequência é definida iniciando pelo estágio 1 atendendo ao grupo semafórico I, em seguida o estágio 2 atendendo ao grupo semafórico II e em terceiro o estágio 3 atendendo ao grupo semafórico III.

Para cada estágio será calculado o tempo de entreverdes, soma do tempo de amarelo com o tempo de vermelho geral. O manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica define alguns limites para o tempo de amarelo:

Analogamente, em vias com velocidade máxima regulamentada igual a 50 ou 60 km/h, o tempo de amarelo não deve ser inferior a 4s. Para

vias com velocidade regulamentada igual a 70 km/h, o tempo mínimo de amarelo deve ser igual a 5s.

Para todas as velocidades máximas regulamentadas, o tempo de amarelo não deve ser superior a 5s. Portanto, se o valor calculado pela equação 6.4 for superior a 5s, deve ser adotado $t_{am} = 5s$ e o restante do entreverdes concedido na forma de vermelho geral.

[DENATRAN 2014]

Para cada estágio será feito o cálculo dos tempos de amarelo utilizando a equação 2.4. Também para cada estágio será calculado o tempo de vermelho geral utilizando a equação 2.5. Serão utilizados para o tempo de percepção, máxima taxa de frenagem, aceleração da gravidade e comprimento dos veículos valores usuais trazidos no manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica: $t_{pr} = 1s$; $a_{ad} = 3 m/s^2$; $g = 9 m/s^2$; $c = 5m$. Para este trabalho, a intersecção se considerou plana. Assim a inclinação é nula.

Segundo o modelo criado para simulação, cada faixa possui três metros de largura. Desta forma, pode se aproximar a extensão da trajetória na área de conflitos pelo maior número de faixas que os veículos daquela aproximação terão que atravessar.

O estágio 1 permite a aproximação da via principal no sentido sul entrar na intersecção. A maior trajetória que um veículo desta aproximação pode percorrer na intersecção é seguindo para o sul. Nesta trajetória os veículos atravessam aproximadamente seis metros, referentes às duas faixas da via secundária.

O estágio 2 permite a aproximação da via secundária atravessar a intersecção. A maior trajetória possível para veículos oriundos desta aproximação é de aproximadamente doze metros, seguindo reto, os veículos devem atravessar uma distância equivalente a quatro faixas.

O estágio 3 permite a aproximação da via principal no sentido norte entrar na intersecção, com possibilidade de conversão a esquerda. Portanto, a maior trajetória que um veículo da aproximação atendida pode executar é ao realizar a conversão a esquerda. Nesta conversão, os veículos oriundos da via principal sentido norte atravessam duas faixas no sentido leste e uma no sentido norte. Portanto a trajetória aproximada é de nove metros.

A velocidade máxima permitida na via principal é setenta quilômetros por hora, que equivalem a aproximadamente 19,44 m/s. Enquanto na via secundária é de cinquenta quilômetros por hora, aproximadamente 13,89 m/s.

Os tempos de amarelo são calculados substituindo os valores na equação 2.4 enquanto os tempos de vermelho geral são calculados com a equação 2.5. Após o cálculo são feitas aproximações necessárias para respeitar a resolução mínima de um segundo (1 s), por medida de segurança estes valores são sempre arredondados para o valor superior. Os valores obtidos para cada estágio são apresentados na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Tempos de amarelo e vermelho geral para controlador de tempo fixo

	Tempo de Aproximação amarelo		Tempo de Aproximação vermelho	
Estágio 1	$t_{am1}=4,24 s$	$t_{am1}=5s$	$t_{vg1}=0,57 s$	$t_{vg1}=1 s$
Estágio 2	$t_{am2}=3,31 s$	$t_{am2}=4 s$	$t_{vg2}=1,22 s$	$t_{vg2}=2s$
Estágio 3	$t_{am3}=4,24 s$	$t_{am3}=5s$	$t_{vg3}=0,72 s$	$t_{vg3}=1s$

Portanto, os tempos de entreverdes resultantes dos estágios são todos seis segundos (6 s).

5.2.2 Etapa II

Esta etapa estuda os fluxos de tráfego de cada aproximação. Apresenta os dados de fluxo. Estes dados normalmente são levantados em estudos de campo. Os fluxos de tráfego e fluxos de saturação considerados para este trabalho estão apresentados na tabela 4.3.

Neste trabalho se considerou que o tempo perdido no início do estágio somado ao tempo perdido no final do estágio equivale ao tempo de entreverdes.

5.2.3 Etapa III

Nesta etapa são realizados os cálculos dos tempos de verde de cada estágio. Para este fim, utiliza-se os dados levantados nas etapas anteriores e o tempo de ciclo.

Para cada estágio é calculada a taxa de ocupação utilizando a equação 2.2 e os resultados são apresentados na tabela 5.2:

Tabela 5.2 – Cálculo da taxa de ocupação

Estágio	Fluxo (veículos/hora)	Fluxo de Saturação (veículos/hora)	Taxa de Ocupação
Via principal no sentido sul	581	4349	$y_1=0,134$
Via Secundária	437	3659	$y_2=0,119$
Via principal no sentido norte	593	3830	$y_3=0,155$

Como o tempo perdido de cada estágio foi aproximado para o tempo de entreverdes. O tempo perdido total é a soma dos tempos de entreverdes sem as aproximações.

$$T_p = 14,31 s$$

Para o cálculo do tempo de ciclo, foi utilizado o método de Webster. Este método é mais indicado para intersecções isoladas com aproximações de veículos aleatórias, como a intersecção a ser controlada neste trabalho. Portanto, utilizando a equação 2.10 e substituindo os valores:

$$t_{co} = 44,68 s$$

Os cálculos dos tempos de verde para cada estágio são feitos com a equação 2.12, referente ao cálculo do tempo de verde efetivo para tempo de ciclo calculado pelo método de Webster.

Substituindo os valores para cada estágio na equação 2.12. Em seguida é feita a comparação dos valores obtidos com os limites de segurança definidos anteriormente. Embora o tempo de ciclo esteja abaixo do máximo, os tempos de verde de segurança não são satisfeitos, necessitando de um ajuste. Este ajuste é conduzido para que o pior caso calculado atenda ao verde de segurança.

Tabela 5.3 – Cálculo dos tempos de verde

Estágio	Tempo verde (s)	de Verde segurança (s)	de Tempo verde ajustado de 1s. (s)	de Em resolução
1	$t_{v,ef,1}=9,95 s$	$t_{v,seg1}=12 s$	$t_{v,ef,1}=15,06 s$	$t_{v,ef,1}=15s$
2	$t_{v,ef,2}=8,89 s$	$t_{v,seg2}=12 s$	$t_{v,ef,2}=13,46 s$	$t_{v,ef,2}=13s$
3	$t_{v,ef,3}=11,53 s$	$t_{v,seg3}=12 s$	$t_{v,ef,3}=17,46 s$	$t_{v,ef,3}=17s$

A razão do tempo de verde de segurança para o tempo de verde calculado para o estágio 2 é a maior, 1,35. Então o tempo de ciclo deve ser multiplicado pela razão encontrada.

$$t_c' = 60,28 s$$

Assim o controlador projetado de tempo fixo opera com ciclos de acordo com o diagrama de estágios da Figura 5.1.

Figura 5.1 – Diagrama de estágios do controlador de tempo fixo

Instante	0	15	20	21	34	38	40	57	62
G1	[Green]		[Yellow]	[Red]					
G2	[Red]			[Green]	[Yellow]	[Red]			
G3	[Red]			[Red]			[Green]	[Yellow]	[Red]
Intervalos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Duração	15	5	1	13	4	2	17	5	1
%Ciclo	23,81%	7,94%	1,59%	20,63%	6,35%	3,17%	26,98%	7,94%	1,59%
Estágios	1			2			3		

Fonte: Arquivo pessoal

5.3 Projeto Controlador por Extensão de Verde

Este controlador estende o tempo de verde sempre que um veículo passar por algum sensor relacionado a atuação do controlador. Neste trabalho foi considerado um controlador totalmente atuado, sendo usados três sensores, sendo um em cada aproximação capaz de detectar presença de veículos independentemente da faixa que ele estiver passando.

Etapa I - Definição das condições em que a programação deverá operar - que é composta pelas mesmas atividades que compõem essa etapa para a programação de tempos fixos (7.1.1).

Etapa II - Determinação das características operacionais do tráfego - que é composta pelas mesmas atividades que compõem essa etapa para a programação de tempos fixos (7.1.2).

Etapa III - Cálculo da programação semafórica - que é específica para a programação atuada. Os parâmetros e características gerais foram apresentados nos itens 8.3, 8.4 e 8.5, e a sequência das atividades envolvidas no cálculo da programação semafórica para estágio atuado por veículo é apresentada no fluxograma da Figura 8.4 (item 8.6.1). As atividades para a programação de estágio atuado por pedestres são apresentadas no item 8.6.2.

Etapa IV - Implementação da programação e avaliação dos resultados - que é composta pelas mesmas atividades dessa etapa para a programação de tempos fixos (7.1.4).

[DENATRAN 2014]

5.3.1 Etapa I e Etapa II

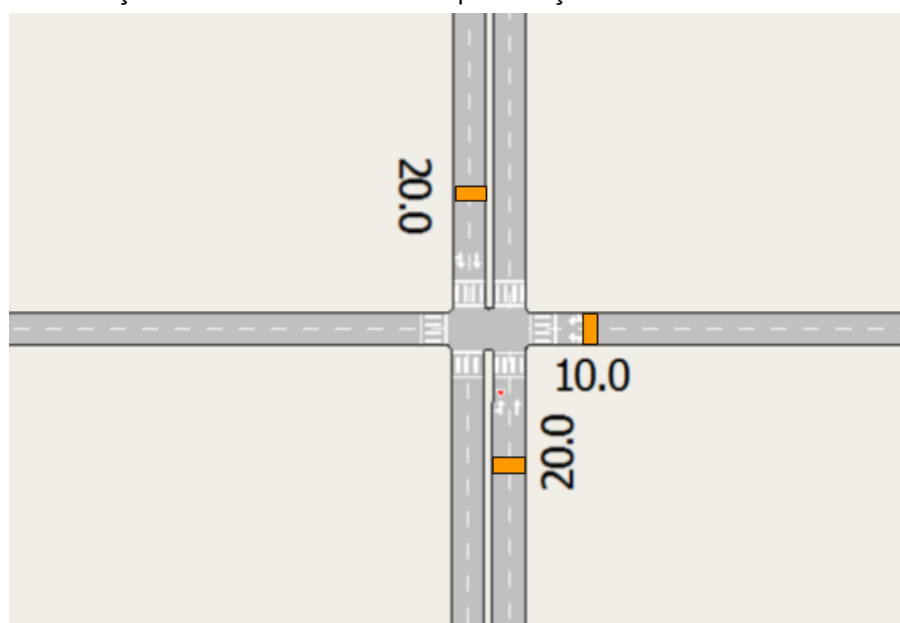
Análises idênticas as feitas na etapa I e na etapa II do projeto de controlador de tempo fixo. Assim, permanecem os mesmos estágios definidos anteriormente com os mesmos tempos de entreverdes.

5.3.2 Etapa III

Para este trabalho foi escolhida a estratégia de passagem, onde se estende o tempo de verde o bastante para o veículo atravessar a linha de retenção.

Os detectores utilizados por este controlador se encontram próximos a linha de retenção a fim de descarregar melhor as filas. Na via principal, os detectores se encontram a vinte metros da intersecção, enquanto na via secundária o detector se encontra a dez metros. A Figura 5.3 mostra a intersecção com os detectores alocados em cada aproximação.

Figura 5.3 – Alocação dos sensores em cada aproximação



Fonte: Arquivo pessoal.

O tempo de verde máximo adotado neste trabalho sessenta segundos (60 s) por recomendações de pessoas mais experientes na área. Desta forma o controlador consegue maior flexibilidade e pode se analisar melhor os resultados.

O tempo de verde mínimo deve ser maior ou igual ao tempo de verde de segurança definido anteriormente. Ainda, o tempo de verde mínimo deve ser longo o suficiente para que todos os veículos entre a linha de retenção e o detector possam entrar na intersecção. Para o cálculo do tempo de verde mínimo nestas condições o manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica recomenda o uso da equação 5.1:

$$t_{v, \min} = t_{pin} + \frac{d}{esp} \times i_{FS} \quad (5.1)$$

Em que,

$t_{v, \min}$ - Tempo de verde mínimo, em segundos;

t_{pin} - Tempo perdido no início do ciclo, em segundos;

d - Distância entre o detector e a linha de retenção, em metros;

esp - Espaçamento médio entre as frentes dos automóveis em fila, em metros;

i_{FS} - Intervalo entre veículos correspondente ao fluxo de saturação, em segundos.

O manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica recomenda os valores de tempo perdido no início do ciclo três segundos (3 s) e espaçamento médio de seis metros (6 m). O intervalo entre veículos para situação de fluxo de saturação pode ser calculado pela equação 5.2:

$$i_{FS} = 3600 / FS_{\text{por faixa}} \quad (5.2)$$

Em que,

$FS_{\text{por faixa}}$ - Fluxo de saturação referente a cada faixa individualmente.

Aplicando as equações 5.2 e 5.1 para cada estágio, obtêm-se os resultados apresentados na tabela 5.4. Como o tempo de verde mínimo para o estágio 2 não satisfaz a condição do tempo de verde de segurança se adota um valor equivalente ao próprio verde de segurança. Logo $t_{v, \text{min}2} = 12,0 \text{ s}$.

Tabela 5.4 – Cálculo dos tempos de verde mínimos

Estágio	Intervalo entre veículos	Tempo de verde mínimo	Em resolução de 1 s
1	$i_{FS1} = 3,10 \text{ s}$	$t_{v, \text{min}1} = 13,3 \text{ s}$	$t_{v, \text{min}1} = 13,0 \text{ s}$
2	$i_{FS2} = 4,12 \text{ s}$	$t_{v, \text{min}2} = 9,9 \text{ s}$	$t_{v, \text{min}2} = 12,0 \text{ s}$
3	$i_{FS3} = 3,04 \text{ s}$	$t_{v, \text{min}3} = 13,1 \text{ s}$	$t_{v, \text{min}3} = 13,0 \text{ s}$

O cálculo para o tempo de extensão de verde é feito para permitir que o último veículo detectado tenha tempo de passar pela linha de retenção. Assume-se que os veículos transitem pela via sempre que possível na velocidade máxima permitida. Desta forma o cálculo da extensão de verde pode ser feito com a equação 5.3.

$$t_{ev} = \frac{d_{det}}{v} \quad (5.3)$$

Em que,

t_{ev} - Tempo de extensão de verde, em segundos;

d_{det} - Distância do detector à linha de retenção, em metros;

v - Velocidade máxima permitida na via, em metros por segundo.

Aplicando a equação 5.3 para cada estágio com seus devidos valores, se obtêm os tempos de extensão de verde apresentados na tabela 5.5:

Tabela 5.5 – Cálculo das extensões de verde

Estágio	Distância do detector	Extensão de verde
1	$d_{det1} = 20 \text{ m}$	$t_{ev1} = 1,1 \text{ s}$
2	$d_{det2} = 10 \text{ m}$	$t_{ev2} = 0,8 \text{ s}$
3	$d_{det3} = 20 \text{ m}$	$t_{ev3} = 1,1 \text{ s}$

5.4 Projeto Controlador Proposto

Diferentemente dos outros controladores vistos neste trabalho, este controlador não apresenta sequência de estágios pré-definida, sendo inspirado pela técnica de controlador LHOVRA, conforme afirmação de Kronborg em seu trabalho comparando LHOVRA e MOVA.

Das funções do LHOVRA, serão implementadas neste trabalho apenas as funções L, H e O. Isto reduz o número de sensores utilizados em cada via e estas são as funções mais significativas para um ambiente urbano.

Como requisito de projeto, este controlador deve dar prioridade a veículos de transporte coletivo. Entretanto, não deve degradar o fluxo de tráfego em geral na intersecção.

5.4.1 Definição dos estágios

Embora a sequência não seja pré-definida, os estágios possíveis devem ser planejados neste controlador. Para esta análise é possível usar uma análise semelhante a feita na etapa I do projeto do controlador de tempo fixo (item 5.2.1).

Então, o estágio 1 atenderá as demandas vindas da aproximação pela via principal no sentido sul. O estágio 2 atenderá as demandas oriundas da via secundária. Enquanto o estágio 3 atenderá as demandas da via principal no sentido norte. No entanto, para que o controlador proposto possua maior flexibilidade é adicionado o estágio 0. No estágio 0 todos os sinais ficam vermelhos, impedindo o avanço de todos os grupos de movimento.

Como os tempos de entreverdes buscam segurança no tráfego conforme o manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica, é plausível utilizar os mesmos valores calculados anteriormente.

5.4.2 Seleção do Estágio Seguinte

Como mencionado anteriormente, o controlador proposto não possui uma sequência de estágios pré-definida. Portanto deve ter um sistema que faça a seleção.

Neste trabalho, o controlador proposto utiliza um sistema de pontuação de demanda. Neste sistema o estágio de maior pontuação será atendido, em caso de empate será atendido o estágio de menor ordem, estágio 1 tem preferência sobre o estágio 2 que tem preferência sobre o estágio 3. Para o caso de não haver demanda em nenhuma aproximação o controlador deve ativar o estágio 0.

A checagem das demandas é sempre feita ao término de um estágio. O estágio 0 é considerado com tempos nulos, forçando o controlador a sempre checar por outras demandas. No estágio 0, todas as aproximações estão impedidas de avançar, o que permite ao controlador atender imediatamente a próxima demanda.

A fim de ter maior preferência aos estágios que atendem maior fluxo de tráfego, foi dado um peso diferente em cada via. Esta estratégia também ajuda a evitar conflitos nos valores. Pela ordem de fluxo, o estágio 1 recebeu peso cinco (5), enquanto o estágio 2 recebeu peso três (3) e o estágio 3 recebeu peso sete (7).

Outro mecanismo relacionado a seleção dos estágios é o coeficiente de espera. Este coeficiente deve multiplicar todas as pontuações de demanda que não foram selecionadas. Este mecanismo evita que um estágio de pouco movimento nunca seja atendido. No entanto, deve se tomar cuidado no valor adotado por este coeficiente, um valor muito alto impede a flexibilidade da escolha do próximo estágio, mas um valor muito baixo provoca tempos de atraso muito elevados. Neste trabalho foi adotado o valor de 1,5.

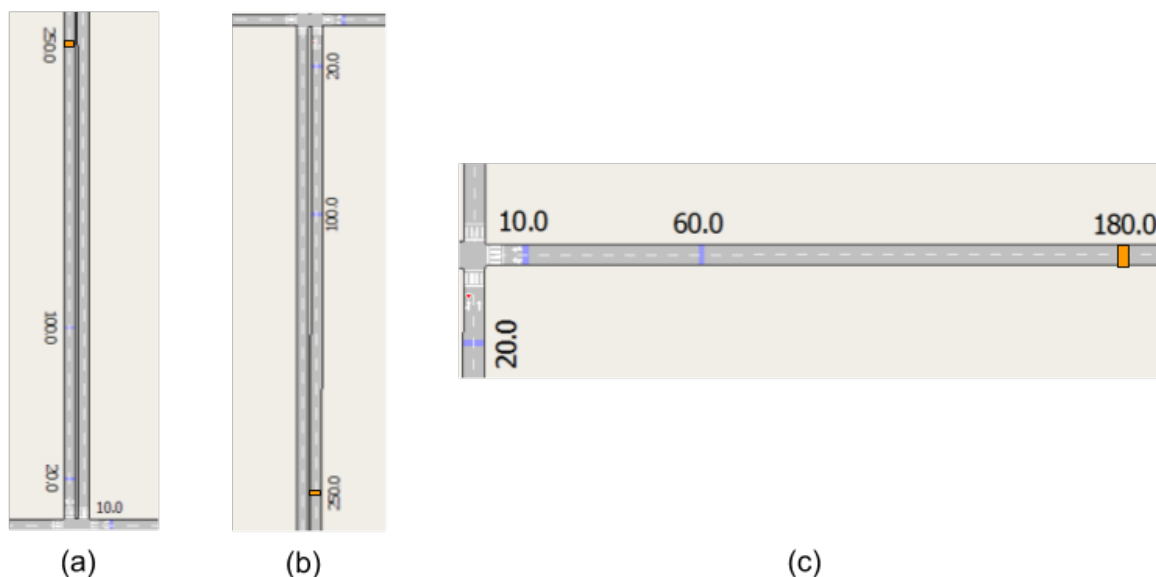
5.4.3 Ação da função L

A função L está associada a prioridade de veículos pesados, ônibus e caminhões. Neste projeto se optou por não dar prioridade total aos veículos de transporte coletivo para não degradar o tráfego. Esta função, ao detectar um veículo

da categoria desejada, gera uma pontuação de demanda muito superior ao normal da via dentro do algoritmo criado para a seleção do estágio seguinte. Neste trabalho a pontuação de demanda para veículos pesados adotada foi de cem pontos.

Conforme as recomendações encontradas no manual sueco de controle semaforico, esta função utiliza, em vias de setenta quilômetros por hora, sensores colocados a duzentos e cinquenta metros da intersecção. Enquanto para vias de cinquenta quilômetros por hora recomenda-se à distância de cento e oitenta metros. A Figura 5.4 mostra a alocação destes sensores no modelo da intersecção, sendo em (a) via principal com aproximação do norte, enquanto em (b) via principal com aproximação do sul e em (c) a via secundária com aproximação do leste.

Figura 5.4 – Alocação dos sensores em cada via



Fonte: Arquivo pessoal

A disposição de todos detectores em cada via é apresentada na tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Disposição dos detectores

Aproximação	Detector para medir a demanda	Detector na entrada da zona de dilema	Detector para estender o verde
Via principal sentido sul	250 m	100 m	20 m
Via secundária	180 m	60 m	10 m
Via principal sentido norte	250 m	100 m	20 m

O seletor de estágios pode selecionar o estágio a partir do momento que o veículo for detectado no sensor gerando os pontos de demanda. O tempo de verde mínimo para este controlador deve ser grande o bastante para que um veículo atravesse em segurança a extensão da secção de via entre o sensor e a intersecção. Para atender às variações das velocidades dos veículos deve se considerar uma velocidade média dos veículos na via inferior à velocidade permitida, neste trabalho foi adotada oitenta por cento da velocidade permitida. Logo:

$$t_{vmin} = \frac{D_0}{0,8 \times v} \quad (5.4)$$

Em que,

D_0 - Primeiro detector na aproximação do estágio;

v - Velocidade máxima permitida na aproximação.

Para cada estágio é aplicada a equação 5.4 e os resultados são apresentados na tabela 5.7

Tabela 5.7 – Parâmetros do controlador proposto

Estágio	Peso da Demanda	Extensão de Verde	Verde Mínimo
1	5	$t_{ev1} = 1,1 s$	$t_{vmin,1} = 16 s$
2	3	$t_{ev2} = 0,8 s$	$t_{vmin,2} = 16 s$
3	7	$t_{ev3} = 1,1 s$	$t_{vmin,3} = 16 s$

5.4.4 Ação da função H

A função H trata da prioridade da via pela extensão do tempo de verde. Esta função na versão recomendada apresenta valores para extensões e brechas muito elevados para ambientes urbanos, mas aceitáveis em ambientes rurais. Portanto, neste trabalho a função H foi adaptada. Com a finalidade de descarregar as filas, evitando fila residual no estágio, recomenda-se o uso de sensores mais próximos das linhas de retenção.

Neste trabalho foram utilizados os mesmos sensores do projeto do controlador atuado por extensão de verde. Assim os tempos de extensão de verde são os mesmos.

5.4.5 Ação da função O

A função O tenta reduzir o número de veículos na zona do dilema, reduzindo assim o risco de colisões traseiras. Para atingir este objetivo, o controlador só consegue postergar a mudança do sinal verde para o sinal amarelo, momento do dilema. Desta forma, a função O atua com uma extensão de verde, neste caso chamado de verde passivo.

O tempo de verde passivo não é o bastante para o veículo passar pela linha de retenção. No entanto, é o suficiente para o veículo atravessar a zona do dilema antes da mudança do sinal.

A detecção dos veículos deve ser feita na entrada da zona de dilema. O manual sueco de controle semaforico sugere os limites da zona de dilema para uma via de setenta quilômetros por hora se inicia a noventa e sete metros da linha de retenção e termina a cinquenta e três metros. Para uma via de cinquenta quilômetros por hora o início da zona é a cinquenta e seis metros e o término a trinta metros da linha de retenção.

Neste trabalho foram utilizados sensores na via principal a cem metros de distância das respectivas linhas de retenção. Na via secundária o sensor utilizado está a sessenta metros da linha de retenção.

6 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Neste capítulo inicialmente são apresentados os resultados gerais do desempenho dos controladores projetados no capítulo anterior. Com os resultados gerais é feito um comparativo entre os controladores.

Os controladores foram implementados por API em linguagem Python, cujos códigos encontram-se na seção de anexos deste trabalho.

Na sequência, o capítulo aprofunda em discussões sobre os resultados obtidos e detalha resultados parciais das condições das simulações efetuadas.

6.1 Comparativo na condição nominal

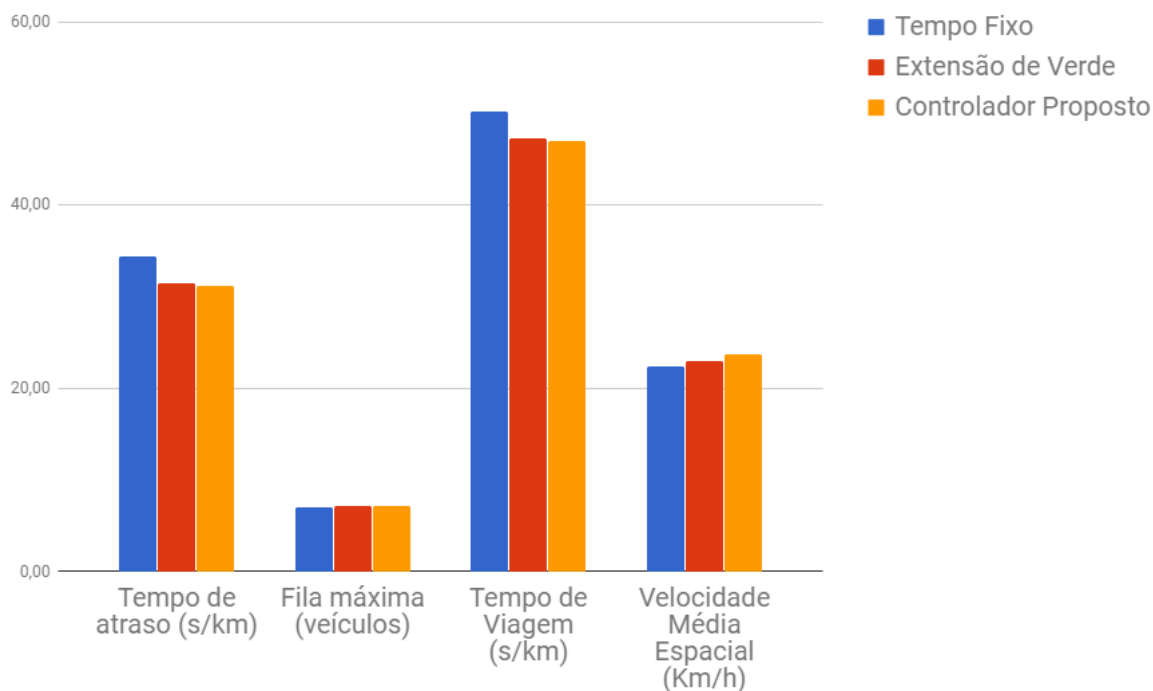
Neste comparativo são consideradas apenas as simulações com fluxo de tráfego nominal, fluxo para o qual os controladores foram projetados.

Na situação nominal, os três controladores obtiveram um desempenho próximo. A tabela 6.1 apresenta os índices de desempenho obtidos enquanto a Figura 6.1 apresenta os mesmos resultados graficamente.

Tabela 6.1 – Comparativo dos controladores em situação nominal

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Tempo de atraso (s/km)	34,34	31,47	31,14
Fila máxima (veículos)	6,94	7,17	7,21
Tempo de Viagem (s/km)	50,21	47,34	47,00
Velocidade Média Espacial (Km/h)	22,43	22,97	23,70

Figura 6.1 – Comparativo gráfico dos controladores em situação normal



Fonte: Arquivo pessoal

Embora o controlador de tempo fixo esteja bem ajustado, a chegada de veículos pelas aproximações ainda apresenta uma aleatoriedade, não sendo uma constante. Os controladores atuados apresentam uma flexibilidade para atender melhor a aleatoriedade.

6.2 Comparativo com fluxo maior

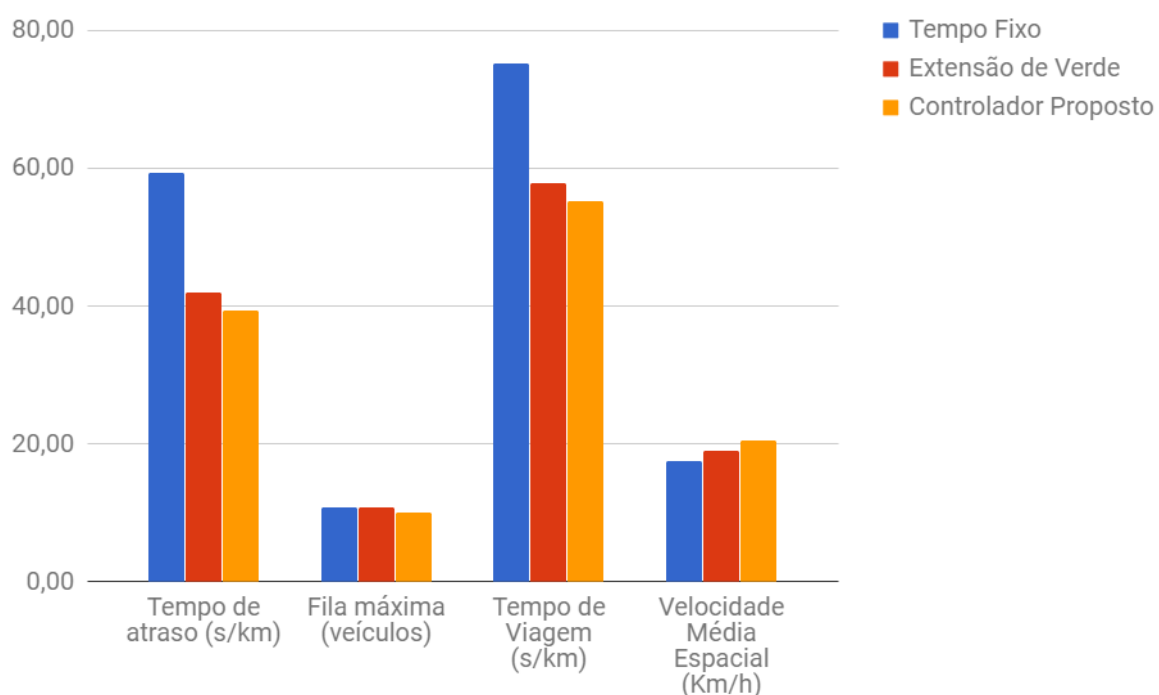
Neste comparativo são consideradas apenas as simulações com fluxo de tráfego ampliado, fluxo vinte por cento (20%) acima do qual os controladores foram projetados.

Enquanto os controladores atuados conseguiram se adaptar ao aumento do fluxo, o controlador de tempo fixo apresentou uma grande perda de desempenho. A tabela 6.2 apresenta os índices medidos nas simulações de fluxo elevado e a Figura 6.2 representa graficamente estes resultados.

Tabela 6.2 – Comparativo dos controladores em situação de fluxo elevado

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Tempo de atraso (s/km)	59,30	42,04	39,41
Fila máxima (veículos)	10,72	10,76	9,96
Tempo de Viagem (s/km)	75,15	57,89	55,26
Velocidade Média Espacial (Km/h)	17,46	18,95	20,53

Figura 6.2 – Comparativo gráfico dos controladores em situação fluxo elevado



Fonte: Arquivo pessoal

O controlador proposto apresenta uma pequena vantagem em relação ao controlador por extensão de verde. Esta vantagem se dá pela capacidade do controlador se adaptar à ordem de chegada dos veículos aleatória. Se chegassem cinco veículos numa de estágio predecessor via enquanto na outra chegam dois, o controlador por extensão de verde atenderá primeiro os dois veículos, para depois

atender os outros cinco. O controlador proposto consegue a flexibilidade para atender ao grupo de cinco antes do grupo de dois veículos.

6.3 Comparativo com fluxo reduzido

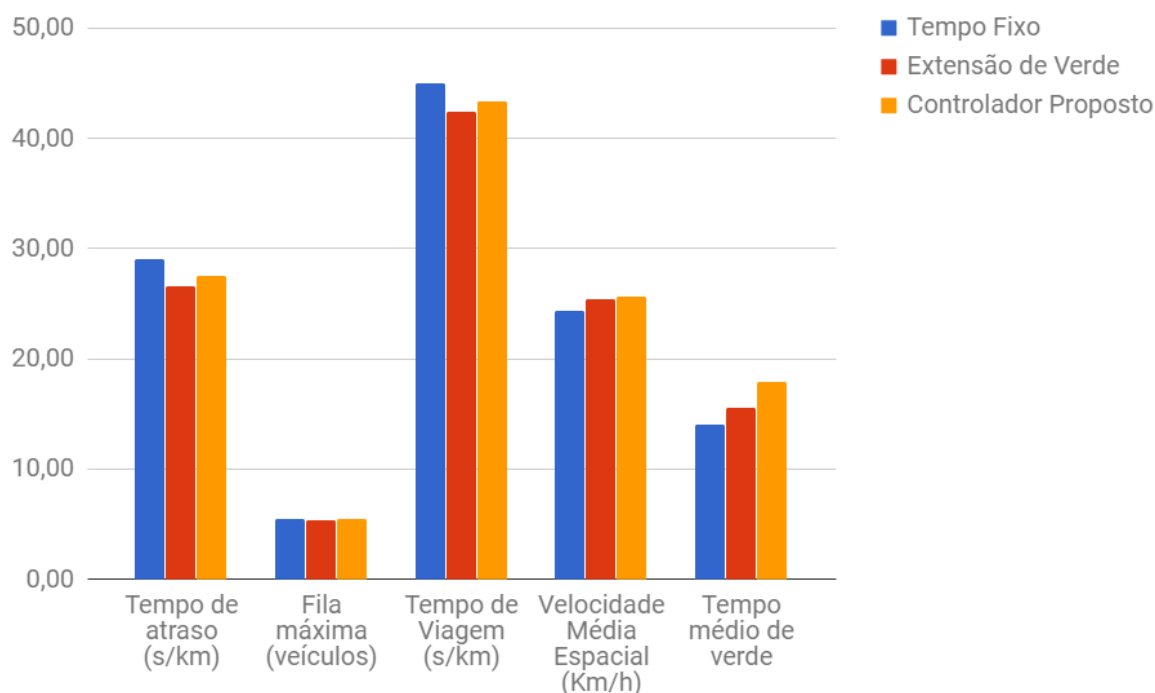
Neste comparativo são consideradas apenas as simulações com fluxo de tráfego reduzido, fluxo vinte por cento (20%) abaixo do qual os controladores foram projetados.

Diferentemente das outras simulações, nesta o controlador proposto apresenta uma pequena desvantagem em relação ao controlador por extensão de verde. Os índices de desempenho medidos são apresentados na tabela 6.3 e representados graficamente na Figura 6.3.

Tabela 6.3 – Comparativo dos controladores em situação de fluxo reduzido

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Tempo de atraso (s/km)	29,09	26,52	27,51
Fila máxima (veículos)	5,45	5,35	5,50
Tempo de Viagem (s/km)	44,98	42,41	43,39
Velocidade Média Espacial (Km/h)	24,33	25,45	25,64
Tempo médio de verde (s)	14,00	15,58	17,89

Figura 6.3 – Comparativo gráfico dos controladores em situação fluxo reduzido



Fonte: Arquivo pessoal

A razão do controlador proposto ter um desempenho pior nesta situação é o tempo de verde mínimo dos controladores. Enquanto no controlador por extensão de verde apresenta tempos de verde mínimo entre doze e treze segundos, o controlador proposto apresenta tempos de verde mínimo de dezesseis segundos. Esta análise é comprovada pelo tempo médio de verde dos controladores, em que, o fluxo requer tempos de verde menores que o verde mínimo do controlador proposto.

Por tanto, a adaptabilidade do controlador proposto para fluxos baixos é limitada pelo tempo de verde mínimo.

Observa-se, ainda, que o desempenho do controlador de tempo fixo é relativamente melhor neste caso do que no anterior (fluxo aumentado). Isto se deve ao fato, já apontado por Webster em seu trabalho pioneiro, de que tempos de ciclo maiores que o ciclo ótimo têm efeito menos prejudicial do que tempos de ciclo menores que o ótimo [Webster 1958]. Nos casos aqui analisados, o tempo de ciclo é mantido constante. Assim, fluxos aumentados representam condições em que o tempo de ciclo operante é menor do que o ótimo, provocando degradação maior do

desempenho. Já os fluxos diminuídos representam situação de ciclo operante maior do que o necessário, sem tanto prejuízo ao tráfego.

6.4 Comparativo geral

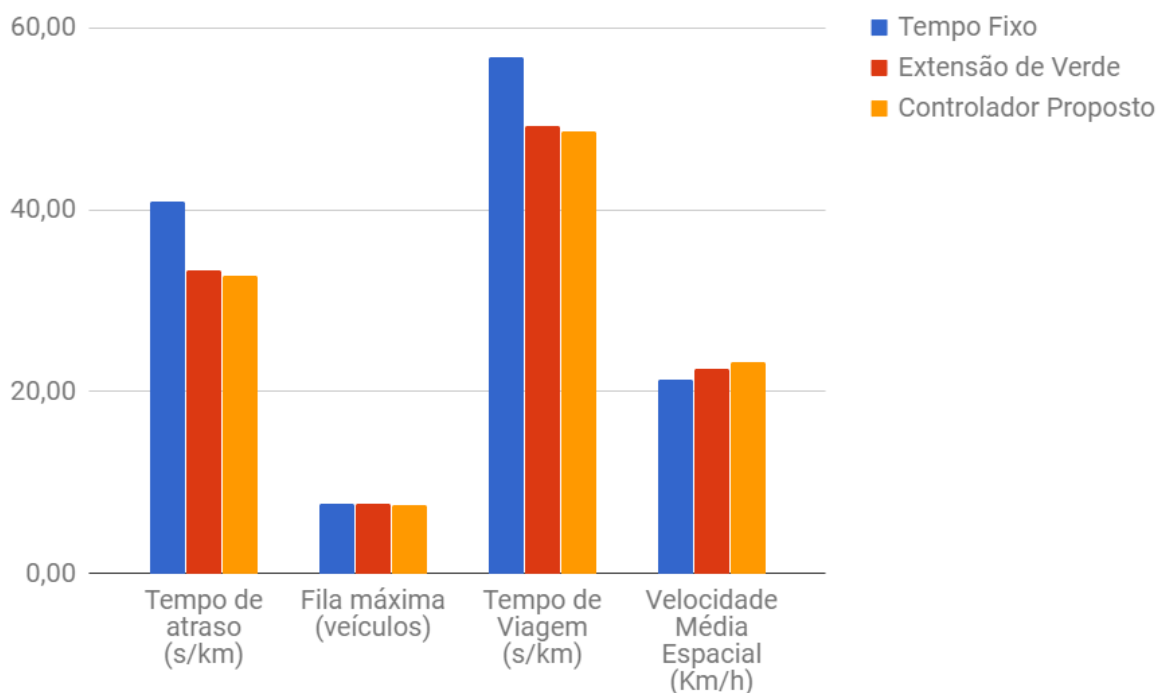
Nesta etapa é feita uma síntese do desempenho dos controladores. Onde se compara o desempenho médio de todas as simulações para cada controlador.

A tabela 6.4 mostra a média dos índices de desempenho para cada controlador considerando todos os veículos. O controlador de tempo fixo apresentou os piores resultados, com o controlador com extensão de verde e o controlador proposto apresentando desempenhos parecidos, sendo uma leve vantagem ao controlador proposto.

Tabela 6.4 – Comparativo dos resultados gerais

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Tempo de atraso (s/km)	40,91	33,35	32,68
Fila máxima (veículos)	7,70	7,76	7,56
Tempo de Viagem (s/km)	56,78	49,21	48,55
Velocidade Média Espacial (Km/h)	21,40	22,46	23,29

Figura 6.4 – Comparativo gráfico dos resultados gerais



Fonte: Arquivo pessoal

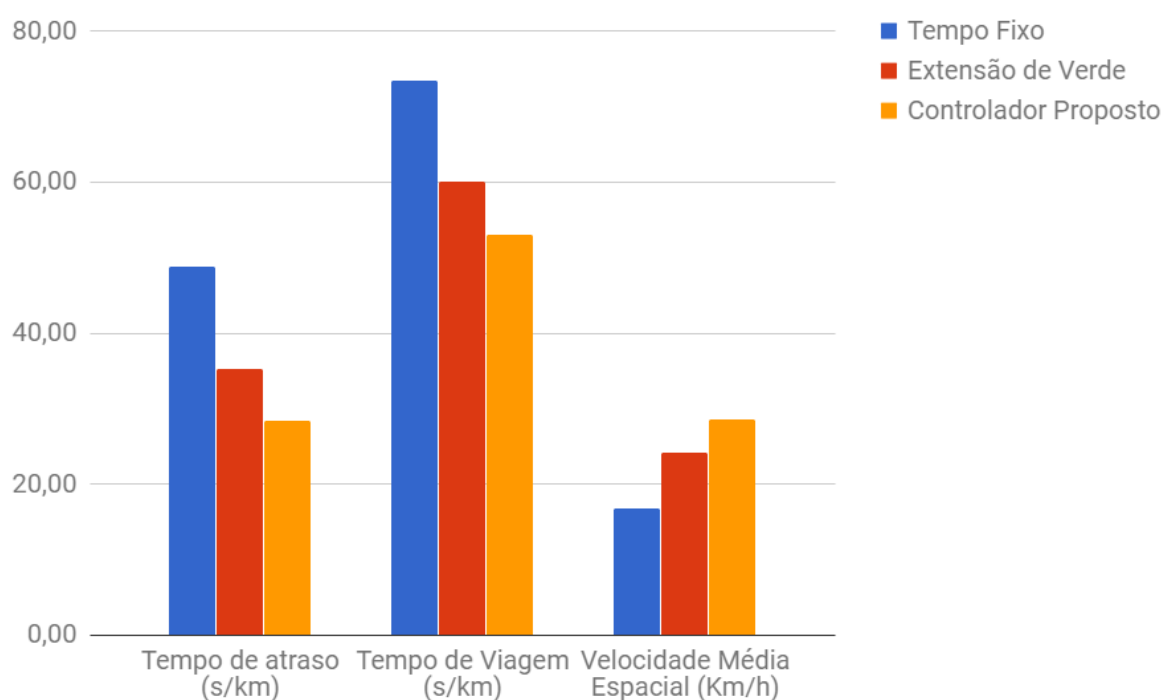
O controlador proposto utilizado nestas simulações foi um ajuste considerado adequado. Com este ajuste o controlador proposto apresentou um desempenho bom em relação aos outros controladores para o tráfego em geral.

A tabela 6.5 apresenta os resultados considerando apenas os veículos de transporte coletivo. Como os controladores de tempo fixo e o atuado por extensão de verde não possuem sistema de prioridade para veículos de transporte coletivo, não é possível comparar o desempenho da função L do controlador proposto. No entanto, é possível validar a atuação.

Tabela 6.5 – Comparativo dos resultados gerais para transporte coletivo

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Tempo de atraso (s/km)	48,77	35,31	28,34
Tempo de Viagem (s/km)	73,43	59,97	53,00
Velocidade Média Espacial (Km/h)	16,82	24,17	28,56

Figura 6.5 – Comparativo gráfico dos resultados gerais para transporte coletivo



Fonte: Arquivo pessoal

Analisando as tabelas 6.4 e 6.5 é possível afirmar que o controlador proposto conseguiu dar prioridade aos veículos de transporte coletivo sem degradar o tráfego geral. Atendendo, assim este requisito de projeto.

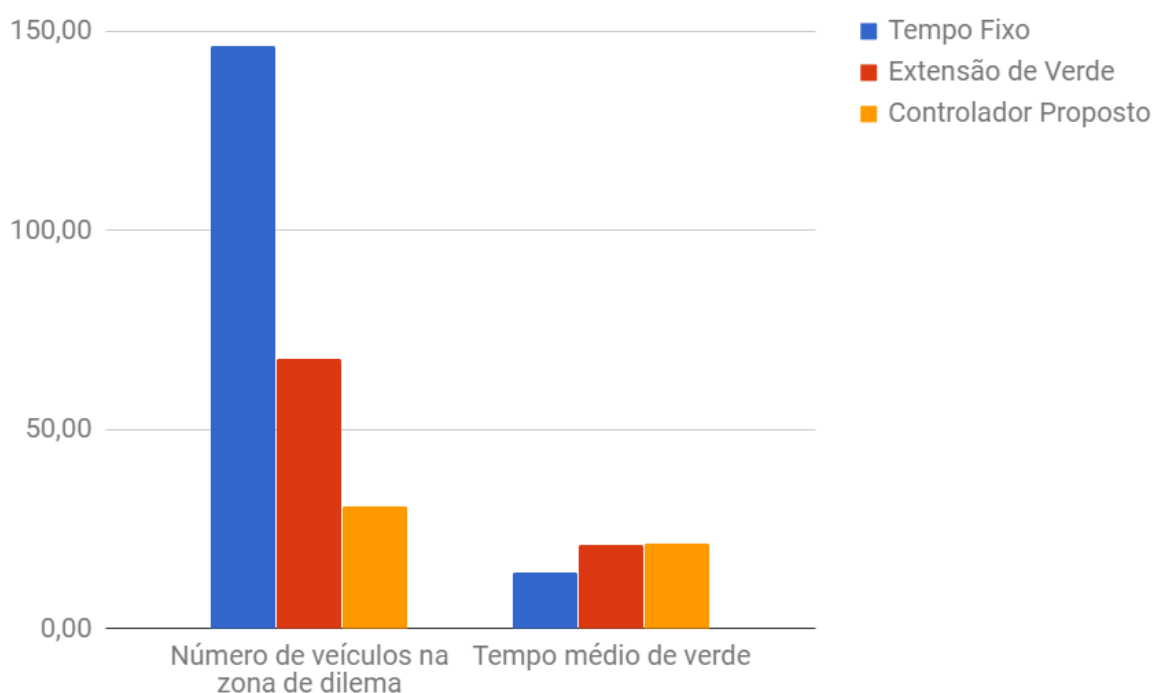
Para comprovar a atuação da função O do controlador proposto foram feitas contagens de veículos que estariam na zona de dilema definida anteriormente. A

tabela 6.6 mostra as médias das contagens obtidas e a média dos tempos de verde para cada controlador, enquanto a Figura 6.6 representa as contagens graficamente.

Tabela 6.6 – Comparativo dos resultados gerais para contagens em zona de dilema

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Número de veículos na zona de dilema (veículos)	146,22	67,78	30,67
Tempo médio de verde (s)	14,00	20,81	21,28

Figura 6.5 – Comparativo gráfico dos resultados gerais para contagens em zona de dilema



Fonte: Arquivo pessoal

O número de veículos contados na zona de dilema para o controlador de tempo fixo é muito superior aos demais. No entanto, o tempo médio de verde para o controlador de tempo fixo é quase metade dos outros. Dessa forma, a contagem de veículos ocorreu muito mais vezes no controlador de tempo fixo do que nos outros

controladores. Logo, para poder constatar a atuação da função O do controlador proposto, foi analisado apenas em relação ao controlador por extensão de verde.

Ao comparar as contagens de veículos na zona de dilema dos controladores por extensão de verde e o proposto, é possível ver que embora não tenham tido tanta diferença nos tempos de verde, a contagem por sua vez, teve uma diferença grande. Se somar o número de vezes que a função O adicionou o tempo de verde passivo, em média 24,78, vezes com a contagem do controlador proposto, se obtém um valor relativamente próximo ao da contagem no controlador por extensão de verde. Isto demonstra que a função O conseguiu reduzir o número de veículos na zona de dilema reduzindo o risco de colisões traseiras na intersecção.

6.5 Resultados de Simulações Complementares

Algumas simulações complementares foram feitas todas com fluxo nominal de veículos. Estas simulações objetivam entender o efeito de situações específicas envolvendo o efeito dos controles no atendimento de requisições de pedestres e, também, o efeito no desempenho de diferentes ajustes nos parâmetros do controlador proposto.

6.5.1 Simulações considerando Pedestres

Para estas simulações o controlador de tempo fixo foi recalculado com o estágio de pedestres resultando no diagrama de intervalos luminosos apresentado na figura 6.7.

Quanto aos outros controladores, apenas o estágio 4, específico de pedestres, é adicionado. Como não foi definido exatamente o comportamento dos pedestres na região da intersecção controlada foi feito um sistema que acrescenta demanda ao estágio de pedestres periodicamente, em intervalos de dez segundos (10 s). No controlador proposto foi dado o peso de demanda de onze (11).

Sob estas condições foram simulados os controladores, marcando o tempo médio entre os estágios de pedestres. Os resultados para o tráfego em geral são apresentados na tabela 6.7 e representados graficamente na Figura 6.8.

Figura 6.7 – Diagrama de sinais luminosos para o controlador de tempo fixo

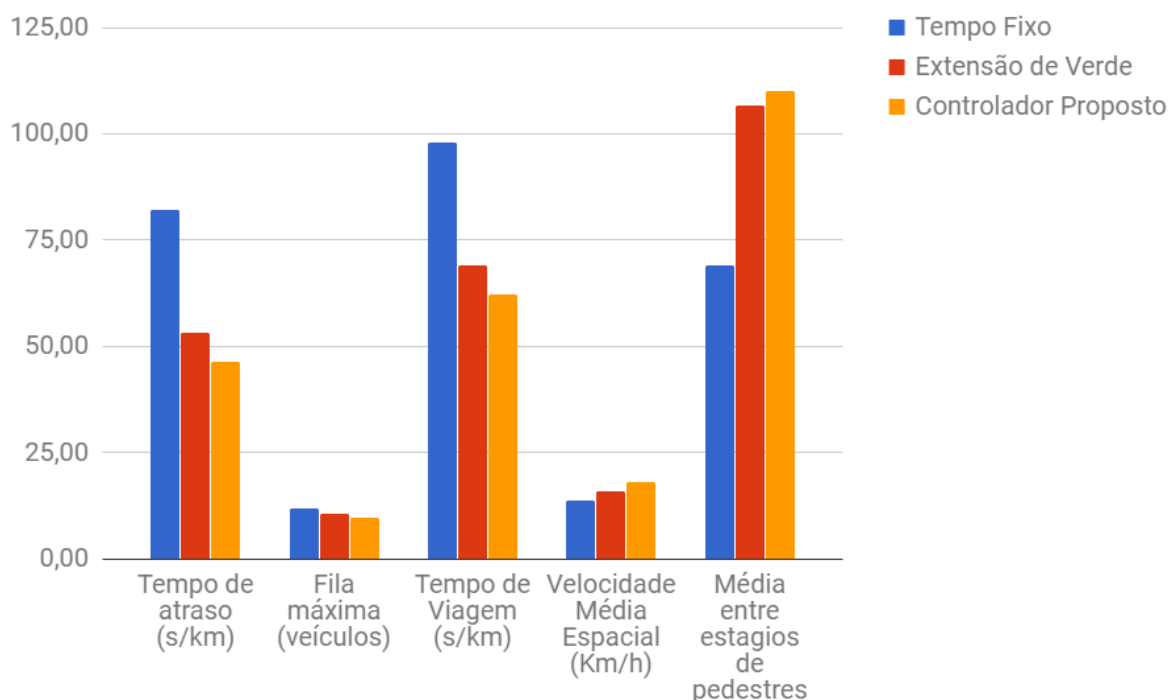
Instante	0	17	22	23	38	42	44	63	68	69	80	88
G1	Verde	Amarelo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
G2	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
G3	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
GP	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Intervalos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Duração	17	5	1	15	4	2	19	5	1	11	8	3
%Ciclo	18,68%	5,49%	1,10%	16,48%	4,40%	2,20%	20,88%	5,49%	1,10%	12,09%	8,79%	3,30%
Estágios	1			2			3			4		

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 6.7 – Comparativo entre os controladores considerando pedestres em fluxo nominal

Índices de desempenho	Controlador de Tempo Fixo	Controlador por Extensão de Verde	Controlador Proposto
Tempo de atraso (s/km)	82,02	53,32	46,45
Fila máxima (veículos)	11,87	10,48	9,61
Tempo de Viagem (s/km)	97,89	69,18	62,32
Velocidade Média Espacial (Km/h)	13,55	15,89	17,98
Tempo médio de verde (s)	17,00	27,63	24,85
Número de veículos na zona de dilema (ucps)	145,00	49	31,00
Tempo médio entre estágios de pedestres (s)	69,00	106,66	109,93

Figura 6.8 – Comparativo gráfico entre os controladores considerando pedestres em fluxo nominal



Fonte: Arquivo pessoal

Estes resultados comprovam que o controlador proposto consegue atender bem o tráfego numa situação com pedestres. No entanto, o controlador proposto é o que apresenta maiores intervalos entre os estágios de pedestres.

A diferença na demora para atender os pedestres reflete no tempo total de simulação designado para os veículos. Assim, as simulações com pedestres não geram uma boa referência para comparar o desempenho dos controladores.

6.5.2 Resultados dos Efeitos dos Parâmetros do Controlador Proposto

O controlador proposto apresenta alguns parâmetros diferentes dos outros controladores. A fim de estudar o efeito deles foram feitas algumas simulações com fluxo nominal.

O parâmetro chamado neste trabalho de coeficiente de espera tem o propósito de compensar grandes diferenças nos fluxos das aproximações, garantindo que todas as aproximações receberão passagem. Este coeficiente é multiplicado nos cálculos de demanda do controlador, portanto com o valor unitário

seu efeito é neutralizado. No outro extremo, a partir de um determinado valor, o seu efeito é saturado. Portanto para o ajuste nominal, se considerou um valor mediano, 1,5. Os resultados para estas simulações são apresentados na tabela 6.8.

Tabela 6.8 – Efeito do coeficiente de espera

Índices de desempenho	Ajuste Nominal	Coeficiente de espera neutro	Coeficiente de espera elevado
Tempo de atraso (s/km)	31,14	32,21	29,62
Fila máxima (veículos)	7,21	7,35	6,96
Tempo de Viagem (s/km)	47,00	48,08	45,48
Velocidade Média Espacial (Km/h)	23,70	23,76	23,85

Com o foco na situação do coeficiente de espera neutro se observou separadamente o efeito para cada aproximação em relação ao ajuste nominal, conforme a tabela 6.9 demonstra.

Tabela 6.9 – Efeito do coeficiente de espera neutro por aproximação

Índices de desempenho	Ajuste Nominal		
	Via principal sentido sul	Via principal sentido norte	Via secundária
Tempo de atraso (s/km)	27,50	24,99	40,91
Fila máxima (veículos)	7,45	6,78	7,39
Tempo de Viagem (s/km)	41,45	38,94	60,62
Velocidade Média Espacial (Km/h)	25,83	27,58	17,68
Índices de desempenho	Coeficiente de Espera neutro		
	Via principal sentido sul	Via principal sentido norte	Via secundária
Tempo de atraso (s/km)	27,02	24,05	45,56
Fila máxima (veículos)	7,61	6,39	8,06
Tempo de Viagem (s/km)	40,97	37,99	65,27
Velocidade Média Espacial (Km/h)	26,40	28,35	16,53

As aproximações pela via principal são beneficiadas pela falta do coeficiente de espera. No entanto, a via secundária apresenta grande perda de desempenho por possuir menor fluxo e menor peso das três aproximações. Desta forma, uma aproximação com fluxo muito menor em relação às demais não consegue passagem.

Para o caso do coeficiente de espera elevado, foram obtidos os mesmos resultados para os valores 100 e 10.000. Logo, com valor 100, este parâmetro já está saturado. Na situação de saturação, o controlador apresenta um comportamento cíclico, se assemelhando aos outros controladores estudados neste trabalho. Este comportamento impede a atuação da prioridade dos veículos de

transporte público. A tabela 6.10 apresenta os resultados das simulações para veículos de transporte coletivo.

Tabela 6.10 – Efeito do coeficiente de espera elevado sobre o transporte coletivo

Índices de desempenho	Ajuste Nominal	Coeficiente de espera elevado
Tempo de atraso (s/km)	30,23	33,45
Tempo de Viagem (s/km)	54,87	58,09
Velocidade Média Espacial (Km/h)	27,51	24,37

O desempenho do controlador do ponto de vista do transporte coletivo piorou com o comportamento cíclico enquanto para o tráfego em geral melhorou. Portanto para voltar a ter prioridade, o valor da demanda para o transporte coletivo deve ser elevada proporcionalmente. Contudo, para estudar o efeito do parâmetro demanda para o transporte coletivo, o coeficiente de espera adotado será o valor nominal.

O efeito do parâmetro de demanda para o transporte coletivo reflete diretamente na prioridade dada aos veículos de transporte público. Para estudar os efeitos de variações deste parâmetro, foram feitas simulações com o parâmetro num valor muito abaixo e muito acima do valor nominal. O valor nominal utilizado foi cinquenta (50), para valor muito abaixo, um (1) e para valor muito elevado dez mil (10.000). Os resultados destas simulações são apresentados na tabela 6.11, onde as primeiras linhas se referem ao tráfego em geral e as últimas ao transporte público.

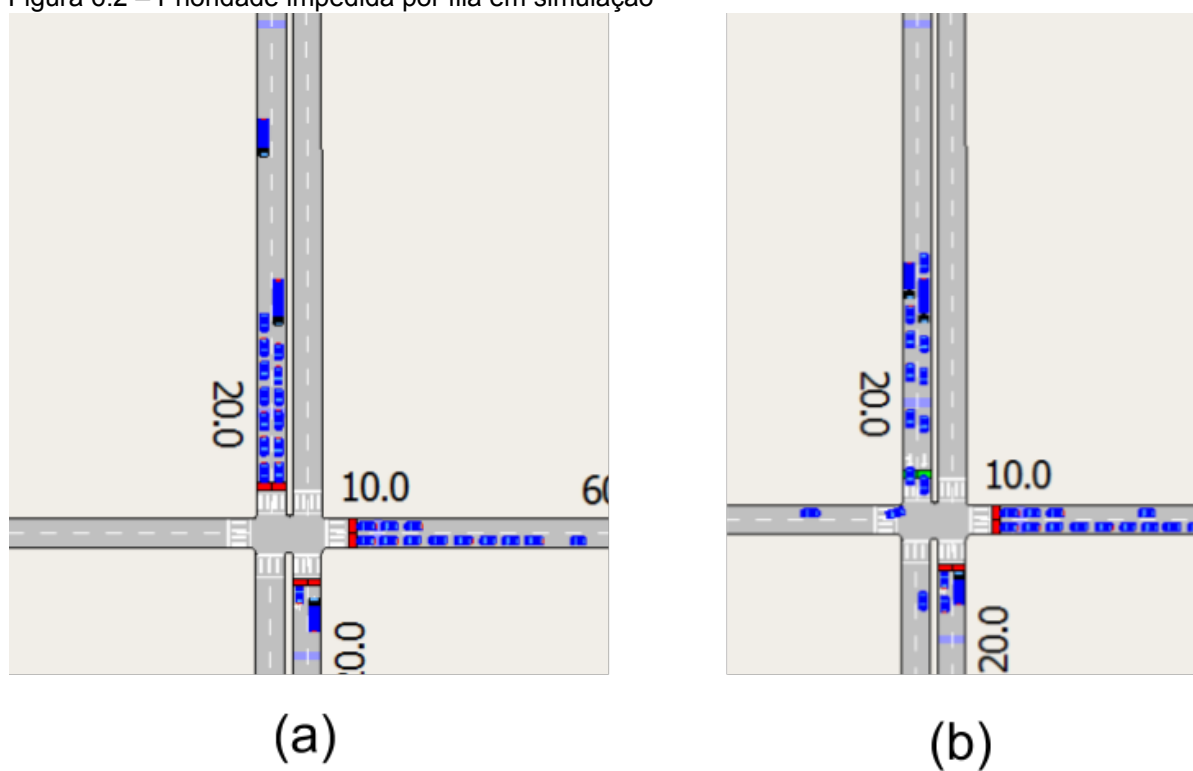
Tabela 6.11 – Efeito da priorização do transporte público no sistema

Tráfego em Geral			
Índices de desempenho	Ajuste nominal	Sem prioridade	Prioridade alta
Tempo de atraso (s/km)	31,14	29,98	33,43
Fila máxima (veículos)	7,21	6,69	7,83
Tempo de Viagem (s/km)	47,00	45,85	49,29
Velocidade Média Espacial (Km/h)	23,70	24,15	22,55
Transporte Público			
Índices de desempenho	Ajuste nominal	Sem prioridade	Prioridade alta
Tempo de atraso (s/km)	30,23	32,65	35,65
Tempo de Viagem (s/km)	54,87	57,25	60,26
Velocidade Média Espacial (Km/h)	27,51	26,46	28,36

Ao retirar a prioridade do transporte público, o tráfego em geral teve uma melhora e com isso evitou que o desempenho para o transporte público piorasse muito. Logo, com menos filas em geral, os ônibus perdem menos tempo na intersecção, mas como pode se ver, um pouco de prioridade ajuda o transporte coletivo sem degradar muito o tráfego em geral como é a situação nominal.

Por outro lado, ao elevar muito a prioridade do transporte coletivo, degrada o tráfego em geral ao ponto de impactar no próprio transporte público. Isto se deve por haver filas a frente do veículo de transporte público impedindo que eles usufruam a priorização dada. A Figura 6.2 esta situação, onde em (a) refere-se a momentos antes do início do sinal verde e em (b) refere-se a momentos após a abertura.

Figura 6.2 – Prioridade impedida por fila em simulação



Fonte: Arquivo pessoal

Como é possível observar na imagem (a), o veículo de transporte público só conseguirá avançar depois da fila até ele ter avançado como em (b). Logo, muita prioridade a transporte público tem desempenho pior que nenhuma prioridade.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Foram apresentadas e estudadas as técnicas de controle a tempos fixos e de controle atuado por extensão de verde descritas no manual brasileiro de sinalização de trânsito volume V – Sinalização semafórica [DENATRAN 2014] e a técnica sueca LHOVRA. Um controlador foi proposto baseado em princípios da técnica LHOVRA adaptados para o cruzamento descrito na Seção 4.2 e de acordo com as discussões abordadas sobre zona de dilema e prioridade para transporte coletivo.

Os três tipos de controle foram implementados em simulação com a ferramenta Aimsun, possibilitando a comparação entre eles.

O controlador proposto neste trabalho obteve um bom desempenho, dando prioridade aos veículos de transporte coletivo e ainda conseguindo desempenho melhor que os outros dois controladores para o tráfego em geral.

Cabe observar que o controlador proposto possui um custo de instalação e manutenção muito superiores aos controladores usuais devido ao uso de mais detectores. Há também grande dependência dos detectores instalados para seu funcionamento, o que pode torná-lo pouco robusto. Contudo, o controlador proposto apresenta um ganho significativo no desempenho do tráfego, especialmente para o transporte coletivo. Assim, embora tenha um custo elevado, um município brasileiro conseguiria instalar e manter o controlador proposto em intersecções de grande importância viária.

Além do bom desempenho nas condições de tráfego e priorização para o transporte coletivo, a função que tenta reduzir o número de veículos na zona do dilema, mostrou ter efeito na redução do risco de colisões traseiras. Com menor risco de colisões traseiras, o sistema está menos suscetível a interdições provocadas por acidentes. Considerando este fato e ao grande número de acidentes no Brasil [OMS 2015], a função O do controlador proposto ganha grande importância. Apesar do bom desempenho, essa função ainda sofre limitações e um estudo mais aprofundado sobre a zona do dilema para um cruzamento como o estudado neste trabalho e do benefício dessa função é recomendado para o futuro.

A aplicação da funcionalidade para reduzir o número de veículos na zona de dilema para outras estratégias, como a de extensão de verde e o seu efeito em

reduzir o risco de colisões traseiras em outros tipos de controladores, como o próprio extensão de verde, a fim de reduzir o risco de colisões traseiras pode ser estudado, bem como variações do controlador proposto para aplicações em casos especiais.

REFERÊNCIAS

[FHWA 2009] Federal Highway Administration; Engineering Countermeasures to Reduce Red-Light Running, Publication FHWA-SA-10-005, USDOT, November 2009, p. 6.

[DENATRAN 2014] DENATRAN; Manual Brasileiro de Sinalização de Trânsito Volume V – Sinalização Semafórica, resolução 483.2014

[TFK 1993] P. Kronborg, F. Davidsson; Self-optimizing traffic signal control using microprocessor: The TRRL “MOVA” strategy for isolated intersections (Controle semafórico auto-otimizável utilizando microprocessador: a estratégia “MOVA” para controle isolado de intersecções), TFK – Transport Research Institute, Stockholm.

[SRA 2002] VÄGUTFORMNING, version S-2, Bilaga 1 Trafiksignalreglering med LHOVRA-Teknik (Manual Sueco de Design de estrada, versão S-2, Anexo 1: Controle de sinal de trânsito com a técnica LHOVRA), Autoridades rodoviárias suecas (Vägverket), publicação 2002:123.

[TSS 2015] Transport Simulation Systems; Aimsun 8 API manual, março 2015

[Webster 1958] Webster, F. V., & Road Research Laboratory. (1958). Traffic signal settings. London: H.M.S.O.

[Heydecker 1983] Heydecker B. G., Transport Studies Group, University College London. Capacity at a signal-controlled junction where there is priority for buses, Transportation Research Part B: Methodological 1983.

[OMS 2015] RELATÓRIO GLOBAL SOBRE O ESTADO DA SEGURANÇA VIÁRIA 2015, Organização Mundial da Saúde 2015.

ANEXO A – CONTROLADOR TEMPO FIXO

Segue o código em linguagem Python para o controlador de tempo fixo empregado nas simulações:

```
#Autor: Eduardo Delagnelo Barbeta
#Universidade Federal de Santa Catarina

from AAPI import *

#Definições
D_Interseccao = 454

D_NEstagios = 5 #Tem que contar com estágio 0
                #Em 4 não conta o estagio de pedestres

D_gruposSemaforicosEst1 = [2]
D_gruposSemaforicosEst2 = [1]
D_gruposSemaforicosEst3 = [4]
D_gruposSemaforicosEst4 = [3]

D_Tzd = 2
D_TipoDeVeiculo_TODOS = 0

#Cores
D_RED = 0
D_GREEN = 1
D_YELLOW = 2
D_FlashingRED = 4

#Parametros do controlador
GL_Tv = [0, 17, 15, 19, 11] #Lista dos tempos de verde
GL-Ta = [0, 5, 4, 5, 8] #Lista dos tempos de amarelo
```

```
GL_Tvg = [0, 1, 2, 1, 3] #Lista dos tempos de vermelho geral
```

```
GL_IdDetectores = [[0, 0, 0],
                    [629, 634, 616],
                    [631, 632, 617],
                    [630, 633, 615],
                    [0, 0, 0]]
```

```
#Variaveis Globais
```

```
G_estagiIndex = -1
```

```
G_Tvs = []
```

```
G_TentreP = []
```

```
G_Dilemacounter = 0
```

```
_fase = D_RED
```

```
tempoInicioFase = 0
```

```
G_Tped = 0
```

```
G_UltimoIndex = -1
```

```
#Funcoes
```

```
def ZonaDilema(time, timeSta, timeTrans, cycle, _index, _Tv):
```

```
#Funcao para reducao de colisoes traseiras, minimizando o numero de
veiculos
```

```
# na zona de dilema na troca do sinal verde para sinal amarelo com o tempo
de verde passivo
```

```
    global G_Dilemacounter
```

```
    if timeSta >= _Tv - D_Tzd + tempoInicioFase:
```

```
        if AKIDetGetPresenceCyclebyId(GL_IdDetectores[_index][1],
D_TipoDeVeiculo_TODOS) > 0:
```



```

        G_Dilemacounter += 1

    return 0

def MudaSinal(cor, index, timeSta, time, cycle):
    i=0
    if index == 1:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst1)):
            ECChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1
    elif index == 2:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst2)):
            ECChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst2[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1
    elif index == 3:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst3)):
            ECChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst3[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1
    else:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst4)):
            ECChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst4[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1

    return 0

def EntrePedestres(time, timeSta, timeTrans, cycle):
    global G_UltimoIndex, G_TentreP, G_Tped

```

```

if G_estagiolIndex != 4 and G_UltimoIndex == 4:
    G_Tped = timeSta

if G_estagiolIndex == 4 and G_UltimoIndex != 4:
    G_Tped = timeSta - G_Tped
    G_TentreP.append(G_Tped)

if G_UltimoIndex != G_estagiolIndex:
    G_UltimoIndex = G_estagiolIndex

return 0

def AAPILoad():
    return 0

def AAPIInit():
    print("API Init")

    ECIDisableEvents(D_Interseccao)

    # i=0
    # while i < (len(D_gruposSemaforicosEst1)):
        #   ECICheckSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], D_RED, 0, 0,0)
        # i+=1
    # i=0
    # while i < (len(D_gruposSemaforicosEst2)):
        #   ECICheckSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], D_RED, 0, 0,0)
        # i+=1
    # i=0
    # while i < (len(D_gruposSemaforicosEst3)):

```

```

                                #   ECICChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], D_RED, 0, 0,0)
        # i+=1
    # i=0
    # while i < (len(D_gruposSemaforicosEst4)):
                                #   ECICChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], D_RED 0, 0,0)
        # i+=1

    return 0

```

```

def AAPIManage(time, timeSta, timeTrans, cycle):
    global G_estagioIndex, _fase, tempolnicioFase, G_Tvs

    print("estagioIndex = %d" % G_estagioIndex)

    if G_estagioIndex == -1 or G_estagioIndex > D_NEstagios:
        i=0
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst1)):
                                ECICChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], D_GREEN, timeSta, time, cycle)
            i+=1
        G_estagioIndex = 1
        _fase = D_GREEN
        tempolnicioFase = timeSta
        print("Inicializou com _fase = %s" % _fase)

    i=0

    ZonaDilema(time, timeSta, timeTrans, cycle, G_estagioIndex,
GL_Tv[G_estagioIndex])

```

```
EntrePedestres(time, timeSta, timeTrans, cycle)
```

```
#Decisao sobre a troca de fase
```

```
    if _fase == D_GREEN and timeSta >= (GL_Tv[G_estagioIndex]
+tempoInicioFase):
```

```
    if G_estagioIndex != 4 and GL_Tv[G_estagioIndex] != 0:
```

```
        G_Tvs.append(GL_Tv[G_estagioIndex])
```

```
        _fase = D_YELLOW
```

```
        tempoInicioFase = timeSta
```

```
        MudaSinal(D_YELLOW, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
```

```
    elif _fase == D_YELLOW and timeSta >= (GL-Ta[G_estagioIndex]
+tempoInicioFase):
```

```
        _fase = D_RED
```

```
        tempoInicioFase = timeSta
```

```
        MudaSinal(D_RED, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
```

```
    elif _fase == D_RED and timeSta >= (GL_Tvg[G_estagioIndex]
+tempoInicioFase):
```

```
        _fase = D_GREEN
```

```
        tempoInicioFase = timeSta
```

```
        G_estagioIndex = (G_estagioIndex+1) % D_NEstagios
```

```
        print("Indo ao estagio %d" % G_estagioIndex)
```

```
        MudaSinal(D_GREEN, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
```

```
    return 0
```

```
def AAPIPostManage(time, timeSta, timeTrans, cycle):
```

```
    return 0
```

```
def AAPIFinish():
```

```
media = sum(G_Tvs)/len(G_Tvs)
print("Media dos verdes atuados = %f" % media)
print("Contador Veiculos na zona do dilema = %d" % G_Dilemacounter)
```

```
media = sum(G_TentreP)/len(G_TentreP)
print("Media dos tempos entre pedestres = %f" % media)
return 0
```

```
def AAPIUnLoad():
    return 0
```

ANEXO B – CONTROLADOR EXTENSÃO DE VERDE

Segue o código em linguagem Python para o controlador de extensão de verde empregado nas simulações:

```
#Autor: Eduardo Delagnelo Barbetta
#Universidade Federal de Santa Catarina

from AAPI import *

#Definicoes

D_Interseccao = 454

D_NEstagios = 4 #Tem que contar com estagio 0

D_gruposSemaforicosEst1 = [2]
D_gruposSemaforicosEst2 = [1]
D_gruposSemaforicosEst3 = [4]
D_gruposSemaforicosEst4 = [3]

D_TipoDeVeiculo_TODOS = 0

D_Tzd = 2

#Cores
D_RED = 0
D_GREEN = 1
D_YELLOW = 2
D_FlashingRED = 4
```

```
#Parametros do controlador
# Listas iniciam com estagio 0

    #Lista dos tempos de verde minimo
GL_Tvmin = [0, 13, 12, 13, 11]
    #Lista com Extensao do verde
GL_Tev = [0, 1.1, 0.8, 1.1, 0]
    #Lista com os tempos de verde maximos
GL_Tvmax = [0, 60, 60, 60, 11]
    #Lista dos tempos de amarelo
GL_Ta = [0, 5, 4, 5, 8]
    #Lista dos tempos de vermelho geral
GL_Tvg = [0, 1, 2, 1, 3]
    #Id dos detectores usados em cada estagio, caso nao tenha detector usar
id = 0
GL_IdDetectores = [[0, 0, 0],
                   [629, 634, 616],
                   [631, 632, 617],
                   [630, 633, 615],
                   [0, 0, 0]]

#Variaveis Globais

G_estagioIndex = -1
G_Dilemacounter = 0
G_DilemaAux = 0

G_Tvs = []
G_TentreP = []

_fase = D_RED
```

```

    _tempoInicioFase = 0

    G_Tped = 0
    G_UltimoIndex = -1

    #Funcoes
    def ZonaDilema(time, timeSta, timeTrans, cycle, _index, _Tv):
        #Funcao para reducao de colisoes traseiras, minimizando o numero de
veiculos
        # na zona de dilema na troca do sinal verde para sinal amarelo com o tempo
de verde passivo
        global G_Dilemacounter, G_DilemaAux
        if timeSta >= _Tv - D_Tzd + _tempoInicioFase:
            if AKIDetGetPresenceCyclebyId(GL_IdDetectores[_index][1],
D_TipoDeVeiculo_TODOS) > 0:
                G_Dilemacounter += 1
                G_DilemaAux += 1
            return 0

    def MudaSinal(cor, index, timeSta, time, cycle):
        i=0
        if index == 1:
            while i < (len(D_gruposSemaforicosEst1)):
                ECICChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], cor, timeSta, time, cycle)
                i+=1
        elif index == 2:
            while i < (len(D_gruposSemaforicosEst2)):
                ECICChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst2[i], cor, timeSta, time, cycle)
                i+=1
        elif index == 3:

```



```

    while i < (len(D_gruposSemaforicosEst3)):
        ECIChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst3[i], cor, timeSta, time, cycle)
        i+=1
    else:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst4)):
            ECIChangeSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst4[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1

```

```

return 0

```

```

def EntrePedestres(time, timeSta, timeTrans, cycle):

```

```

    global G_UltimoIndex, G_TentreP, G_Tped

```

```

    if G_estagioIndex != 4 and G_UltimoIndex == 4:

```

```

        G_Tped = timeSta

```

```

    if G_estagioIndex == 4 and G_UltimoIndex != 4:

```

```

        G_Tped = timeSta - G_Tped

```

```

        G_TentreP.append(G_Tped)

```

```

    if G_UltimoIndex != G_estagioIndex:

```

```

        G_UltimoIndex = G_estagioIndex

```

```

return 0

```

```

def AAPILoad():

```

```

    return 0

```

```

def AAPIInit():

```

```

    print("API Extensao de verde Init")

```

```
ECIDisableEvents(D_Interseccao)
```

```
return 0
```

```
def AAPIManage(time, timeSta, timeTrans, cycle):
```

```
    global G_estagioIndex, _fase, _tempoInicioFase, _Tv, G_Tvs,
    G_DilemaAux, G_Dilemacounter
```

```
    #Inicializa ou corrige o estagio para um estagio inicial
```

```
    if G_estagioIndex == -1 or G_estagioIndex > D_NEstagios:
```

```
        i=0
```

```
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst1)):
```

```
            ECIDisableSignalGroupState(D_Interseccao,
            D_gruposSemaforicosEst1[i], D_GREEN, timeSta, time, cycle)
```

```
            i+=1
```

```
            G_estagioIndex = 1
```

```
            _fase = D_GREEN
```

```
            _tempoInicioFase = timeSta
```

```
            _Tv = GL_Tvmin[G_estagioIndex]
```

```
            print("Inicializou no estagio %d" % G_estagioIndex)
```

```
    #Extensao de verde
```

```
        if timeSta >= GL_Tvmin[G_estagioIndex] - GL_Tev[G_estagioIndex] +
        _tempoInicioFase:
```

```
            if GL_IdDetectores[G_estagioIndex][2] != 0:
```

```
                if AKIDetGetPresenceCyclebyId(GL_IdDetectores[G_estagioIndex]
                [2], D_TipoDeVeiculo_TODOS) > 0:
```

```
                    _Tv += GL_Tev[G_estagioIndex]
```

```
                    _Tv = min(_Tv, GL_Tvmax[G_estagioIndex])
```

```
                    G_Dilemacounter -= G_DilemaAux
```

```
                    G_DilemaAux = 0
```

```
print("Estendeu Verde no estagio %d para %f" % (G_estagioIndex,
_Tv))
```

```
ZonaDilema(time, timeSta, timeTrans, cycle, G_estagioIndex, _Tv)
EntrePedestres(time, timeSta, timeTrans, cycle)
```

```
#Decisao sobre a troca de fase
```

```
if _fase == D_GREEN and timeSta >= (round(_Tv,0)+_tempoInicioFase):
```

```
    if G_estagioIndex != 4 and _Tv != 0:
```

```
        G_Tvs.append(_Tv)
```

```
        _fase = D_YELLOW
```

```
        _tempoInicioFase = timeSta
```

```
        MudaSinal(D_YELLOW, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
```

```
    elif _fase == D_YELLOW and timeSta >= (GL-Ta[G_estagioIndex]
+_tempoInicioFase):
```

```
        _fase = D_RED
```

```
        _tempoInicioFase = timeSta
```

```
        MudaSinal(D_RED, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
```

```
        G_DilemaAux = 0
```

```
    elif _fase == D_RED and timeSta >= (GL_Tvg[G_estagioIndex]
+_tempoInicioFase):
```

```
        _fase = D_GREEN
```

```
        _tempoInicioFase = timeSta
```

```
        G_estagioIndex = (G_estagioIndex+1) % D_NEstagios
```

```
        print("Indo ao estagio %d" % G_estagioIndex)
```

```
        MudaSinal(D_GREEN, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
```

```
_Tv = GL_Tvmin[G_estagioIndex]
```

```
return 0
```

```
def AAPIPostManage(time, timeSta, timeTrans, cycle):
```

```
    return 0
```

```
def AAPIFinish():
```

```
    media = sum(G_Tvs)/len(G_Tvs)
```

```
    print("Media dos verdes atuados = %f" % media)
```

```
    print("Contador Veiculos na zona do dilema = %d" % G_Dilemacounter)
```

```
    media = sum(G_TentreP)/len(G_TentreP)
```

```
    print("Media dos tempos entre pedestres = %f" % media)
```

```
    #print(G_Tvs)
```

```
    return 0
```

```
def AAPIUnLoad():
```

```
    return 0
```

ANEXO C – CONTROLADOR PROPOSTO

Segue o código em linguagem Python para o controlador proposto empregado nas simulações:

```
#Autor: Eduardo Delagnelo Barbetta
#Universidade Federal de Santa Catarina

from AAPI import *

#Definicoes

D_Interseccao = 454

D_NEstagios = 4 #Tem que contar com estagio 0

D_gruposSemaforicosEst1 = [2] #Via principal sentido sul
D_gruposSemaforicosEst2 = [1] #Via secundaria
D_gruposSemaforicosEst3 = [4] #Via principal sentido norte
D_gruposSemaforicosEst4 = [3] #Pedestres

D_TipoDeVeiculo_TODOS = 0

D_TaxaPedestres = 10

#Cores
D_RED = 0
D_GREEN = 1
D_YELLOW = 2
D_FlashingRED = 4
```

#Parametros do controlador

Listas iniciam com estagio 0

#Lista dos tempos de verde minimo

GL_Tvmin = [0, 16, 16, 16, 11]

#Lista com Estensao do verde

GL_Tev = [0, 1.1, 0.8, 1.1, 0]

#Lista com os tempos de verde maximos

GL_Tvmax = [0, 60, 60, 60, 11]

#Lista dos tempos de amarelo

GL_Ta = [0, 5, 4, 5, 8]

#Lista dos tempos de vermelho geral

GL_Tvg = [0, 1, 2, 1, 3]

#Id dos detectores usados em cada estagio, caso nao tenha detector usar

id = 0

#O sensor 0 deve ter capacidade de identificar veiculos equipados

GL_IdDetectores = [[0, 0, 0],

[629, 634, 616],

[631, 632, 617],

[630, 633, 615],

[0, 0, 0]]

D_CoeficienteEspera = 1.5

D_DemandaOnibus = 50

D_Tvp = 2

D_Tzd = 2

D_DemandaVia = [0, 5, 3, 7, 11]

```
D_MaxDemanda = [1000, 10000, 8000, 10000, 5000] #Fila residual retem
parte da demanda tambem
```

```
#[1000, 10000, 8000, 10000, 5000]
```

```
#Variaveis Globais
```

```
G_estagioIndex = -1
```

```
G_flagO = False #Flag indicando se a funcao O ja ocorreu no estagio atual
```

```
G_Tvs = [] #lista com os tempos de verde para calculo das medias
```

```
G_TentreP = []
```

```
G_Lcounter = 0
```

```
G_Hcounter = 0
```

```
G_Ocounter = 0
```

```
G_Dilemacounter = 0
```

```
G_Demanda = [0, 0, 0, 0, 0] #lista das demandas referentes a cada estagio
```

```
_fase = D_RED
```

```
_tempoInicioFase = 0
```

```
G_Tped = 0
```

```
G_UltimoIndex = -1
```

```
#Funcoes
```

```
def FuncaoL(time, timeSta, timeTrans, cycle, _index):
```

```
#Funcao que da prioridade a veiculos pesados na interseccao
```

```
#Utilizaria a combinacao de dois sensores, mas esta
```

```
# utilizando um sensor com deteccao de veiculo equipado
```

```
    global G_Demanda, G_Lcounter
```

```

        if AKIDetGetPresenceCyclebyId(GL_IdDetectores[_index][0],
D_TipoDeVeiculo_TODOS):
            G_Demanda[_index] += D_DemandaVia[_index]

if
AKIDetGetNbVehsEquippedInDetectionCyclebyId(GL_IdDetectores[_index]
[0],D_TipoDeVeiculo_TODOS) > 0:
    G_Demanda[_index] += D_DemandaOnibus
    G_Lcounter+=1

return 0

def FuncaoH(time, timeSta, timeTrans, cycle, _index, _Tv):
#Funcao de prioridade da via, tratando da extensao do tempo de verde
    global G_Hcounter, G_flagO, G_Ocounter

#Extensao de verde
    if timeSta >= GL_Tvmin[_index] - GL_Tev[_index] + _tempoInicioFase:
        if AKIDetGetPresenceCyclebyId(GL_IdDetectores[_index][2],
D_TipoDeVeiculo_TODOS) > 0:
            _Tv += GL_Tev[_index]
            _Tv = min(_Tv, GL_Tvmax[_index])
            print("Estendeu Verde no estagio %d para %f" % (_index, _Tv))
            G_Hcounter += 1
            if G_flagO == True :
                G_flagO = False
                G_Ocounter -= 1
                _Tv -= D_Tvp

return _Tv

def FuncaoO(time, timeSta, timeTrans, cycle, _index, _Tv):

```



```
#Funcao para reducao de colisoes traseiras, minimizando o numero de
veiculos
```

```
# na zona de dilema na troca do sinal verde para sinal amarelo com o tempo
de verde passivo
```

```
global G_Ocounter, G_flagO, G_Dilemacounter
```

```
if timeSta >= _Tv - D_Tzd + _tempolnicioFase:
```

```
    if AKIDetGetPresenceCyclebyId(GL_IdDetectores[_index][1],
D_TipoDeVeiculo_TODOS) > 0:
```

```
        if G_flagO == False:
```

```
            _Tv += D_Tvp #D_Tzd -(_Tv - D_Tzd + _tempolnicioFase -
timeSta)
```

```
                G_flagO = True
```

```
                G_Ocounter += 1
```

```
                print("Funcao O adicionou verde passivo")
```

```
        else:
```

```
            G_Dilemacounter += 1
```

```
    return _Tv
```

```
def AtualizaDemandasAoSelecionarEstagio(_index_estagio):
```

```
#Ao selecionar um estagio para permitir passagem, os outros recebem uma
compensacao
```

```
global G_Demanda
```

```
i=0
```

```
while i < len(G_Demanda):
```

```
    G_Demanda[i] *= D_CoeficienteEspera
```

```
    i+=1
```

```
    G_Demanda[_index_estagio] = 0#max(0,G_Demanda[_index_estagio]-
D_MaxDemanda[_index_estagio])
```

```
    return 0
```

```
def ProcuraMaiorDemanda():
```

```
#Procura estagio com maior demanda e retorna o estagio/index
```

```

i=0
maior = 0
index_maior = 0
while i < len(G_Demanda):
    if(G_Demanda[i] > maior):
        maior = G_Demanda[i]
        index_maior = i
    i += 1
#Se nao houver demanda deve retornar index 0
return index_maior

def DetectaPedestre(time):
    global G_Demanda
    G_Demanda[4] += D_DemandaVia[4]
    print("Criou demanda de pedestre no tempo %d" % time)
    return 0

def MudaSinal(cor, index, timeSta, time, cycle):
    i=0
    if index == 1:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst1)):
            ECICheckSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst1[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1
    elif index == 2:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst2)):
            ECICheckSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst2[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1
    elif index == 3:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst3)):
            ECICheckSignalGroupState(D_Interseccao,
D_gruposSemaforicosEst3[i], cor, timeSta, time, cycle)

```

```

        i+=1
    elif index == 4:
        while i < (len(D_gruposSemaforicosEst4)):
            ECIDisableEvents(D_Interseccao,
                D_gruposSemaforicosEst4[i], cor, timeSta, time, cycle)
            i+=1

    return 0

def EntrePedestres(time, timeSta, timeTrans, cycle):
    global G_UltimoIndex, G_TentreP, G_Tped

    if G_estagioIndex != 4 and G_UltimoIndex == 4:
        G_Tped = timeSta

    if G_estagioIndex == 4 and G_UltimoIndex != 4:
        G_Tped = timeSta - G_Tped
        G_TentreP.append(G_Tped)

    if G_UltimoIndex != G_estagioIndex:
        G_UltimoIndex = G_estagioIndex

    return 0

def AAPILoad():
    return 0

def AAPIIInit():
    print("API Extensao de verde Init")
    ECIDisableEvents(D_Interseccao)

```

```
return 0
```

```
def AAPIManage(time, timeSta, timeTrans, cycle):
```

```
    global G_estagioIndex, _fase, _tempolnicioFase, _Tv, G_Tvs, G_flagO
```

```
    #Inicializa ou corrige o estagio para um estagio inicial
```

```
    if G_estagioIndex == -1 or G_estagioIndex > D_NEstagios:
```

```
        G_estagioIndex = 0
```

```
        _fase = D_RED
```

```
        _tempolnicioFase = timeSta
```

```
        _Tv = GL_Tvmin[G_estagioIndex]
```

```
        print("Inicializou no estagio %d" % G_estagioIndex)
```

```
    #Detecoes para as Funcoes L H e O
```

```
    if AKIDetGetNbMeasuresAvailableInstantDetection() > 0:
```

```
        i=0
```

```
        while i < D_NEstagios:
```

```
            if GL_IdDetectores[i][0] != 0:
```

```
                if i != G_estagioIndex or (i == G_estagioIndex and _fase !=
```

```
D_GREEN):
```

```
                    FuncaoL(time, timeSta, timeTrans, cycle, i)
```

```
                if i == G_estagioIndex and GL_IdDetectores[G_estagioIndex][1] != 0:
```

```
                    _Tv = FuncaoH(time, timeSta, timeTrans, cycle, i, _Tv)
```

```
                    _Tv = FuncaoO(time, timeSta, timeTrans, cycle, i, _Tv)
```

```
                i+=1
```

```
    #Simula demanda de Pedestres
```

```
    if time % D_TaxaPedestres == 0:
```

```
        DetectaPedestre(time)
```

```
    EntrePedestres(time, timeSta, timeTrans, cycle)
```

```

#Decisao sobre a troca de fase
if _fase == D_GREEN and timeSta >= (round(_Tv,0)+_tempolnicioFase):
    if G_estagioIndex != 4 and _Tv != 0:
        G_Tvs.append(_Tv)

        _fase = D_YELLOW
        _tempolnicioFase = timeSta
        MudaSinal(D_YELLOW, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)

    elif _fase == D_YELLOW and timeSta >= (GL_Ta[G_estagioIndex]
+ _tempolnicioFase):
        _fase = D_RED
        _tempolnicioFase = timeSta
        MudaSinal(D_RED, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)

    elif _fase == D_RED and timeSta >= (GL_Tvg[G_estagioIndex]
+ _tempolnicioFase):
        _tempolnicioFase = timeSta
        G_estagioIndex = ProcuraMaiorDemanda()
        print("Indo ao estagio %d, com demanda %d" % (G_estagioIndex,
G_Demanda[G_estagioIndex]))

if G_estagioIndex == 0:
    _fase = D_RED
else:
    _fase = D_GREEN
    MudaSinal(D_GREEN, G_estagioIndex, timeSta, time, cycle)
    _Tv = GL_Tvmin[G_estagioIndex]
    AtualizaDemandasAoSelecionarEstagio(G_estagioIndex)
    G_flagO = False

```

```
return 0
```

```
def AAPIPostManage(time, timeSta, timeTrans, cycle):
```

```
    return 0
```

```
def AAPIFinish():
```

```
    media = sum(G_Tvs)/len(G_Tvs)
```

```
    print("Media dos verdes atuados = %f" % media)
```

```
    print("Contador funcao L = %d" % G_Lcounter)
```

```
    print("Contador funcao H = %d" % G_Hcounter)
```

```
    print("Contador funcao O = %d" % G_Ocounter)
```

```
    print("Contador Veiculos na zona do dilema = %d" % G_Dilemacounter)
```

```
    media = sum(G_TentreP)/len(G_TentreP)
```

```
    print("Media dos tempos entre pedestres = %f" % media)
```

```
return 0
```

```
def AAPIUnLoad():
```

```
    return 0
```