

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO DE ENGENHARIA DE COMPUTAÇÃO

EDUARDO ALBERTO SCHMOLLER

**TÉCNICAS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO APLICADAS
AO GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO URBANO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2018

EDUARDO ALBERTO SCHMOLLER

**TÉCNICAS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO APLICADAS
AO GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO URBANO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Computação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro de Computação

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Teixeira

PATO BRANCO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

Às 13 horas e 50 minutos do dia 21 de junho de 2018, na sala V108, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Pato Branco, reuniu-se a banca examinadora composta pelos professores Marcelo Teixeira (orientador), Eden Ricardo Dosciatti e para avaliar o trabalho de conclusão de curso com o título **Técnicas de modelagem e simulação aplicadas ao gerenciamento de tráfego urbano**, do aluno **Eduardo Alberto Schmoller**, matrícula 01494244, do curso de Engenharia de Computação. Após a apresentação o candidato foi arguido pela banca examinadora. Em seguida foi realizada a deliberação pela banca examinadora que considerou o trabalho aprovado.

Marcelo Teixeira
Orientador (UTFPR)

Eden Ricardo Dosciatti
(UTFPR)

Pablo Gauterio Cavalcanti
(UTFPR)

Profa. Beatriz Terezinha Borsoi
Coordenador de TCC

Prof. Pablo Gauterio Cavalcanti
Coordenador do Curso de
Engenharia de Computação

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.

RESUMO

SCHMOLLER, Eduardo Alberto. TÉCNICAS DE MODELAGEM E SIMULAÇÃO APLICADAS AO GERENCIAMENTO DE TRÁFEGO URBANO. 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

Neste trabalho são apresentadas as etapas de modelagem e análise de um sistema de tráfego urbano, composto por um conjunto de vias e de cruzamentos com controle de passagem através de semáforos.

Modelagem do sistema utilizando *Redes de Petri*, avaliação dos modelos com parâmetros estáticos e com variação de valores. Simulação dos modelos desenvolvidos com o uso da ferramenta *TimeNet 4.4*.

Primeiramente através de levantamento de modelo para um cruzamento simples com 4 vias e posteriormente o modelo foi incrementado para um conjunto de 10 vias e 3 cruzamentos.

O trabalho mostra, então, que a partir da composição de modelos simples, que representam apenas um cruzamento, pode-se evoluir para a representação de um sistema com dimensões e complexidade maiores.

Palavras-chave: Modelagem, Redes de Petri, Tráfego Urbano

ABSTRACT

SCHMOLLER, Eduardo Alberto. . 29 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia de Computação, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2018.

In this work the modeling and analysis stages of an urban traffic system, composed of a set of roads and crossings with traffic control through traffic lights, are presented.

Modeling of the system using *Petri nets*, evaluation of the models with static parameters and with variation of values. Simulation of the models developed with the use of the tool *TimeNet 4.4*.

Firstly, by means of a model survey for a simple 4-way crossing, the model was then incremented to a set of 10 roads and 3 crossings.

The work shows, then, that from the composition of simple models, which represent only a cross, one can evolve to the representation of a system with larger dimensions and complexity.

Keywords: Modeling, Petri Nets, Urban Traffic

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	– Ativação de uma transição	16
FIGURA 2	– Cruzamento de vias	18
FIGURA 3	– Modelo Utilizando Rede de Petri para um cruzamento ...	19
FIGURA 4	– Variação do tamanho da fila com a variação do tempo de verde	22
FIGURA 5	– Variação do tempo de espera com a variação do tempo de verde	23
FIGURA 6	– Múltiplos Cruzamentos de vias	23
FIGURA 7	– Modelo de Rede de Petri para múltiplos cruzamentos	24
FIGURA 8	– Influência da taxa de chegada (primeiro cruzamento) no tamanho da fila (segundo cruzamento)	25
FIGURA 9	– Impacto do tamanho da fila no cruzamento 3 com o aumento da taxa de saída no cruzamento 1 através da via 3	25

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- Tempos e Tamanho da fila (2 veículos/segundo)	21
TABELA 2	- Tempos e Tamanho da fila (5 veículos/segundo)	21

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
1.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRÁFEGO	11
2.2	SISTEMA DE TRÁFEGO MODELADO COMO REDE DE PETRI	13
2.3	REDES DE PETRI	14
3	MODELO DE ANÁLISE DE TRÁFEGO	18
3.1	PROPOSTA DE MODELAGEM DE CRUZAMENTO SIMPLES	18
3.1.1	Avaliação do modelo	20
3.2	PROPOSTA DE MODELAGEM DE MÚLTIPLOS CRUZAMENTOS	23
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	27
	REFERÊNCIAS	28

1 INTRODUÇÃO

O trânsito é fundamental para o transporte de bens e pessoas. Em países onde o meio de locomoção é baseado em malhas rodoviárias, como no Brasil, se observa uma situação de caos, que primeiro se abateu sobre os grandes centros, mas mais recentemente também afeta cidades de porte médio e até pequeno. Quando as pessoas são reféns de congestionamentos, elas perdem tempo, dinheiro, e elevam o seu grau de desgaste físico e mental. Uma boa coordenação do tráfego, principalmente através de controle semafórico apropriado, pode amenizar tais problemas (HAJIAHMADI et al., 2015; AZZUMAR et al., 2013), além de contribuir ambientalmente com a diminuição da poluição gerada por veículos com o consumo de combustível (WU et al., 2009; NORENA et al., 2015).

Os sistemas de controle de tráfego são constituídos principalmente por semáforos, que são programados com temporização fixa, ou sincronizada com outros semáforos (HUANG et al., 2014). Em geral, a sincronização semafórica melhora substancialmente a vazão do tráfego (JAMSHIDNEJAD et al., 2017), especialmente em vias críticas, com maior utilização que outras. Entretanto, o que se observa na prática é que as políticas de sincronização não absorvem por completo a dinâmica do tráfego, que se altera em grande e estocástica proporção em determinadas horas do dia. Dessa forma, ser capaz de flutuar a política de sincronização conforme a variação do tráfego, é determinante (SANG et al., 2017).

Melhorias nesse cenário podem requerer o ajuste periódico de toda a malha semafórica com base no estado corrente das vias. Entretanto, essa abordagem pode ser cara, uma vez que requer uma infraestrutura de monitoramento, seja por sensoriamento, análise de imagens, etc. Além do mais, a captura do estado atual de uma via não garante diretamente a implementação de um ajuste eficiente, uma vez que é necessário recalcular toda a estrutura de sincronização

que, quando apta a ser implementada, já pode estar obsoleta em face a um novo cenário de tráfego, que pode variar com bastante frequência.

Outra alternativa para o ajuste periódico da malha semaforica, que dispensa medições em tempo real sobre a via se dá por meio de simulações probabilísticas sobre utilização das vias em períodos esparsos (e críticos) no tempo. Nesse caso, o comportamento das vias pode ser modelado com base em amostras e históricos do fluxo e, sobre esse modelo, podem ser conduzidas análises para estimar previamente o efeito que um determinado fluxo, ou configuração de fluxos, causa no sistema de tráfego como um todo.

Dentro dessa abordagem, a teoria das *Redes de Petri* desponta como uma opção viável para a modelagem e a simulação de intersecções semaforicas, com foco na estimação de fluxos e filas. Redes de Petri definem uma estrutura matemática, com interfaceamento intuitivo, que pode ser usada para descrever a evolução de sistemas assíncronos complexos, caracterizados por concorrência, paralelismo, dependências, exclusão mútua, etc. Esse formalismo permite configurar e analisar, em um curto espaço de tempo, uma vasta relação de cenários possíveis (TEIXEIRA et al., 2015), o que o torna atrativo para aplicações em planejamento de capacidade, balanceamento de carga, entre outras (ALMEIDA; MENASCE, 2001).

Nesse trabalho, um tipo especial de Rede de Petri, chamadas *Generalized Stochastic Petri Nets* (MARSAN et al., 1995), serão utilizadas para modelar o comportamento de sistemas de tráfego em tempo discreto, como a entrada e a saída de veículos, e em tempo contínuo, como o fluxo de veículos em determinado setor.

Uma vez obtido um modelo para a estrutura de uma determinada via, esse modelo será simulado sob condições variáveis de tráfego e fluxo. Dessa simulação serão coletadas as estimativas que irão sugerir o grau de utilização de cada trecho da via modelada, bem como o grau médio geral de ocupação da via, para cada cenário configurado, entre outras análises. A variação das condições do tráfego é modelada pura e simplesmente pela variação dos parâmetros da rede, o que permite estimar diversos cenários de teste sem a necessidade de interferência ou construção do cenário real (NG et al., 2013). Por fim, as estimativas providas pelo modelo serão comparadas com um cenário para o qual é

implementada uma política semafórica de tempo fixo sincronizado.

Esquemáticamente, os objetivos específicos podem ser expostos conforme a seguir.

1.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Definir um exemplo de estrutura de vias;
2. Modelar o sistema de tráfego usando técnicas de modelagem estocástica com a utilização redes de petri;
3. Definir parâmetros iniciais das vias;
4. Simular modelos com parâmetros definidos;
5. Variar os parâmetros afim de coletar estimativas; e
6. Comparar as estimativas do experimento com a rede simulada sem variabilidade.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo serão abordados os principais tópicos acerca do trabalho a ser desenvolvido, através de uma revisão bibliográfica.

2.1 CARACTERIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE TRÁFEGO

Um modelo é um esquema que descreve o comportamento de um sistema real, suas teorias ou fenômenos e suas propriedades. Um modelo não visa descrever um sistema em todos os seus detalhes e com a mesma amplitude. Diferentemente, ele fornece uma abstração do comportamento real que em geral facilita alguma análise específica (CASSANDRAS, 1993).

Em sistemas de tráfego, por exemplo, um modelo macroscópico do sistema pode ser utilizado para simular a performance, o fluxo de tráfego, a velocidade média, etc. (AZZUMAR et al., 2013). Um modelo também pode incorporar requisitos, definições, técnicas, restrições, etc. Alguns tipos de modelos, como os de simulação, podem ainda ser manipulados computacionalmente para representar a dinâmica de um sistema ou processo ao longo do tempo (MOLLER, 2014). Em suma, um modelo permite que se teste o comportamento de um sistema, ou de parte dele, sob determinada condição variável. Isso é feito sem de fato agir sobre o sistema real.

No contexto dos sistemas de tráfego, tanto usuários como administradores de vias esperam que os sistemas de controle funcionem de maneira satisfatória, de modo a evitar ao máximo formação de filas e a lentidão no deslocamento de cargas e pessoas. A medida de desempenho em um sistema de tráfego pode ser dada em função do tempo gasto ou do número de paradas em um trecho. A melhoria do desempenho pode se dar com a implementação de sistemas de controle com suporte ao tratamento de conflitos e a determinação

de prioridades para o escoamento do fluxo, o que recai sobre um problema de otimização.

A otimização de sistemas é uma vasta área da matemática que busca encontrar a combinação que melhor se adapta a determinada condição, obedecendo os requisitos ou prioridades determinados. A otimização, então, se baseia nos modelos definidos para o sistema e em suas especificações. Contudo a modelagem de sistemas pode não ser uma tarefa trivial. O primeiro empecilho que se apresenta é definir o nível de abstração com que o sistema será representado no modelo. Representar todo o comportamento implica em considerar todas as variáveis que interferem e levam a mudanças nos estados do sistema, o que em geral resulta em estruturas grandes o suficiente para inviabilizar uma análise computacional pautada no espaço de estados. Por outro lado, representar um sistema usando um nível de abstração exageradamente alto implica em perda de observabilidade do sistema e, conseqüentemente, na redução das possibilidades de análises. De todo modo, a modelagem é uma tarefa de engenharia, que depende da experiência do projetista em observar detalhes e representar apenas aqueles que são essenciais ao modelo.

Em problemas envolvendo tráfego, a transposição de um sistema para um modelo se dá, em geral, considerando-se variáveis como a densidade de veículos, a velocidade de deslocamento e as taxas de escoamento (MOLLER, 2014). Essas variáveis estão no universo contínuo do tempo e, portanto, são naturalmente expressas por modelos que incorporam mecanismos de dinâmica contínua.

Em uma outra dimensão de problema, um sistema de tráfego pode ser resumido à ocorrência assíncrona de eventos. Em um sistema semaforico de tempo fixo, por exemplo, o evento que representa a troca de sinal é claramente disparado ao final da contagem do tempo, a chegada e a saída de veículos na via pode ser modelada por eventos que representem sinais de sensores, etc. Uma maneira intuitiva seria alterar o tempo de acordo com o horário do dia, por exemplo, levando em conta dados do fluxo observado durante um longo período de tempo. Um dos fatores que limitam a realização desse tipo de levantamento de dados históricos é o custo envolvido, como alocar recursos humanos para a contagem manual de veículos ou a instalação de sistemas

autônomos de contagem.

Uma outra opção para tentar otimizar um modelo discreto de tráfego seria estabelecer técnicas e condições que possibilitassem enriquecer a tomada de decisão semafórica com base no conhecimento que se tem do estado da via. A caracterização das filas e o ajuste na tomada de decisão podem então ser dados pela diferença da contagem desses eventos, habilidade que pode ser determinante para um controle mais preciso dos tempos semafóricos.

2.2 SISTEMA DE TRÁFEGO MODELADO COMO REDE DE PETRI

Partindo-se do pressuposto de que, em oposição à modelagem que faz uso de equações contínuas no tempo para descrever o tráfego de uma malha viária, pode-se fazer o uso de mecanismos que consideram entrada e saída de veículos do sistema para evolução do modelo. Um sistema de tráfego visto por essa perspectiva despreza o tempo e é dirigido por eventos, ou variáveis aleatórias, de entrada e saída.

Essa forma de observar o sistema leva a um modelo que simplifica a modelagem formal, pois elimina todas as demais variáveis de influência que deveriam ser consideradas em métodos de controle tradicionais. Assim a adaptação do modelo para diferentes requisitos e condições tende a ser simplificado.

Os sistemas que partilham dessa dinâmica de evoluções representadas como estados dados por conjuntos discretos e tem sua evolução dada pela ocorrência de eventos em tempos discretos do tempo e são representados, fazendo uso de estruturas de transição que permitem mapear a evolução de um sistema através de um espaço de estados, considerando apenas o que é relevante ao contexto abordado.

Embora seja útil para representar inúmeras características presentes nos Sistemas a Eventos Discretos, especialmente aquelas relacionadas com segurança, precisão e exatidão, a modelagem por máquinas de estados é limitada quando o objetivo é representar dinâmica de fluxo (PETRI, 1962).

O formalismo de Redes de Petri aparecem então como uma alternativa a tais limitações, permitindo utilizar variáveis aleatórias contínuas e discretas

para a representação de sistemas, o que incorpora a ideia de dinâmica de fluxo e possibilita uma representação mais adequada de comportamentos caracterizados por fluxo físico de informações, para os quais uma solução pode envolver um tratamento de ordem recursiva.

Redes de Petri são adotadas nesse trabalho para modelar um sistema de tráfego, permitindo que o formalismo matemático seja utilizado na forma de modelagem visual, além de permitir a criação de modelos que agrupem características como concorrência, sincronismo, compartilhamento de recursos, etc.

2.3 REDES DE PETRI

Redes de Petri (DESEL; REISIG, 1996) é um formalismo que combina um fundamento matemático com uma interface de modelagem intuitiva, permitindo modelar e avaliar sistemas com características complexas. Por possibilitarem representar concorrência, sincronismo e compartilhamento, as Redes de Petri se tornam uma opção natural para representar sistemas de tráfego.

Formalmente, uma Rede de Petri é composta de lugares (*Places*), transições (*Transitions*), que quando ativadas movimentam *Tokens*. Para representar condições os *Places* podem ser marcados com *Tokens* graficamente representados por pontos nos *Places*.

Uma extensão para Redes de Petri foi proposta por (MURATA, 1989) possibilitando a incorporação de tempo. Já as *Generalized Stochastic Petri Net* representam o tempo através de variáveis associadas a um tipo especial de transições, chamadas *transições temporizadas*. Quando o tempo não for relevante para o comportamento a ser modelado, Rede de Petri Estocástica Generalizada representa isso através de *transições imediatas*. Formalmente, uma Rede de Petri Estocástica Generalizada é representada por uma 7-upla $GSPN = \langle P, \tau, \Pi, I, O, M, W \rangle$, onde:

- $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ é um conjunto finito de lugares.
- $\tau = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ é um conjunto finito de transições.

- $\Pi : \tau \rightarrow \mathbb{N}$ é a função de prioridade, onde:

$$\Pi(t) = \begin{cases} \geq 1, & \text{se } t \in \tau \text{ é uma transição imediata;} \\ 0, & \text{se } t \in \tau \text{ é uma transição temporizada.} \end{cases}$$

- $I : (\tau \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ é a relação de entrada definindo os arcos dirigidos de *lugares* para *transições*.
- $O : (\tau \times P) \rightarrow \mathbb{N}$ é a relação de saída definindo os arcos dirigidos de *transições* para *lugares*.
- $M : P \rightarrow \mathbb{N}$ é a relação inicial de marcações, M define a quantidade de *Tokens* em cada *lugar*, definindo o estado atual da Rede de Petri Estocástica Generalizada.
- $W : \tau \rightarrow \mathbb{R}^+$ é função de pesos que representa os pesos de cada transição imediata (w_t) ou transição temporizada (λ_t), onde:

$$W(t) = \begin{cases} w_t \geq 0, & \text{se } t \in \tau \text{ é uma transição imediata;} \\ \lambda_t > 0, & \text{se } t \in \tau \text{ é uma transição temporizada.} \end{cases} \quad (1)$$

A relação entre lugares e transições é definida pelos conjuntos $\bullet t$ e $t\bullet$ definidos a seguir.

Definição 1: Dada uma transição $t \in \tau$, define-se:

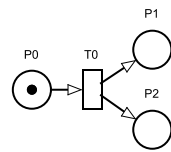
- $\bullet t = \{p \in P | I(t, p) > 0\}$ como a pré-condição de t ;
- $t\bullet = \{p \in P | O(t, p) > 0\}$ como a pós condição de t .

Apenas transições ativas podem ser executadas, transições imediatas são executadas assim que são ativadas. As regras de ativação e execução são definidas a seguir.

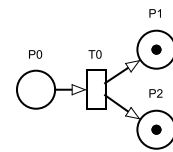
Definição 2 (Regra de ativação): Uma transição $t \in \tau$ é dita ativada em uma marcação M se e somente se: $\forall p \in \bullet t, M(p) \geq I(t, p)$.

Definição 3 (Regra de execução): A execução de uma transição $t \in \tau$, ativada e marcada em M leva a uma nova marcação M' de modo que: $\forall p \in (\bullet t \cup t \bullet), M'(p) = M(p) - I(t, p) + O(t, p)$.

O estado de uma Rede de Petri Estocástica Generalizada evolui quando uma transição ativa é executada. Exemplo de execução de uma transição pode ser visto na Figura 1.



(a) Pré condição de T0



(b) Pós condição de T0

Figura 1: Ativação de uma transição

Uma Rede de Petri Estocástica Generalizada é dita limitada se existe um limite $k > 0$ para o número de *tokens* em cada lugar, neste caso, existe a garantia que o espaço de estados gerado por uma Rede de Petri Estocástica Generalizada limitada é finito.

Quando o número de *tokens* em cada lugar p de t é n vezes maior que o mínimo necessário para ativar t ($\forall p \in \bullet t, M(p) \geq n \times I(t, p)$, onde $n \in \mathbb{N}$ e $n > 1$), isso permite que a transição seja ativada mais de uma vez. Neste caso a transição t é dita ativada com grau $n > 0$. A ativação de uma transição leva a uma das seguintes dinâmicas:

- *servidor-único*: n execuções sequenciais;
- *servidor-infinito*: n execuções paralelas;
- *k-servidor*: a transição é ativada até k vezes em paralelo, *tokens* que habilitam um grau maior que k são processados após as primeiras k execuções.

Redes de Petri Estocásticas Generalizadas permitem calcular medições por meio de simulações ou pela análise do espaço de estados, além disso, permite combinar modelos exponenciais para criar diferentes distribuições de tempo, que é útil na representação de comportamentos específicos de sistemas.

O capítulo seguinte apresenta uma proposta de trabalho que explora o uso de redes de Petri em cima de problemas reais de coordenação semafórica com objetivo de maximizar o escoamento de tráfego.

3 MODELO DE ANÁLISE DE TRÁFEGO

O acionamento semafórico para o controle do tráfego urbano possui uma premissa básica que é a maximização do escoamento das filas. Para isso, em geral, são adotadas políticas que alteram os tempos dos estágios semafóricos tendo como base o histórico de variação do fluxo de veículos (WANG et al., 2016). A coleta e a acurácia desse histórico é, portanto, decisivo para a qualidade do resultado do processo sob controle. Sob outra perspectiva, esse histórico pode ainda ser usado para alimentar um modelo que, a partir dele, possa prover informações úteis em caráter preditivo.

3.1 PROPOSTA DE MODELAGEM DE CRUZAMENTO SIMPLES

Para fins práticos e de viabilidade, esta proposta delimita o modelo e a análise dos resultados de simulações de uma estrutura distinta de vias, com características de representatividade. Trata-se de um cruzamento com as sinalizações semafóricas conforme mostra a Figura 2.

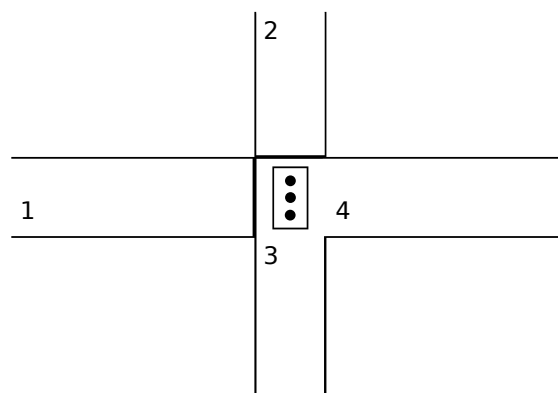


Figura 2: Cruzamento de vias

Essa estrutura pode ser modelada e utilizada para a realização de testes

de impacto sobre uma dada configuração da via, variação dos parâmetros com objetivo de obter estatísticas relacionadas com a variação de tempos semafóricos e demanda de veículos, etc.

O cruzamento proposto é composto por 4 vias enumeradas de 1 a 4. Na via 1 os veículos se deslocam da esquerda para a direita e ao chegarem ao cruzamento tem como opção seguirem adiante pelas vias 3 ou 4. Da mesma forma os veículos que utilizam a via 2 se deslocam de cima para baixo e ao chegarem ao cruzamento podem seguir adiante através da via 3 ou 4.

A modelagem e simulação do modelo proposto foi realizada por meio da ferramenta *TimeNet 4.4* (TIMENET, 2015), que possibilita, além da modelagem, executar avaliações sobre o modelo com parâmetros de entrada variáveis como taxa de veículos entrando em determinada via ou tempos semafóricos, e medição de variáveis como tamanho de filas, fluxo e utilização de determinado recurso, etc.

O modelo proposto para um cruzamento de duas vias de sentido único, que permite mensurar fila e tempo de espera na via 1, é apresentado na Figura 3. Entretanto, a mesma ideia é ampliável para qualquer outro cenário de vias.

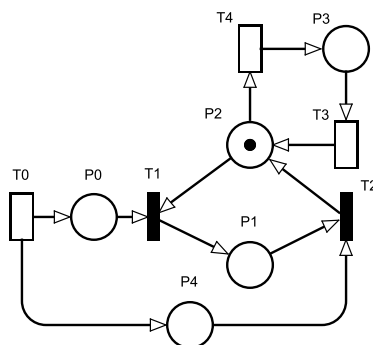


Figura 3: Modelo Utilizando Rede de Petri para um cruzamento

O modelo representa a chegada de veículos na via 1 através da transição **T0**. A ativação da transição representa a chegada de um veículo na fila para utilização do cruzamento. A definição da taxa de chegada de veículos é feita através do *delay* entre sucessivas ativações da transição, e é definido como:

$$taxa = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

em que *taxa* é medido em veículos por segundo e λ representa a diferença de

tempo entre a chegada de dois veículos dado em *segundos*.

Na ocorrência da transição **T0**, *tokens* são inseridos em **P0**, que representa a via 1, e em **P4**, que é utilizado para o levantamento do tempo médio de espera para utilização do cruzamento, pois os *tokens* são adicionados na entrada do veículo na via e removidos na saída do veículo do cruzamento.

A quantidade de *tokens* em **P0** representa a quantidade de veículos que estão na via 1 e aguardam para utilizarem o cruzamento, portando, representa o tamanho da fila. O tamanho das filas é medido por meio do valor esperado para a quantidade de *tokens* presentes em **P0**.

A presença de um *token* em **P2** representa que o semáforo está em verde e os veículos são liberados a passar pelo cruzamento. As transições **T3** e **T4** representam a mudanças de estados entre verde e vermelho. A presença de um *token* em **P3** representa que o semáforo está vermelho. Em cada momento não existirá *tokens* simultaneamente em **P2** e **P3** permitindo assim representar a passagem e bloqueio de veículos no cruzamento.

O controle de passagem no semáforo é possível pois para a transição **T1** ser ativada é necessário que exista um *token* em **P0** e um *token* em **P2**. Quando a transição é ativada os *tokens* são retirados dos *places* e um *token* é inserido em **P1**. O *place* **P1** intermediário representa que um veículo está utilizando o cruzamento.

3.1.1 AVALIAÇÃO DO MODELO

A avaliação do tamanho das filas e do tempo de espera é feita através das fórmulas de medição no *TimeNet 4.4*:

$$Fila = (\#P0); \quad (3)$$

$$Espera = \frac{(\#P4)}{taxa}. \quad (4)$$

Nesse caso, $(\#P0)$ retorna o valor esperado para o número de *tokens* no *place* **P0**, enquanto $(\#P4)$ retorna o valor esperado de *tokens* no *place* **P4**.

As tabelas 1 e 2 apresentam relações entre os parâmetros que podem ser variados no modelo de cruzamento simples: taxa de chegada, tempo verde e tempo vermelho, e parâmetros que podem ser avaliados: tamanho de fila e tempo médio de espera.

Tabela 1: Tempos e Tamanho da fila (2 veículos/segundo)

taxa (<i>veiculos/s</i>)	Verde (s)	Vermelho (s)	Fila (<i>veiculos</i>)	Espera (s)
2	5	5	5,13	2,57
2	5	10	13,70	6,93
2	10	5	3,39	1,7
2	10	10	10,27	5,13
2	10	20	26,34	13,17
2	20	10	6,64	3,32

A Tabela 1 mostra a relação entre os tempos e os tamanho da fila, de modo que com o aumento do tempo de verde a fila tende a diminuir e com o aumento do tempo vermelho a fila tende a aumentar. Como em um caso real com um tempo verde maior os veículos não serão obrigados a esperar o cruzamento ser liberado e rapidamente saem da via, por outro lado se o tempo de vermelho aumentar os veículos serão obrigados a esperar mais tempo no cruzamento levando a uma fila maior e um tempo médio para saída da via maior.

Tabela 2: Tempos e Tamanho da fila (5 veículos/segundo)

taxa (<i>veiculos/s</i>)	Verde (s)	Vermelho (s)	Fila (<i>veiculos</i>)	Espera (s)
5	5	5	12,18	2,43
5	5	10	33,49	6,69
5	10	5	8,51	1,70
5	10	10	23,49	4,70
5	10	20	66,09	13,22
5	20	10	16,51	3,30

A Tabela 2 compara as mesmas estimativas da Tabela 1 com a alteração da taxa de chegada de veículo na via. Observa-se que o aumento da taxa de chegada leva ao aumento do tamanho da fila e também a um aumento do tempo médio de espera no cruzamento, conforme esperado.

A Figura 4 mostra um gráfico da relação entre o tamanho da fila e o tempo verde do semáforo. Mantendo o tempo vermelho fixo em 10 segundo e taxa de chegada em 2 veículos por segundo, varia-se o tempo verde partindo de

cinco segundos até quinze segundos com passo de um segundo e realiza-se a medida do tamanho da fila na via 1, representado pelo valor esperado de *tokens* no lugar P0.

Observa-se a tendência de redução da quantidade de veículos na fila ao passo que aumenta-se o tempo verde, conforme esperado em um cruzamento real, no gráfico em cinza está destacado o tamanho da fila para valores de tempo fixos em dez segundos, é possível ainda observar que existem valores em que o tamanho da fila é menor que para os valores fixos, deste modo, pode-se utilizar da mudança de tempo para priorizar vias ou conjunto de vias.

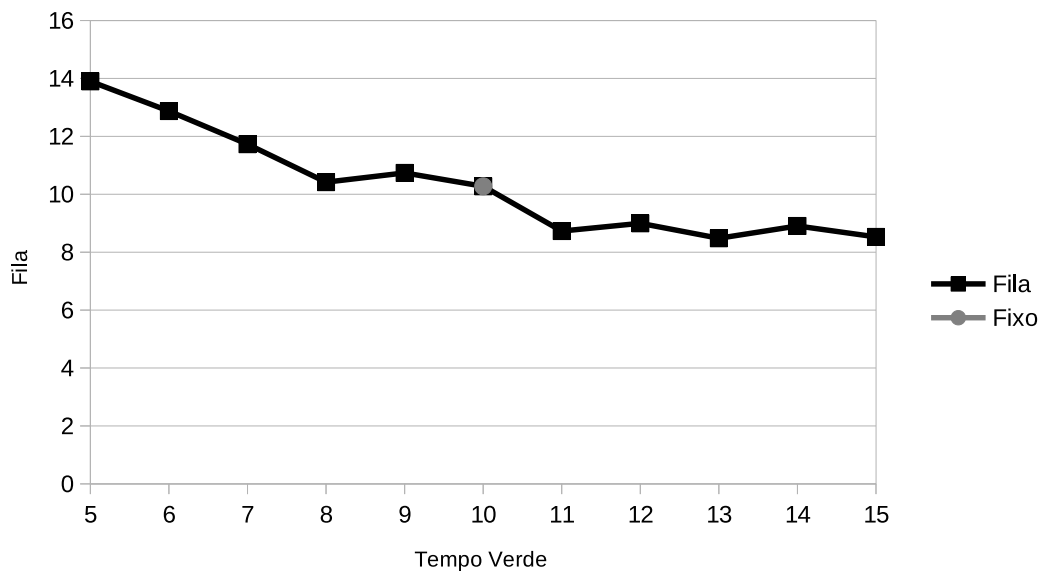


Figura 4: Variação do tamanho da fila com a variação do tempo de verde

A Figura 5 mostra a relação entre o tempo médio de espera e o tempo verde do semáforo. Mantendo o tempo vermelho fixo em 10 segundos e taxa de chegada em 2 veículos por segundo, varia-se o tempo verde partindo de cinco segundos até quinze segundos com passo de um segundo e realiza a medida do tempo médio de espera na via 1. Conforme esperado, com o aumento do tempo verde a tendência é o tempo de espera diminuir, para fins de comparação, em cinza é apresentado o tempo de espera com os valores do tempo verde e vermelho fixados em dez segundos.

Conforme observado nos gráficos e tabelas, o modelo proposto para um único cruzamento representa o comportamento que se observaria em um

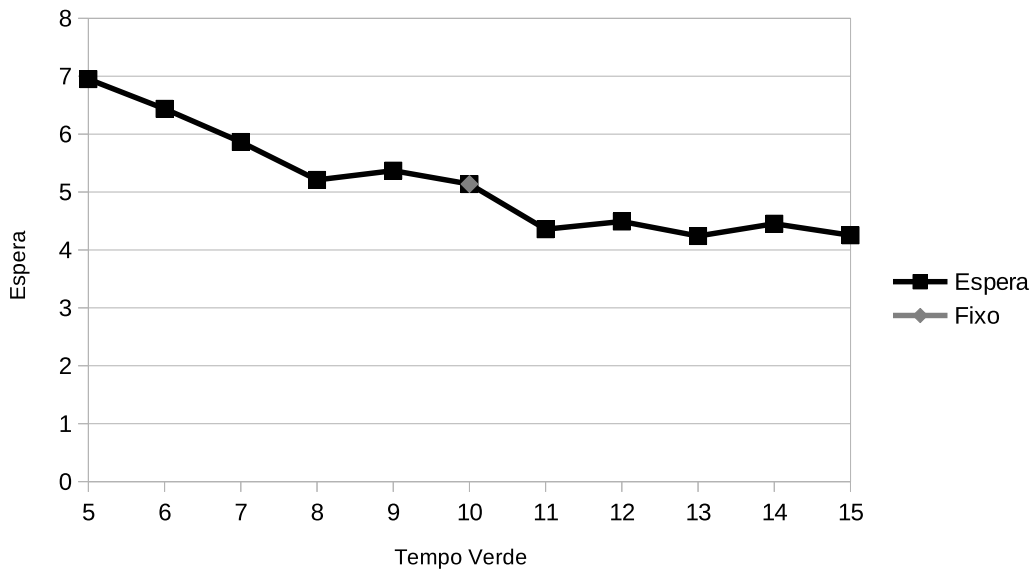


Figura 5: Variação do tempo de espera com a variação do tempo de verde cenário real com as mesmas características.

3.2 PROPOSTA DE MODELAGEM DE MÚLTIPLOS CRUZAMENTOS

A Figura 6 representa um conjunto de cruzamentos, composto por 10 vias e 3 intersecções. Veículos trafegando pelas vias 1 e 2 ao chegarem ao cruzamento tem a opção de seguir pelas vias 3 ou 4. Veículos trafegando pelas vias 4 e 6 ao chegarem ao cruzamento tem a opção de seguir pelas vias 5 ou 7. Veículos trafegando pelas vias 7 e 8 ao chegarem ao cruzamento tem a opção de seguir pelas vias 9 ou 10. O conjunto proposto é uma extensão do conjunto descrito anteriormente e segue as mesmas bases de funcionamento.

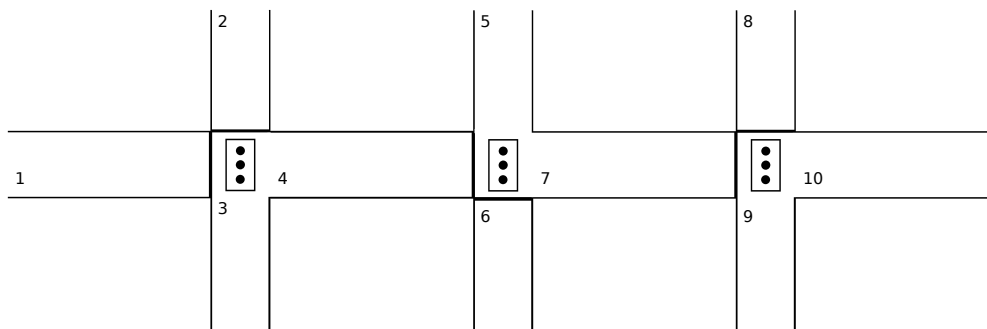


Figura 6: Múltiplos Cruzamentos de vias

A Figura 7 apresenta o modelo proposto para a avaliação de múltiplos

cruzamentos. Ele permite a verificação da relação entre os tempos de verde e vermelho de múltiplos semáforos e tamanho de filas e o tempo de espera geral, sem levar em consideração atrasos ou sincronização da abertura dos sinais. Para simulação é considerado o estado inicial de todos os sinais como aberto.

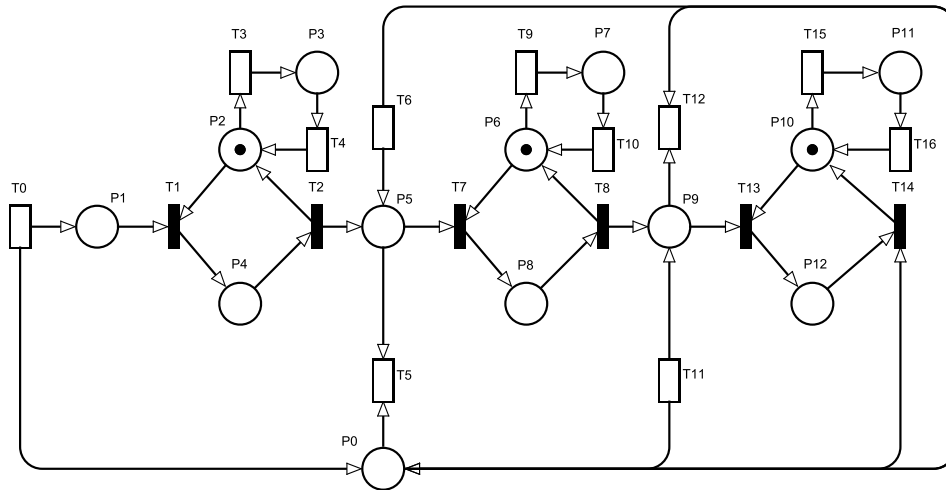


Figura 7: Modelo de Rede de Petri para múltiplos cruzamentos

O modelo ilustrado pela Figura 7 representa a composição de múltiplos cruzamentos consecutivos de uma via. Com ele, pode-se, por exemplo, medir a influência da mudança de tempo de algum semáforo sobre o tamanho da fila em outro cruzamento.

Neste caso particular permite-se variar as taxas de entrada pelas vias 1, 2, e 6 que são representadas pelas transições **T0**, **T6** e **T11** respectivamente, variar as taxas de saída através das ruas 3 e 5 representadas pelas transições **T5**, **T12** respectivamente, e avaliar os tamanhos das filas nas vias 1, 4 e 7 representados pelos lugares **P1**, **P5** e **P9** respectivamente.

A Figura 8 apresenta os valores calculados para o tamanho da fila do terceiro cruzamento representado pelo lugar **P9** e com variação da taxa de chegada no primeiro cruzamento, como esperado o aumento da taxa de chegada leva ao aumento do tamanho da fila. Como base para comparação em cor cinza é apresentado o valor esperado para o tamanho da fila quando a taxa de chegada é mantida constante, 5 veículos por segundo.

É possível ainda simular o impacto no tamanho da fila no terceiro cruzamento, aumentando-se a taxa de escoamento pela via 3, como mostra o gráfico apresentado na Figura 9.

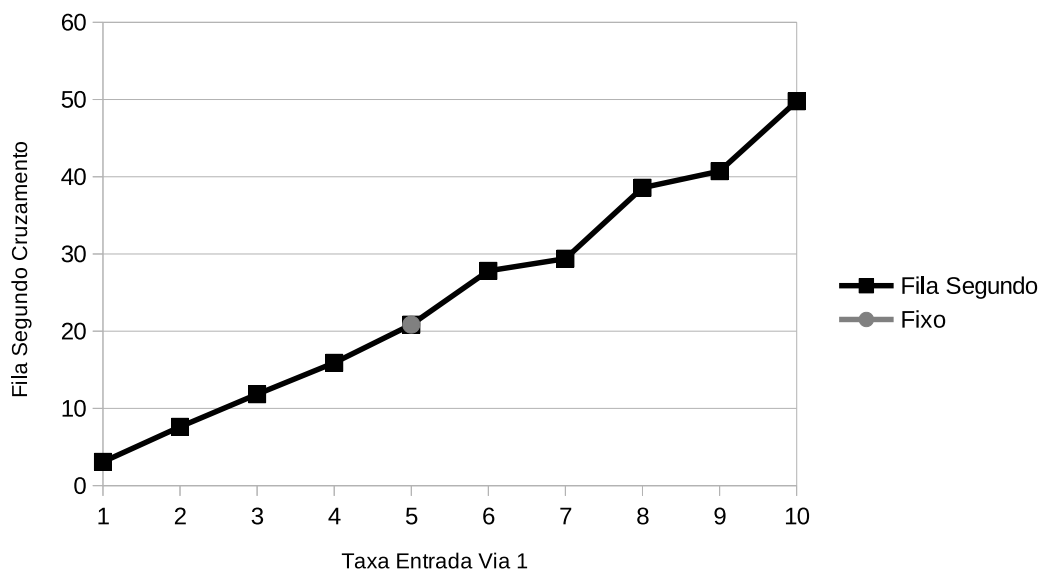


Figura 8: Influência da taxa de chegada (primeiro cruzamento) no tamanho da fila (segundo cruzamento)

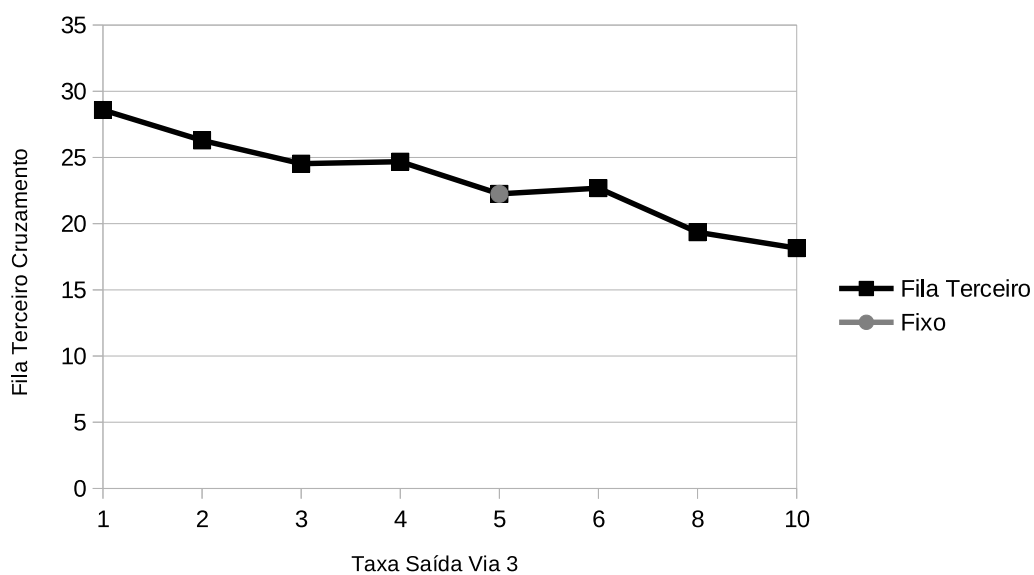


Figura 9: Impacto do tamanho da fila no cruzamento 3 com o aumento da taxa de saída no cruzamento 1 através da via 3

A Figura 9 mostra que em caso de aumento da vazão de veículos através da via 3 impacta na redução do tamanho da fila na via 7. Os valores em cinza representam o caso em que a taxa de saída através da via 3 é mantido constante, observa-se que a variação da taxa de escoamento leva ao aumento ou diminuição da fila.

Dados como estes seriam importantes para definição de prioridade em cruzamentos reais permitindo, por exemplo, definição de vias com prioridade para minimização de determinada via.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho abordou a modelagem e avaliação de modelos para sistemas de tráfego urbano. Após a definição de cruzamento composto de 4 vias foi definido o modelo para tal cruzamento, tal modelo é composto de 5 lugares, 2 transições imediatas e 3 transições temporizadas. A partir de tal modelo foram levantadas estatísticas como tamanho da fila e tempo de espera, impacto dos tempos semafóricos e da taxa de chegada sobre os parâmetros avaliados.

Posteriormente o modelo foi incrementado para um conjunto de três cruzamentos e 10 vias, em tal modelo as taxas de entrada e saída de veículos são variáveis e o tamanho das filas em 3 cruzamentos são avaliadas. Com tal modelo são avaliados os impactos que o aumento da taxa de chegada nas vias têm sobre o tamanho das filas nos cruzamentos. Ainda são avaliados os impactos da variação das taxas de saídas em algum cruzamento sobre o tamanho das filas nos cruzamentos seguintes.

O modelo com 3 cruzamentos conseguem representar o comportamento esperado em um sistema real, tal modelo pode ser estendido para um número maior de cruzamentos com o incremento de poucos estados e transições, de modo a tornar possível a simulação de interação entre mais vias.

O trabalho mostra, então, que a partir da composição de modelos simples, que representam apenas um cruzamento, pode-se evoluir para a representação de um sistema com dimensões e complexidade maior.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, V. A. F.; MENASCE, D. A. **Capacity Planning for Web Services: metrics, models, and methods**. [S.l.]: Prentice Hall, 2001.

AZZUMAR, M.; HALIM, A.; HARJONO, M. S. Performance evaluation of two ways urban traffic control system based on macroscopic hybrid petri net model. In: **2013 International Conference on Advanced Computer Science and Information Systems (ICACSIS)**. [S.l.: s.n.], 2013. p. 335–340.

CASSANDRAS, C. **Discrete event systems: modeling and performance analysis**. [S.l.]: Aksen, 1993.

DESEL, J.; REISIG, W. The synthesis problem of petri nets. **Acta Informatica**, v. 33, n. 4, p. 297–315, Jun 1996. ISSN 1432-0525. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s002360050046>>.

HAJIAHMADI, M. et al. Optimal hybrid perimeter and switching plans control for urban traffic networks. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 23, n. 2, p. 464–478, March 2015. ISSN 1063-6536.

HUANG, Y. S.; WENG, Y. S.; ZHOU, M. Modular design of urban traffic-light control systems based on synchronized timed petri nets. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 15, n. 2, p. 530–539, April 2014. ISSN 1524-9050.

JAMSHIDNEJAD, A. et al. Sustainable model-predictive control in urban traffic networks: Efficient solution based on general smoothening methods. **Accepted for publication in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 26, n. 3, p. 1–15, 2017. ISSN 10636536.

MARSAN, M. A. et al. **Modelling with Generalized Stochastic Petri Nets**. [S.l.]: Wiley, New York, 1995. (Wiley series in parallel computing).

MOLLER, D. P. **Introduction to Transportation Analysis, Modeling and Simulation**. 1. ed. [S.l.]: Springer, 2014.

MURATA, T. Petri nets: Properties, analysis and applications. **Proc. of the IEEE**, v.77, p. 541–580, 1989.

NG, K. M.; REAZ, M. B. I.; ALI, M. A. M. A review on the applications of petri nets in modeling, analysis, and control of urban traffic. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 14, n. 2, p. 858–870, 2013. ISSN 15249050.

NORENA, L. et al. Urban traffic control in the city of medelín: A pid control approach. In: **2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)**. [S.l.: s.n.], 2015.

PETRI, C. A. **Kommunikation mit Automaten**. Tese (Doutorado) — Universität Hamburg, 1962.

SANG, K. S. et al. A Survey on Urban Traffic Optimisation for Sustainable and Resilient Transportation Network. **Proceedings - 2016 9th International Conference on Developments in eSystems Engineering, DeSE 2016**, p. 233–238, 2017.

TEIXEIRA, M. et al. A quality-driven approach for resources planning in service-oriented architectures. **Expert Systems with Applications**, v. 42, n. 12, p. 5366 – 5379, 2015.

TIMENET. **TimeNET - timed net evaluation tool**. 2015. Disponível em: <<http://www.tu-ilmeneau.de/TimeNET>>.

WANG, J.; YAN, J.; LI, L. Microscopic Modeling of a Signalized Traffic Intersection Using Timed Petri Nets. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 2, p. 305–312, 2016. ISSN 15249050.

WU, J.; ABBAS-TURKI, A.; MOUDNI, A. E. Discrete methods for urban intersection traffic controlling. In: **VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–5. ISSN 1550-2252.