

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
CURSO DE CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

JONATHAN CUSTODIO

**UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE
TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS
CELULARES**

CRICIÚMA

2017

JONATHAN CUSTODIO

**UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE
TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS
CELULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
para obtenção do grau de Bacharel do curso de
Ciência da Computação da Universidade do
Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientadora: Prof^a. MSc. Christine Vieira

CRICIÚMA

2017

JONATHAN CUSTODIO

**UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE
TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS
CELULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de Bacharel, no Curso de Ciência da Computação da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC, com Linha de Pesquisa em Autômatos Celulares.

Criciúma, 19 de Junho de 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof^a. Christine Vieira – Msc. - (UNESC) - Orientador



Prof. Gilberto Vieira da Silva - Esp. - (UNESC)



Prof. Sérgio Coral - Esp. - (UNESC)

**Dedico esse trabalho aos meus amigos,
especialmente para Ciro Visintin e Danilo
Jonathan.**

AGRADECIMENTOS

À minha mãe Marlene Cizenski e meu pai João Pedro Custodio pelo carinho, paciência, força de vontade para que eu pudesse ter uma boa formação educacional, pessoal e profissional.

Agradeço aos meus colegas e amigos que construí durante esta caminhada, aos momentos bons e ruins que vivemos.

A professora e orientadora Christine Vieira pela paciência, auxílio, correções e críticas que foram de grande importância para a conclusão deste trabalho.

“What is better – to be born good or to overcome your evil nature through great effort?”

Paarthurnax

RESUMO

Os Autômatos Celulares vem sendo utilizados nos mais diversos meios de simulação de sistemas evolutivos, como por exemplo, na criptografia de dados, alastramento de incêndios, padrões de crime e principalmente em controle do fluxo de tráfego. A aplicação dos mesmos sobre o fluxo de tráfego permite a elaboração de simulações que buscam representar o comportamento de um fluxo real. Um exemplo destas simulações é o protótipo TRANSIM, que busca simular em dispositivos móveis o fluxo de tráfego nas imediações da Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) em Criciúma. O TRANSIM apresenta em sua totalidade certas limitações que o tornam uma simulação demasiada simples e presa ao seu próprio circuito. Em vista destas limitações, o presente trabalho traz um estudo sobre as teorias de fluxo de tráfego e autômatos celulares com o objetivo de suprir as limitações do TRANSIM através da criação e adaptação de novas regras de autômatos celulares, além de possibilitar um meio de criação de vias e fluxos de tráfego personalizados. Fornecendo aos profissionais do trânsito, uma ferramenta que permita estruturar determinada via e simular seu comportamento.

Palavras-chave: Autômatos Celulares, Fluxo de Tráfego, Simulação, TRANSIM.

ABSTRACT

Cellular Automata has been used in the most diverse means of evolutionary systems simulation, for example, in data encryption, fire spreading, crime patterns and especially in traffic flow control. Their application on traffic flow allows the elaboration of simulations that seek to represent the behavior of a real traffic flow. An example of these simulations is the prototype TRANSIM, which seeks to simulate the traffic flow in the vicinity of the Universidade do Sul Catarinense (UNESC) in Criciúma. TRANSIM represents in its totality, certain limitations that make it a simple simulation and stuck to its own circuit. According to these limitations, this paper presents a study on traffic flow theories and cellular automata in order to overcome TRANSIM's limitations through the creation and adaptation of new cellular automata rules, as well as to provide the means to create customized routes and traffic flows. Providing to traffic's professionals a tool that allows them to build a specific routes and simulate their behavior.

Palavras-chave: Cellular automata, Traffic flow, Simulation, TRANSIM.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama fundamental fxd	23
Figura 2 - Diagrama fundamental vxd	24
Figura 3 - Diagrama fundamental vxd	24
Figura 4 - Representação tradicional do <i>carfollowingmodel</i>	25
Figura 4 - Representação Unidimensional (1D), Bidimensional (2D) e Tridimensional (3D) de um sistema de Autômatos Celulares.	37
Figura 5 - Representação das formas das células de ACs.	38
Figura 6 – Vizinhanças de Von Neumann. Onde se encontram os primeiros vizinhos na figura 6(a) e os segundos vizinhos na figura 6(b).....	39
Figura 7 – Vizinhança de Moore. Na Figura 7(a) se encontram os primeiros vizinhos e na Figura 7(b) se encontram os segundos vizinhos	39
Figura 8 - Exemplo de regra reversível	40
Figura 9 - de $p(i,t)$ para uma vizinhança de duas células	43
Figura 10 - Regras de transição	44
Figura 11 - Exemplo do diagrama com $vmax = 5$	46
Figura 12 - Grade ao iniciar a simulação.....	55
Figura 15 – Verificação das células vizinhas ao estado entrada	75
Figura 16 – Seleção de via a receber o estado veículo.....	75
Figura 17 – Verificação das direções de vias possíveis	77
Figura 18 – Tela inicial da aplicação	79
Figura 19 – Funcionalidades do protótipo	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Novas regras desenvolvidas	84
Tabela 2 – Definição das alterações e exclusões de regras do TRANSIM	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC	Autômato Celular
BJH-TCA	Bejamin, Johson and Hui Traffic Cellular Automata
BL-TCA	<i>Brake-light</i> Traffic Cellular Automata
CAUTS	Cellular Automata for Urban Traffic Simulation
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
FI-TCA	Fukui-Ishibashi Traffic Cellular Automata
HS-TCA	Helbing-Schreckenberg Traffic Cellular Automata
KKW-TCA	Kerner, Klenov and Wolf Traffic Cellular Automata
OV	<i>Optimal Velocity</i>
SFI-TCA	Stochastic Fukui-Ishibashi Traffic Cellular Automata
STCA	Nagel-Schreckenberg Traffic Cellular Automata
T ² -TCA	Takayasu-Takayasu Traffic Cellular Automata
TCA	Traffic Cellular Automata
TCA-CC	Cruise Control Traffic Cellular Automata
VDR-TCA	Velocity Dependency Randomization Traffic Cellular Automata

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 OBJETIVO GERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
1.3 JUSTIFICATIVA	16
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 ENGENHARIA DE TRÁFEGO E FLUXO DE TRÁFEGO	19
2.1 ENGENHARIA DE TRÁFEGO	19
2.1.1 Procedimentos da Engenharia de Tráfego	21
2.2 FLUXO DE TRÁFEGO	22
2.2.1 Análise Macroscópica	22
2.2.2 Análise Microscópica	25
2.2.3 Análise Mesoscópica	26
3 TRANSPORTE E NORMAS DO TRÂNSITO	27
3.1 MODOS DE TRANSPORTE	27
3.1.1 Modos privados ou individuais	28
3.1.2 Modos públicos ou coletivos	29
3.1.3 Modos Semi-públicos	29
3.2 TRÂNSITO	30
3.3 NORMAS DO TRÂNSITO	30
3.3.1 Circulação	31
3.3.2 Distância entre veículos	31
3.3.3 Cruzamento	31
3.3.4 Tráfego em via com várias pistas	31
3.3.5 Ultrapassagem de veículos	32
3.3.6 Frenagem brusca de veículos	32
3.3.7 Classificação das vias abertas à circulação	32
3.3.8 Velocidade máxima permitida	33
3.3.9 Velocidade mínima permitida	33
3.3.10 Sinalização de trânsito	34
4 AUTÔMATOS CELULARES	35
4.1 CONCEITO DE AUTÔMATOS CELULARES.....	36
4.1.1 Geometria	36
4.1.2 Regras de Autômatos Celulares	38

4.1.3 Tipos de vizinhança	38
4.1.4 Estado Inicial	39
4.1.5 Regras Reversíveis	40
4.3 AUTÔMATOS CELULARES NO FLUXO DE TRÁFEGO	41
4.3.1 Modelos de células simples	42
4.3.2 Modelos de Células Múltiplas	49
5 TRANSIM	53
5.1 MODELO E DEFINIÇÕES.....	54
5.2 DESENVOLVIMENTO.....	54
5.2.1 Configurações e estados.....	55
5.2.2 Regras e iterações.....	58
5.3 RESULTADOS	61
6 TRABALHOS CORRELATOS	62
6.1 UM SIMULADOR DE TRÁFEGO URBANO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES	62
6.2 MODELOS MICROSCÓPICOS PARA SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES	63
6.3 UM MODELO DE AUTÔMATO CELULAR DE TRÁFEGO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO ESTADO DE CONDUÇÃO NA RANDOMIZAÇÃO	64
6.4 UM MODELO MELHORADO DE AUTÔMATO CELULAR PARA FLUXO DE TRÁFEGO	65
6.5 UM MODELO DE AUTÔMATO CELULAR PARA TRÁFEGO EM AUTO- ESTRADA	66
7 IMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO	67
7.1 METODOLOGIA.....	68
7.1.1 Desenvolvimento.....	68
7.2 RESULTADOS OBTIDOS	82
8 CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS.....	92

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais recursos da vida social e econômica de um país é o sistema de transporte. Estima-se que na maior cidade do Brasil, São Paulo, existam aproximadamente 8,14 milhões de veículos, isso demonstra que fazemos parte de um crescimento considerável de áreas urbanas assim como o aumento do número de veículos. Quanto maior a quantidade de veículos presentes nas ruas, maior é a ocorrência de congestionamentos, que afetam diretamente a qualidade de vida principalmente nas metrópoles (TAVARES, 2010).

De acordo com Lima (2007), o aumento contínuo do tráfego rodoviário vem se tornando um dos principais problemas da sociedade moderna, devido ao impacto gerado e a saturação das vias. A simulação computacional pode ter um papel importante, permitindo avaliar diferentes métodos de controle e gerenciamento de tráfego. Diante destes fatos, percebe-se a necessidade de pensar em uma nova forma de estruturar o trânsito.

A criação de um simulador para auxiliar na estrutura do fluxo de tráfego é uma alternativa a fim de idealizar de forma gráfica, um determinado circuito ou a montagem de todo um sistema de tráfego de modo a avaliar seu funcionamento e permitir que alterações possam ser feitas com o intuito de testar as várias possibilidades de sinalização e controle das vias.

Para tal estudo, existe um conjunto de leis da matemática, da teoria da probabilidade e da física utilizados para descrever o comportamento do tráfego rodoviário, esse conjunto é denominado fluxo de tráfego. (SILVA, 2007). Os conceitos de fluxo de tráfego abrangem todas as informações necessárias na criação de uma via e quais as propriedades que a mesma deve possuir, seguindo este conjunto, é possível aplicar estas informações sobre a simulação, aproximando-a do tráfego real.

Para desenvolver simulações de trânsito, é possível utilizar-se dos conceitos de Autômatos Celulares, que de acordo com Sousa (2002) são ferramentas que podem representar quase todos os sistemas evolutivos que se pode imaginar.

Os autômatos celulares são modelos matemáticos que procuram simular comportamentos complexos utilizando regras simples. Trabalham com uma grade de células, onde cada célula é um autômato que pode assumir um número finito de estados (LIMA, 2007).

Os Autômatos Celulares possuem a capacidade de gerar simulações, previsões e resultados que não podem ser obtidos utilizando métodos que envolvam equações matemáticas. Devido a sua facilidade de implementação, tal método tem influenciado várias áreas do conhecimento, como a Física, Química e principalmente a Matemática (GREMONINI. VICENTINI, 2008).

Os autômatos celulares são utilizados em diversos simuladores de tráfego devido a possibilidade de utilizar poucas regras tais como, aceleração, desaceleração, velocidade aleatória, entre outras. Dessa forma se tornam eficientes para simular o fluxo de tráfego em tempo real (TAVARES, 2010).

Através da possibilidade de alternar os estados dentro de uma grade, a aplicação dos autômatos no fluxo de tráfego é simples, é possível determinar todo o movimento dos veículos e seu comportamento apenas alterado os estados de cada célula. A aplicação destes conceitos sobre uma simulação do fluxo de tráfego permite gerenciar um fluxo constante de veículos juntamente com a possibilidade de gerenciar outros componentes como os meios de sinalização, assumindo que uma célula pode conter mais de um estado.

Um exemplo dessa utilização no fluxo de tráfego é o aplicativo TRANSIM, que de acordo com Pizzolo (2015), trabalha com os conceitos de autômatos celulares de modo a simular o fluxo de tráfego urbano com o intuito de auxiliar os agentes de trânsito nas possíveis simulações de alterações do fluxo do trânsito.

Por se tratar apenas de um protótipo e por ser desenvolvido exclusivamente para dispositivos móveis, nota-se uma quantidade significativa de limitações existentes, tais como: área, estados e fluxo de tráfego pré-definidos, além da falta de interação com o usuário, impedindo que o mesmo crie ou desenvolva suas próprias simulações de fluxo.

A possibilidade de criar um fluxo personalizado é relevante no quesito de desenvolvimento de uma simulação, pois permite que o usuário tenha total controle

de seu funcionamento, permitindo inserir e remover recursos, além de alterar as variáveis que controlam o funcionamento da simulação. Possibilitar uma área maior de atuação, ou seja, uma grade maior com um número maior de células permite que o usuário desenvolva circuitos mais complexos ou trajetos mais longos.

Esta pesquisa deu origem a uma simulação de fluxo de tráfego utilizando um novo conjunto de regras de autômatos celulares no sistema TRANSIM de forma a permitir a criação de vias e a adição de novas funcionalidades na simulação de tráfego.

1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um novo conjunto de regras para simulação de tráfego e criação de vias no modelo TRANSIM utilizando autômatos celulares.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho aborda temas referentes aos seguintes objetivos específicos:

- a) descrever os sistemas de transporte e fluxo de tráfego;
- b) caracterizar os conceitos de autômatos celulares e suas aplicações no tráfego;
- c) ampliar o modelo de autômatos celulares utilizado pelo TRANSIM;
- d) expandir as funções do TRANSIM para uma maior interação com o usuário.

1.3 JUSTIFICATIVA

Com uma grande quantidade de população e concentração de veículos é de fundamental importância a realização de estudos sobre transportes em áreas urbanas, tais como os que buscam analisar o efeito de mudanças nas regras de circulação de um trânsito urbano através de técnicas computacionais como a simulação. (TAVARES, 2010).

Um dos principais fatores destes estudos é a teoria do fluxo de tráfego que se utiliza de termos matemáticos para estudar e descrever as relações existentes entre os componentes do tráfego, sendo eles os veículos, as vias e os componentes de infra-estrutura. As suas aplicações são amplas, tais como: avaliação de tratamentos alternativos em gestão de tráfego, concepção e ensaio de novas vias, modelos de fluxo operacional e formação de gestores de tráfego (TAVARES, 2010).

Como objetos de estudo para a elaboração das regras de um simulador de tráfego resolveu-se utilizar os conceitos de Autômatos Celulares (AC). De acordo com Sousa (2002), os primeiros autômatos celulares foram criados por John von Neumann e Stanislaw Ulam com o objetivo de imitar os processos naturais que nos rodeiam, como o processo de reprodução por exemplo.

Os ACs podem imitar os processos naturais através de simples regras. São capazes de simular sistemas complexos que evoluem ao longo do tempo, partindo de regras simples que descrevem os mais variados fenômenos que nos rodeiam (SOUSA, 2002).

O estudo dos ACs atraiu grande interesse nos últimos anos devido a sua capacidade de gerar um amplo espectro de comportamentos complexos a partir de regras simples. Além disso, parecem capturar a essência de comportamentos auto-organizados complexos observados em sistemas naturais (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

Em relação ao aplicativo TRANSIM, o mesmo foi desenvolvido para dispositivos móveis devido a portabilidade, crescimento e capacidade de computação. Além de que o mesmo pode ser utilizado por agentes de trânsito e engenheiros de tráfego em qualquer lugar onde eles estejam (PIZZOLO, 2015).

No TRANSIM observa-se a necessidade de interação entre o usuário e a aplicação. Uma vez que o protótipo se trata de uma simulação direcionada a idealização de circuitos e desenvolvimento de vias, é necessário interagir com a aplicação a fim de projetar fluxos personalizados.

Outros fatores a serem implementados são a criação de novos estados realizada pelo próprio usuário, o TRANSIM trabalha com alguns recursos como

semáforos e faixas de pedestres, mas não apresenta alguns pontos importantes a serem levados em consideração, como paradas de ônibus, trilhos de trem e cruzamentos. A criação de novos veículos e a permissão para que o usuário informe a quantidade de veículos presentes na simulação também são pontos relevantes que não estão presentes no aplicativo e são de grande importância para o fluxo de tráfego.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os temas presentes no estudo são distribuídos ao longo de sete capítulos, sendo o primeiro composto pela introdução, objetivo principal e específicos, justificativa e a estrutura do trabalho. Os demais capítulos abordam os seguintes assuntos:

- a) **capítulo 2, Engenharia de Tráfego e Fluxo de Tráfego:** consiste dos conceitos e funcionalidades da engenharia e fluxo de tráfego.
- b) **capítulo 3, Transporte e Normas do Trânsito:** consiste das definições de transporte e normas regulamentadoras do trânsito. Demonstra os modos de transporte e as principais regras que da circulação no trânsito;
- c) **capítulo 4, Autômatos Celulares (AC):** tem como objetivo definir os conceitos e características de um AC, definindo sua importância;
- d) **capítulo 5, TRANSIM:** trata-se da descrição do aplicativo TRANSIM assim como seu desenvolvimento, regras, resultados e conclusões;
- e) **capítulo 6, Trabalhos Correlatos:** é onde serão demonstrados alguns trabalhos relacionados ao estudo proposto;
- f) **capítulo 7, Implementação do protótipo:** este capítulo demonstra toda a metodologia utilizada no desenvolvimento do protótipo, além de demonstrar os resultados obtidos;
- g) **capítulo 8, Conclusão:** aqui será concluído o trabalho, demonstrando as experiências e ideias obtidas com seu desenvolvimento, além de ser levantado possíveis trabalhos futuros relacionados a área do presente trabalho.

2 ENGENHARIA DE TRÁFEGO E FLUXO DE TRÁFEGO

O objetivo principal da Engenharia de Tráfego é criar condições favoráveis de circulação em vias públicas a partir de estudos das relações entre o homem, o veículo e a via. Estes estudos estão diretamente ligados com as características das vias públicas tais como a localização e pavimentação, comportamento do pedestre e do motorista, operacionalização de veículos e até mesmo a localização de transporte coletivo e a frequência de viagens (RIBEIRO, 1999).

Em contrapartida à engenharia, a teoria do fluxo de tráfego se utiliza de leis matemáticas, teoria da probabilidade e da física para descrever todo o comportamento do tráfego rodoviário. Sobre a teoria do fluxo de tráfego, existem três abordagens teóricas que são determinadas pelo interesse do estudo a ser realizado, sendo elas as análises microscópicas, macroscópicas e mesoscópicas (SILVA, 2007).

A soma de seus objetivos determina então todo o circuito de trânsito a partir da sua estrutura física que é determinada pela engenharia de tráfego juntamente com o comportamento do trânsito que é dado pela teoria do fluxo de tráfego.

2.1 ENGENHARIA DE TRÁFEGO

Realizando uma coleta de dados da relação entre cinco elementos do tráfego urbano (condutor, pedestre, via, meio ambiente e veículo) é possível obter um estudo de tráfego. Através deste estudo é possível determinar de forma quantitativa algumas variáveis dentro de um fluxo de tráfego, tais como: o número de veículos em circulação, sua velocidade, locais de estacionamento, locais sujeitos a acidentes e através destas informações permite-se determinar a capacidade das vias e dessa forma definir melhorias na circulação e nas características de um projeto de tráfego (BRASIL, 2006).

Estes estudos servem de instrumento para a Engenharia de Tráfego, que tem como objetivo, lidar em curto prazo com uma determinada situação de uma

cidade num certo momento de sua vida. Ela trabalha diretamente com a consulta e educação dos usuários e a fiscalização do trânsito, as quais nem sempre estão direcionadas a engenharia de tráfego, mas a ela estão intimamente ligadas.

De acordo com Ribeiro (1999), para a Engenharia de Tráfego, são características de trânsito:

- a) **condutores:** são aqueles que conduzem qualquer tipo veículo para locomoção ou transporte de mercadorias;
- b) **pedestres:** transitam sem a utilização de veículos;
- c) **veículos:** elementos utilizados para transporte humano ou de carga, entre outras funções. Estes podem ser motorizados ou não motorizados (propulsão humana ou tração animal).
- d) **vias:** são as superfícies por onde transitam pedestres, veículos e animais, são essenciais para o trânsito uma vez que suas características auxiliarão o trânsito em seus aspectos de segurança e conforto.

Vasconcellos (1982) afirma que dentro da Engenharia de Tráfego existem alguns parâmetros que são fundamentais para manter a ordem na circulação de veículos e pessoas, sendo eles:

- a) **fluidez:** trata-se da facilidade em que ocorre a circulação, a fluidez é comumente medida em termos de velocidade;
- b) **acessibilidade:** é a facilidade com que são atingidos os objetivos (tanto dos pedestres quanto dos veículos e cargas).
- c) **segurança:** consiste da garantia de uma circulação sem riscos para pedestres e veículos. É medida pelo índice de acidentes.
- d) **qualidade de vida:** representa uma série de condições da qualidade de vida urbana tais como os graus de poluição, hierarquia funcional das vias, entre outros.

2.1.1 Procedimentos da Engenharia de Tráfego

Utilizando-se do que foi obtido com os estudos do tráfego, é possível se utilizar de alguns procedimentos para simular determinadas ocorrências em um fluxo de tráfego urbano, de acordo com Brasil (2006), a elaboração de uma simulação de tráfego segue os seguintes procedimentos:

- a) **definição de área de estudo:** compreende o espaço geográfico ao qual pertencem as vias do projeto e se subdivide em origem e destino dos veículos, opções de rotas e a interferência dos fluxos a longa distância;
- b) **estabelecimento de zonas de tráfego:** utilizadas para facilitar o estudo, fornecendo uma base para determinar viagens atuais e futuras além de permitir o tratamento estatístico dos fatores que geram tráfego;
- c) **preparação da rede de transportes:** tem a finalidade de criar uma representação do sistema viário em estudo, permitindo a análise do comportamento do tráfego durante todo o percurso. Dentro da preparação existem alguns fatores que devem ser observados, sendo eles:
 - **tipo de rede:** onde determina-se o tipo de rede em estudo, sendo viário (rodovias, ferrovias, fluvial, marítimo ou aéreo) ou rodoviário (vias que compõem a malha rodoviária) para as áreas rurais enquanto nas áreas urbanas constitui-se das vias de transporte privado (carros, motocicletas, táxis, caminhões, entre outros) e coletivo (ônibus, vans, trens, metrô, entre outros),
 - **representação gráfica:** a finalidade é representar todos os elementos que constituem as zonas de tráfego definidas, como por exemplo as rotas, início ou fim de cada percurso, cruzamentos, entre outros,
 - **dados para simulação do tráfego:** são informações necessárias que descrevem completamente as vias que compõem a rede, onde para cada via é necessário dados como a situação na área de estudo,

caracterização de cada via, características do tráfego e a regulamentação do tráfego (sinalização e indicações).

2.2 FLUXO DE TRÁFEGO

A análise do fluxo de tráfego é disposta em três abordagens, sendo elas a abordagem macroscópica, que trabalha com o comportamento de grandes correntes de tráfego, a abordagem microscópica, que trabalha com a interação entre dois veículos dentro de uma corrente de tráfego e a abordagem mesoscópica, que analisa os agrupamentos de veículos formados nos sistemas viários (SILVA, 2007).

2.2.1 Análise Macroscópica

A análise macroscópica considera que as correntes de tráfego são meios contínuos, dessa forma ela se utiliza das leis da hidrodinâmica para avaliar seu comportamento, a abordagem fica conhecida como Analogia Hidrodinâmica de Tráfego. Essa análise permite que os engenheiros de tráfego tenham maior compreensão das limitações dos sistemas viários além de permitir a avaliação de consequências que provoquem interrupções nos mesmos (SILVA, 2007).

De acordo com suas características, a abordagem macroscópica é melhor aplicada no estudo de tráfego de alta densidade pois trabalha com um nível baixo de detalhes logo, não demonstra interesse individual, mas sim no sistema como um todo, não se aplica facilmente as situações de menos tráfego (SILVA, 2007, TAVARES, 2010).

Silva (2007) e Tavares (2010) afirmam que a abordagem macroscópica exige que sejam definidas três grandezas básicas para realizar as análises, sendo elas:

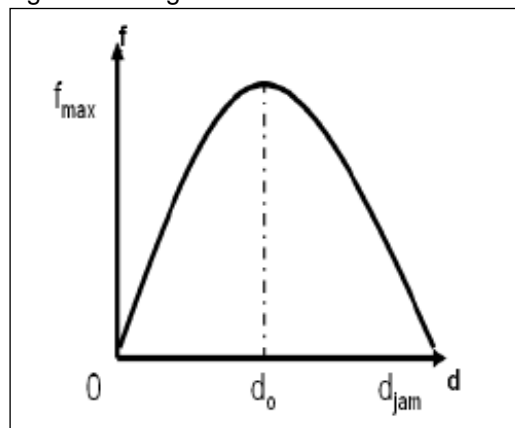
- a) **fluxo** ou **volume**: fluxo de tráfego ou também conhecido como volume de tráfego, é uma variável temporal que determina o número de veículos que cruzam uma seção específica de uma via em um dado intervalo de tempo;

- b) **concentração** ou **densidade**: é uma grandeza espacial quem indica o número de veículos em uma determinada extensão da via;
- c) **velocidade**: é a velocidade do fluxo de acordo com a relação entre a densidade e o fluxo de tráfego;

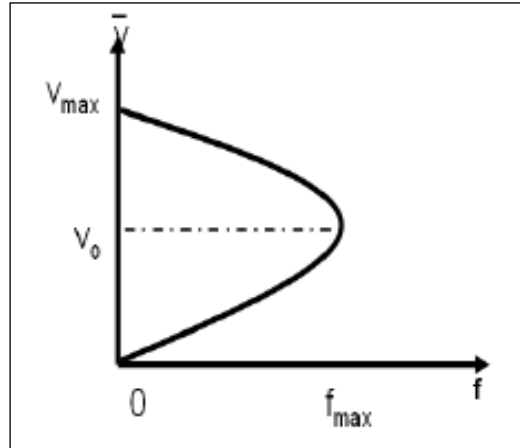
A partir das variáveis fluxo, densidade e velocidade, utiliza-se o os diagramas fundamentais que representam de forma simplificada o comportamento observado, onde são apresentados na figura 1 que representa a função de relação entre a densidade pelo fluxo, sendo que a densidade ótima é atingida na metade do diagrama. Na figura 2 está representada a relação entre a velocidade máxima e o fluxo, onde a velocidade máxima é atingida na metade do diagrama e na figura 3 a relação entre a velocidade máxima e a densidade máxima está representada, demonstrando que tanto a densidade ótima quanto a velocidade ótima são determinadas em um ponto de equilíbrio.

- a) f_{max} : fluxo máximo comportado pela via;
- b) d_o : densidade ótima;
- c) d_{jam} : densidade máxima, situação de completo congestionamento;
- d) v_{max} : velocidade máxima, situação de fluxo livre;
- e) v_o : velocidade ótima, situação onde a relação *velocidade X fluxo* é máxima;

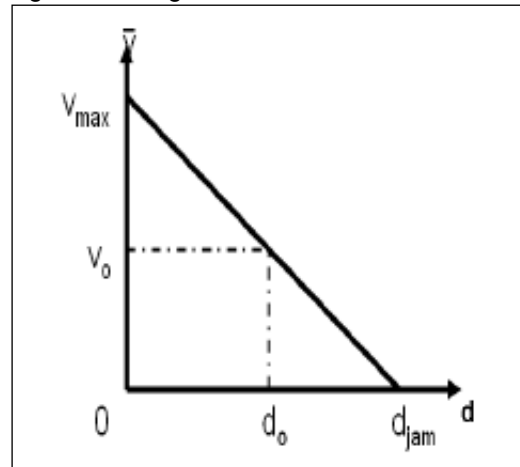
Figura 1 - Diagrama fundamental fxd



Fonte: Tavares (2010), p.33.

Figura 2 - Diagrama fundamental $v \times d$ 

Fonte: Tavares (2010), p.33.

Figura 3 - Diagrama fundamental $v \times d$ 

Fonte: Tavares (2010), p.33.

Os diagramas fundamentais demonstram que a velocidade ótima ocorre na metade da velocidade máxima e a densidade ótima ocorre na metade da densidade máxima, dessa forma é possível observar que a velocidade e a densidade alcançam o melhor estado no seu ponto de equilíbrio.

Onde a função de equilíbrio $v \times d$ pode ser escrita pela equação:

$$v = \frac{v_{max}}{d_{jam}} (d_{jam} - d);$$

Onde a relação $f \times d$, pode ser descrita como:

$$f = v_{max} \left(d - \frac{d^2}{d_{jam}} \right);$$

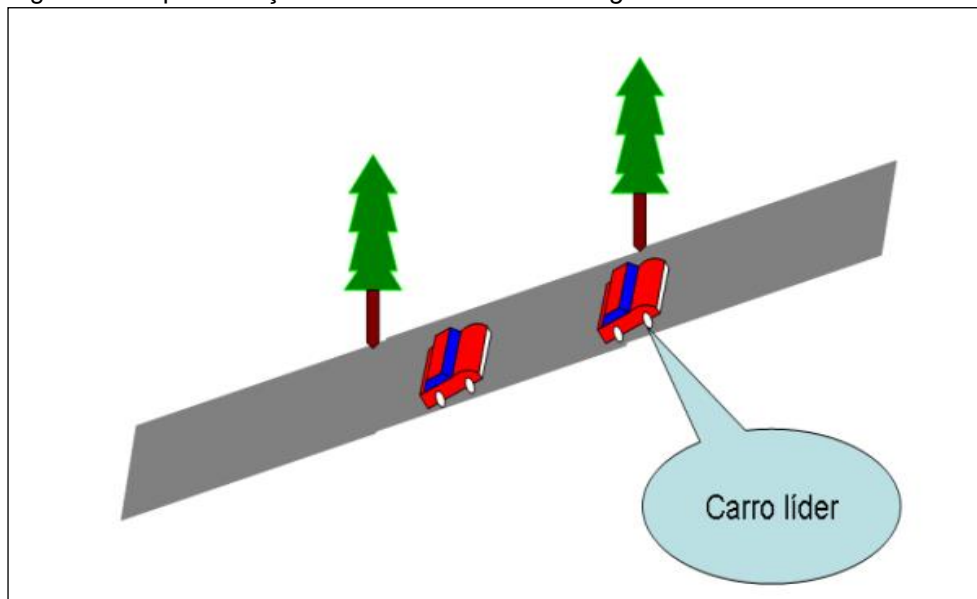
Da mesma forma para o diagrama $v \times f$ pode ser descrita como:

$$f = v \cdot d_{jam} \left(1 - \frac{v}{v_{max}}\right).$$

2.2.2 Análise Microscópica

A análise microscópica permite o estudo dos fluxos que não são necessariamente contínuos, permitindo um tratamento individual e detalhado dos veículos ao contrário da abordagem macroscópica. A análise microscópica foi desenvolvida com base nos modelos de perseguição ou também conhecidos como leis de sequência (*carfollowing*), descrevendo o comportamento da relação motorista-veículo como resposta a estímulos recebidos (TAVARES, 2010).

Figura 4 - Representação tradicional do *carfollowing* model



Fonte: Tavares (2010), p.35.

Ao contrário da abordagem macroscópica, a abordagem microscópica analisa cada veículo individualmente, apresentando um maior nível de detalhes. Dentro da abordagem microscópica, a modelagem mais evidente é a do “modelo de perseguição” (*carfollowing*) que se utiliza do fato em que um veículo persegue outro veículo em uma relação de estímulo e resposta. Cada veículo trabalha em função de um estímulo que recebe do veículo antecessor (líder) quando o veículo líder acelera,

o veículo que se encontra atrás do líder em resposta ao estímulo deve executar a mesma ação, neste caso ele deve acelerar de acordo com o veículo frontal (NAZARETH; SOUSA; RIBEIRO, 2015).

Quando a abordagem microscópica é aplicada em um fluxo onde todos os veículos mantêm-se na mesma velocidade, o modelo apresenta um comportamento estável. Porém essa estabilidade pode ser quebrada quando algum veículo sofrer alteração na velocidade, logo em um fluxo de velocidade estável, uma simples redução de velocidade do primeiro veículo pode gerar uma perturbação cada vez maior nos veículos perseguidores (TAVARES, 2010).

Na abordagem microscópica, os objetos de análise são os veículos, os atributos de posição, velocidade e aceleração. Modelos que se utilizam desta abordagem devem utilizar os atributos citados como base de cálculo (SILVA, 2007).

2.2.3 Análise Mesoscópica

A análise mesoscópica trabalha combinando os princípios das análises microscópicas e macroscópicas e é utilizada no quesito de coordenação semafórica. A abordagem começa caracterizando o comportamento individual de cada veículo e a partir disso os comportamentos são descritos como um todo, como um fluxo de veículos. A análise mesoscópica se aplica quando tais fluxos são retidos por alguma barreira, tal como um semáforo e logo em seguida são liberados para prosseguir. Dessa forma ela fornece uma maneira de traduzir o comportamento microscópico (veículos individuais) para um comportamento macroscópico (conjunto de veículos) (TAVARES, 2010).

3 TRANSPORTE E NORMAS DO TRÂNSITO

No Brasil, mais de 80% da população vive nas cidades. Assim, dos cerca de 175 milhões de habitantes do país, 140 milhões utilizam os sistemas de transporte urbano. Daqui a aproximadamente 30 anos, quando a população brasileira se estabilizar em torno de 230 milhões, a população deverá estar próxima de 184 milhões de pessoas – que utilizam o transporte urbano (FERRAZ; TORRES, 2004).

O transporte é um fator importante na qualidade de vida e no desenvolvimento tanto econômico quanto social de uma sociedade. Atividades comerciais, industriais, educacionais, recreativas, entre outras que são essenciais à sociedade moderna são possíveis devido ao deslocamento de pessoas e produtos, dessa forma o transporte é tão importante quanto serviços básicos como abastecimento de água ou alimentação (FERRAZ; TORRES, 2004).

Transporte abrange todo o deslocamento de pessoas e produtos, o termo transporte urbano é utilizado para designar esse deslocamento dentro das cidades. O transporte de passageiros está ligado diretamente a motivos como trabalho, estudo, compras, já o transporte de cargas ocorre devido a necessidade de coleta de lixo, movimentação de produtos das indústrias (entrada e saída), entre outros. (FERRAZ; TORRES, 2004).

Quando se fala de trânsito é importante ressaltar os modos de transporte presentes no mesmo, pois cada modo apresenta suas peculiaridades e seus comportamentos perante as regras de trânsito. Portanto ao avaliar um fluxo de tráfego ou trabalhar com as leis de trânsito é de suma importância conhecer quais tipos de veículos estarão presentes.

3.1 MODOS DE TRANSPORTE

A classificação dos modos de transporte se faz devido ao esforço utilizado no deslocamento, dividindo-se em modos motorizados e não motorizados:

- a) **motorizados**: modos de transporte em que se utiliza uma fonte de energia a qual é transformada em energia mecânica por um motor;
- b) **não motorizados**: modos de transporte em que o esforço é realizado pelo homem ou por animal.

Dentre os modos motorizados têm-se motocicletas, carros, ônibus, trem, embarcação, helicópteros. Dentre os modos não motorizados tem-se a movimentação a pé, de bicicleta ou através de tração animal.

No quesito referente à propriedade, liberdade de uso e capacidade do veículo, os modos de transporte se dividem em: individual ou privado; público ou coletivo; e semi-público (FERRAZ; TORRES, 2004).

3.1.1 Modos privados ou individuais

Quando o veículo utilizado é pertencente ao condutor mesmo que de forma temporária, é considerado um modo de transporte privado. O condutor tem a liberdade de definir os horários, o caminho a ser seguido, tendo total controle para efetuar o transporte (FERRAZ; TORRES, 2004). Os transportes individuais são:

- a) **bicicleta**: meio bastante utilizado em transporte urbano devido ao baixo preço de aquisição e por não possuir custo de operação;
- b) **motocicleta**: possui custo de operação e preço mais baixo que o dos carros, baixo consumo de combustível e baixo consumo de espaço tanto na circulação quanto em estacionamento. Tem como desvantagem a pouca segurança e a dificuldade de utilização em condições adversas como chuvas;
- c) **carros**: é o tipo de veículo mais utilizado para o transporte privado. Devido a produção em larga escala o custo passa a ser acessível a grande parte da população. Além do transporte de passageiros, os automóveis permitem o transporte de pequenas cargas.

3.1.2 Modos públicos ou coletivos

Quando um veículo pertencente a uma empresa ou pessoa é utilizado por vários passageiros de forma simultânea, ele é considerado um veículo coletivo. Os veículos coletivos apresentam horários fixos, sem flexibilidade no uso (FERRAZ; TORRES, 2004; VASCONCELLOS, 2000). Os modos mais comuns de transporte público são:

- a) **ônibus**: são veículos públicos que possuem uma capacidade de passageiros maior que a dos veículos privados. Os mesmos não apresentam flexibilidade, pois trabalham através de horários e trajetos pré-definidos;
- b) **metrô**: são os trens urbanos os quais são movidos de forma automatizada. Geralmente trabalham em vias subterrâneas. Não apresentam flexibilidade, pois possuem horários e trajetos específicos;
- c) **trem**: refere-se ao modo que se utiliza de ferrovias para se deslocar. São caracterizados por longas viagens e distâncias, além da alta velocidade. Possuem maior capacidade de transporte e trabalham em vias específicas.

3.1.3 Modos Semi-públicos

São os veículos que apresentam um intermédio entre o modo privado e o público, ou seja, veículos coletivos que apresentam flexibilidade (FERRAZ; TORRES, 2004). São exemplos de veículos semi-públicos:

- a) **taxi**: são veículos alugados com o condutor. Apresenta flexibilidade nos horários, rotas e no destino desejado. Apresenta certas vantagens como a não necessidade de dirigir e estacionar, além de que não há responsabilidade em caso de acidentes;
- b) **lotação**: é utilizado em lugares onde o transporte público é deficiente. Os operadores de lotação que regulamentam os horários, períodos de operação e a tarifa do modo de transporte.

3.2 TRÂNSITO

Considera-se trânsito, a utilização das vias por pessoas, veículos e animais para fins de circulação, transporte, parada, estacionamento, operação de carga ou descarga, entre outros. O trânsito em condições seguras é um direito de toda a população e um dever dos órgãos e entidades do Sistema Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2006).

Analisando as definições do Código de Trânsito Brasileiro é possível definir como trânsito tudo aquilo que se movimenta ou se locomove de alguma forma, sendo ela através de veículos, animais ou sem a utilização dos mesmos (a pé, por exemplo). Pode-se dizer então que o trânsito é utilizado para tudo, desde o deslocamento até o transporte de produto ou de serviços (FRANZ; SEBERINO, 2012).

3.3 NORMAS DO TRÂNSITO

Para que ocorra segurança e organização, a circulação de veículos e pedestres é regulada por normas. Dessa forma, é importante que existam normas rigorosas que controlem a forma que os motoristas devem se portar ao dirigir e também controlem a maneira com que o pedestre deve se portar no trânsito (DENATRAN, 2006).

No Brasil essas normas são regidas pelo Código de Trânsito Brasileiro (CTB), trazendo capítulos inteiros destinados ao cidadão, condução de veículos, crimes de trânsito, entre outros. O código atinge diretamente toda a população cujo objetivo é proporcionar segurança, fluidez e conforto no trânsito (FRANZ; SEBERINO, 2012).

3.3.1 Circulação

Para realizar o deslocamento, existe a regra de circulação que é realizada pelo lado direito de uma via, permitindo algumas exceções caso as mesmas sejam sinalizadas (RIZZARDO, 2008).

3.3.2 Distância entre veículos

Para maior segurança dentro do fluxo de tráfego existem algumas normas as quais regem a distância que um condutor deve manter dos veículos adjacentes e da pista. A distância depende diretamente da velocidade de circulação, das condições da pista, do veículo e do clima, dessa forma quanto maior for a velocidade do condutor maior deve ser a distância que o mesmo deve manter do veículo a sua frente. Em termos mais exatos a distância mínima é de dez metros, onde dependendo da velocidade pode ser necessário uma distância de até cinquenta metros (RIZZARDO, 2008).

3.3.3 Cruzamento

Quando existir apenas um fluxo na rodovia, o veículo que já está em circulação é quem possui a preferência. Em casos de rotatórias, quando mais de um veículo atingir a rotatória (considerando que estão vindo de sentidos opostos), terá preferência aquele que já estiver circulando por ela. Em demais casos a preferência se dá ao veículo que estiver a direita do condutor (RIZZARDO, 2008).

3.3.4 Tráfego em via com várias pistas

Ao encontrar-se em uma pista a qual apresenta diversas faixas de trânsito em um único sentido, as mesmas seguem as seguintes normas (RIZZARDO, 2008):

- a) **faixas da esquerda:** destinadas diretamente para ultrapassagem e deslocamento de veículos de maior velocidade;
- b) **faixas da direita:** veículos lentos ou que se deslocam em velocidade reduzida.

3.3.5 Ultrapassagem de veículos

Da mesma forma que no tráfego com várias pistas, a ultrapassagem deve ser feita pela esquerda seguindo devidamente as regras de sinalização. Cabe ao condutor certificar-se de que a faixa que deseja tomar não apresente veículos na direção oposta em uma extensão suficiente para uma ultrapassagem segura, além de observar a movimentação tanto do veículo dianteiro quanto traseiro pois os mesmos podem sinalizar uma ultrapassagem ou mudança de pista. (RIZZARDO, 2008).

3.3.6 Frenagem brusca de veículos

Como a segurança dos usuários da via é extremamente importante na condução de um veículo, cabe ao condutor não frear bruscamente o veículo, exceto em situação de necessidade extrema onde não há outra forma de pará-lo lentamente. (RIZZARDO, 2008).

3.3.7 Classificação das vias abertas à circulação

De uma forma ampla, pode-se dividir as vias em vias urbanas e rurais, onde as vias urbanas se subdividem em vias de trânsito rápido e via arterial (que promovem um serviço de circulação voltado a acessibilidade) além da via coletora e via local (que se empenham na mobilidade), enquanto as rurais se subdividem entre rodovias e estradas. A classificação das vias está diretamente ligada a velocidade máxima permitida, sendo assim a velocidade é determinada pela classificação e as formas de utilização da via (RIZZARDO, 2008; SANTOS et al., 2015).

3.3.8 Velocidade máxima permitida

O principal critério que rege o limite de velocidade de uma via é que a velocidade deve ser adequada ao local, logo, verifica-se se a via permite uma velocidade maior ou menor, se há mais de uma faixa de circulação em um mesmo sentido e se as condições de trânsito e da pista permitem maior velocidade. (RIZZARDO, 2008).

Santos et al. (2015) afirma que a regularização da velocidade máxima de cada via depende de sua função específica, sendo que de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (CTB) a velocidade máxima onde não houver sinalização segue os seguintes padrões:

a) os limites de velocidade máxima nas vias urbanas são:

- oitenta quilômetros por hora em vias de trânsito rápido,
- sessenta quilômetros por hora em vias arteriais,
- quarenta quilômetros por hora em vias coletoras,
- trinta quilômetros por hora nas vias locais;

b) já os limites de velocidade máxima nas rodovias:

- cento e dez quilômetros por hora para automóveis, camionetas e motocicletas,
- noventa quilômetros por hora para ônibus e micro-ônibus,
- oitenta quilômetros por hora para os demais veículos;

c) Enquanto os limites de velocidade máxima nas estradas:

- sessenta quilômetros por hora para todos os veículos.

3.3.9 Velocidade mínima permitida

Assim como é determinada a velocidade máxima, o CTB determina que a velocidade mínima não deve ser inferior do que a metade da velocidade máxima permitida pela via (RIZZARDO, 2008; SANTOS et al., 2015).

3.3.10 Sinalização de trânsito

Os sinais de trânsito têm suma importância nas vias de trânsito, uma vez que determinam as regras de navegação pelas vias. São projetados para serem identificados facilmente permitindo que os condutores ou pedestres possam ser avisados sobre devidas ações que devem ser tomadas durante a circulação nas vias além de indicar sobre situações impróprias ou perigosas. (SILVA et al. 2012). Os sinais de trânsito são classificados em:

- a) **sinalização vertical**: trata-se da sinalização através de placas, o meio de apresentação. Se dá na posição vertical, fixadas na lateral ou suspensas sobre a pista, transmitindo a mensagem através de símbolos ou legendas pré-reconhecidos;
- b) **sinalização horizontal**: é o conjunto de sinais constituído por linhas, marcações ou símbolos de cores e tipos diversos que são posicionados no chão da via. Indicam tanto para o condutor quanto para o pedestre, que façam determinada operação de tráfego ou passagem segura;
- c) **sinalização auxiliar**: trata-se dos recursos materiais, forma, cores e refletibilidade aplicados ao pavimento da via ou em duas adjacências. Possuem o objetivo de melhorar a visibilidade da sinalização ou obstáculos da pista, além de alertar os condutores quanto a situações de perigo.

4 AUTÔMATOS CELULARES

Os Autômatos Celulares (ACs) consistem de modelos matemáticos discretos no tempo, espaço e nas variáveis dinâmicas. São formados por unidades que interagem entre si através de regras simples e à medida que o sistema evolui, surgem diversos comportamentos decorrentes das interações entre as unidades (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

Devido às suas características, são utilizados como modelo para formar padrões que buscam explicar fenômenos naturais, comportamentos sociais, ambientais e biológicos, pois simulam com perfeição os fenômenos que ocorrem em diferentes escalas (GREMONINI; VICENTINI, 2008; SOUSA, 2002).

A representação dos ACs é dada em uma grade de determinadas dimensões, onde cada célula caracteriza um estado pré-determinado. Estes estados são gerenciados por regras, que indicam as interações que a célula deve realizar de acordo com o seu estado e o estado das células vizinhas. O espaço de um autômato celular é como um universo governado por regras. Quando muitos componentes simples atuam de forma conjunta, são obtidos comportamentos complexos (GREMONINI; VICENTINI, 2008; SOUSA, 2002).

Devido ao seu conceito de avaliação de estados vizinhos, os ACs são boas opções para a avaliação de sistemas evolutivos e na elaboração de simulações que necessitam da alteração constante de estados. Por meio das regras desenvolvidas, cada célula pode assumir diferentes estados e desta forma demonstrar o funcionamento de determinado fenômeno, como é o caso de simulações de fluxo de tráfego.

4.1 CONCEITO DE AUTÔMATOS CELULARES

O conceito de autômato celular foi proposto por John Von Neumann¹ e por Stanislaw Ulam². Neumann buscava criar um sistema que pudesse simular os processos naturais e artificiais que nos rodeiam, enquanto Ulam estudava a formação de cristais através de uma malha e células (GREMONINI; VICENTINI, 2008; SOUSA, 2002).

A primeira descrição formal e a prova de que os ACs são capazes de computação universal foram realizadas por John Von Neumann nos anos 40. Em 1970, John Conway trouxe para a ribalta as potencialidades destes modelos ao construir o autômato mais popular “O jogo da vida” (SOUSA, 2002, p. 13).

Os ACs podem ser vistos como uma grade de células, um sistema onde cada célula se encontra em um determinado estado que é alterado ao longo das interações do sistema, as alterações ocorrem de acordo com certas regras dependendo do estado anterior e atual da célula, além do estado das células vizinhas. Von Neumann mostrou que um autômato celular pode ser computacionalmente completo, assim é possível classificar um autômato celular como um conjunto de autômatos que interagem entre si, onde cada autômato é uma célula (GREMONINI; VICENTINI, 2008; SOUSA, 2002).

4.1.1 Geometria

Caracteriza a dimensão espacial e distribuição das células. Em um sistema de ACs é necessária uma geometria regular em que cada célula deve possuir o mesmo tamanho e todas devem estar dispostas em uma grade. A

¹ Margittai Neumann János Lajos conhecido como John von Neumann foi um matemático húngaro que contribuiu para as áreas matemáticas, além de propor um dos primeiros modelos de autômatos celulares. Foi membro do Instituto de Estudos Avançados de Princeton, professor na Universidade de Princeton e um dos construtores do ENIAC. Faleceu aos 53 anos devido a um tumor cerebral.

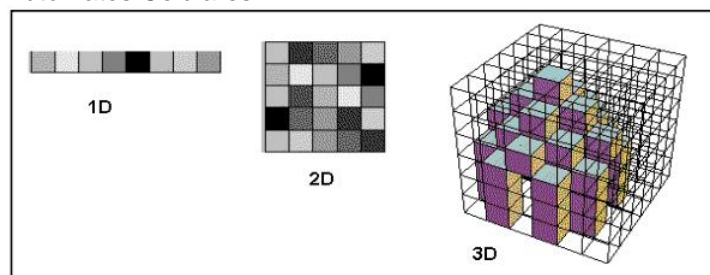
² Stanislaw Marcin Ulam foi um matemático polonês que contribuiu para as áreas da computação e do estudo termo-nuclear inventor do método Monte Carlo de computação, participante do Projeto Manhattan e sugeriu a propulsão por pulso nuclear.

geometria pode ser classificada quanto a dimensão e o formato da célula (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

4.1.1.1 Dimensão

Os ACs podem ser n -dimensionais, sendo os ACs mais comuns os unidimensionais (1D) e bidimensionais (2D). Um autômato celular de uma dimensão (1D) possui uma sequência de autômatos em linha. O próximo estado de uma célula depende de seu estado atual e do estado das células vizinhas. Os autômatos de duas dimensões (2D) são compostos por autômatos postos lado a lado, formando um plano, assim a vizinhança de uma célula possui mais de dois elementos. Os autômatos de três dimensões (3D) são compostos por autômatos distribuídos de forma tridimensional, ou seja, são distribuídos no espaço (GREMONINI; VICENTINI, 2008). Na figura 4 tem-se a representação das n -dimensões de um autômato celular, onde são representados uma grade unidimensional (1D) com apenas uma dimensão, uma grade bidimensional (2D) que apresenta um autômato com duas dimensões e uma grade tridimensional (3D) apresentando um autômato de até três dimensões.

Figura 4 - Representação Unidimensional (1D), Bidimensional (2D) e Tridimensional (3D) de um sistema de Autômatos Celulares.



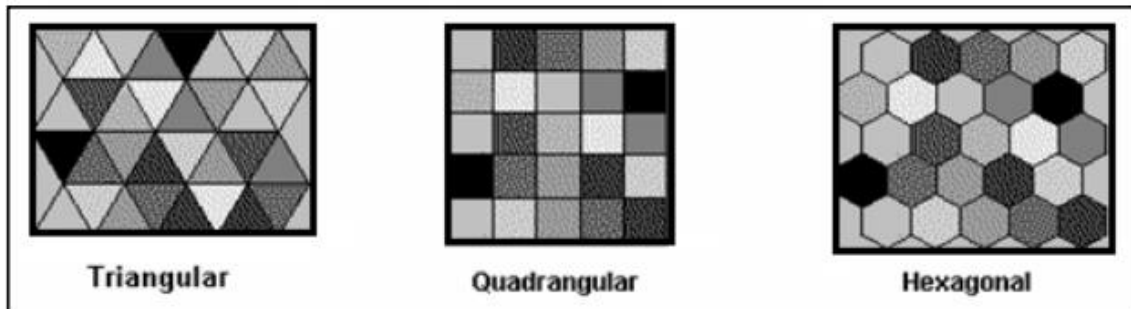
Fonte: Gremonini e Vicentini (2008), p.6.

4.1.1.2 Formato

As células apresentam várias formas (triangular, quadrangular, hexagonal). Define-se que em um mesmo sistema de ACs todas as células devem possuir a mesma forma (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

Na figura 5, tem-se a representação de algumas formas das quais podem representar as células de um sistema de autômatos, sendo a mais comum delas a forma quadrangular.

Figura 5 - Representação das formas das células de ACs.



Fonte: Gremonini e Vicentini (2008), p.6.

4.1.2 Regras de Autômatos Celulares

As regras dependem tanto do estado da própria célula quanto do estado das células vizinhas e podem ser determinísticas (não apresentam fenômenos aleatórios) ou não-determinísticas (apresentam fenômenos aleatórios). Nas regras determinísticas pode-se dizer de forma exata o próximo estado de uma célula através dos estados vizinhos, enquanto nas regras não-determinísticas, o próximo estado de uma célula é determinado a partir de uma função de probabilidade (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

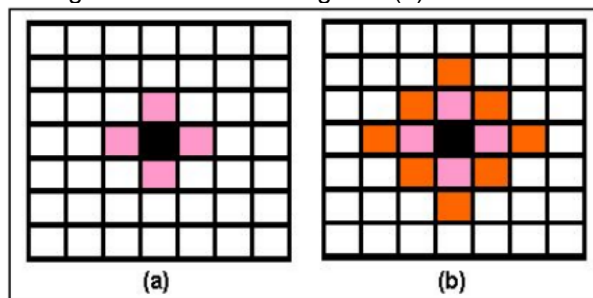
4.1.3 Tipos de vizinhança

Considerando um AC composto por uma grade de células de dimensão nD , é possível determinar vários tipos de vizinhança de acordo com a dimensão. Para autômatos unidimensionais, é comum considerar que cada célula possui duas

vizinhanças, sendo uma de cada lado. Para autômatos bidimensionais é possível definir diferentes vizinhanças, sendo as mais conhecidas: de Von Neumann onde as células são adjacentes se encontram na vertical e na horizontal da célula dada e o de Moore onde as células adjacentes se encontram na horizontal, na vertical e na diagonal da célula dada (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

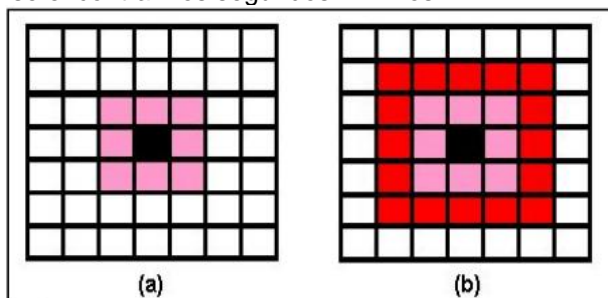
A figura 6 representa a vizinhança de Von Neumann onde a vizinhança se encontra apenas na vertical e horizontal da célula enquanto a figura 7 representa a vizinhança de Moore onde a vizinhança se encontra também na diagonal da célula.

Figura 6 – Vizinhanças de Von Neumann. Onde se encontram os primeiros vizinhos na figura 6(a) e os segundos vizinhos na figura 6(b)



Fonte: Gremonini; Vicentini (2008), p.7.

Figura 7 – Vizinhança de Moore. Na Figura 7(a) se encontram os primeiros vizinhos e na Figura 7(b) se encontram os segundos vizinhos



Fonte: Gremonini; Vicentini (2008), p.7.

4.1.4 Estado Inicial

O AC começa a sua evolução com uma série de valores iniciais, onde cada valor corresponde ao estado de uma célula, sendo que pode ser atribuído qualquer valor (normalmente entre zero e um) para cada célula. A partir dessa

atribuição é desencadeado o processo de evolução do autômato, onde cada célula, tanto os estados iniciais quanto as células vizinhas sofrem a transição de acordo com as regras do autômato. Verifica-se que a evolução do autômato normalmente flui para estados bem diversos conforme o estado inicial, indicando que com pequenas variações no estado inicial se tem grandes variações nos estados consequentes (GREMONINI; VICENTINI, 2008; SOUSA, 2002).

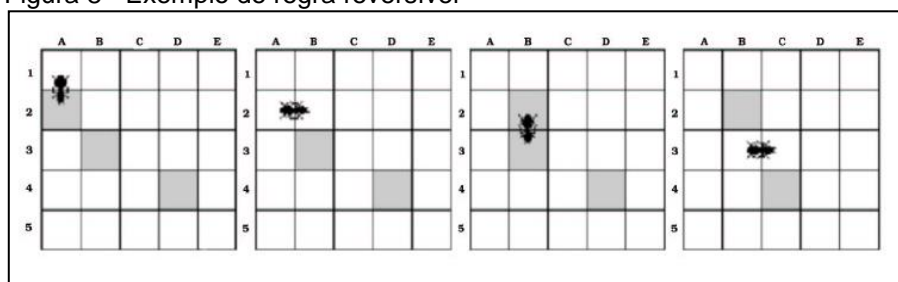
4.1.5 Regras Reversíveis

Os autômatos reversíveis tratam-se de uma classe especial. Após a evolução do autômato durante uma quantidade qualquer de gerações, podemos seguir de forma inversa o seu “percurso”, chegando ao estado inicial. Um exemplo de regra reversível é a seguinte: Uma formiga move-se numa grelha bidimensional. Em cada passo a formiga pode se mover em 4 direções, sendo estas: norte, sul, leste ou oeste. Cada célula da grelha é pintada de preto ou branco (SOUSA, 2002). A cada passo a formiga age de acordo com as seguintes regras:

- a) **passo 1:** se a formiga estiver em uma célula branca, a mesma é pintada de preto e a formiga vira-se 90° para a direita e avança uma célula;
- b) **passo 2:** se a formiga estiver em uma célula preta, a mesma é pintada de branco e a formiga vira-se 90° para a esquerda e avança uma célula.

A figura 8 representa um exemplo da regra reversível, demonstrando a movimentação da formiga de acordo com as regras citadas anteriormente.

Figura 8 - Exemplo de regra reversível



Fonte: Sousa (2002), p.25.

- a) o primeiro passo da formiga é feito segundo a regra, pois a mesma encontra-se em uma célula pintada de preto (A2). A formiga pinta a célula de branco, vira-se 90° para a esquerda e segue para a célula B2;
- b) a formiga encontra-se na célula B2 (célula branca) por isso segue a segunda regra, pinta a célula B2 de preto, vira-se 90° para a direita e segue para a célula B3;
- c) na terceira geração a formiga encontra-se na célula B3 (célula preta) por isso pinta-a de branco, vira-se 90° para a esquerda e segue para a célula C3.

Partindo-se da posição final da formiga e seguindo o seu trajeto até a posição inicial, aplicando a mesma regra em sentido contrário é possível exemplificar uma regra reversível, onde através da mesma regra retorna-se a posição inicial (SOUSA, 2002).

4.3 AUTÔMATOS CELULARES NO FLUXO DE TRÁFEGO

Como os ACs trabalham diretamente com as relações entre uma célula e as células vizinhas, pode-se utilizar seus conceitos sobre o fluxo de tráfego de veículos em uma via urbana. Os veículos dependem diretamente dos outros veículos e sinalizações existentes nas vias, com base nisso, são definidos os estados do veículo durante o tráfego, assim como nos ACs. Um exemplo de autômato celular utilizado no tráfego de automóveis é o autômato de Nagel e Schreckenberg que demonstram de uma forma real de como funciona o tráfego.

Em um modelo de autômatos celulares para tráfego, é possível descrever toda a faixa de estrada como um autômato celular, utilizando os seguintes elementos (LIMA, 2007):

- a) uma grade representando a via, onde cada célula representa um trecho da via;
- b) o conjunto de estados que uma célula pode assumir, composto por: ocupação da célula, velocidade do veículo ocupante, tamanho do

veículo, entre outros. A quantidade de informação é dependente do modelo;

c) a vizinhança da célula, o conjunto de célula à frente da célula avaliada.

A vizinhança pode variar de acordo com o modelo;

d) a função de transição, trata-se do conjunto de regras que decidirá sobre a movimentação dos veículos, também varia para cada modelo.

Seguindo estes elementos, os modelos se utilizam de algumas condições mantendo alguns valores pré-estabelecidos, tais como:

a) tamanho da célula de $7,5m$ ($tam = 7,5$), que corresponde a uma média da ocupação de um veículo em um engarrafamento, considerando o tamanho do veículo e a distância até o veículo da frente;

b) velocidade de uma célula por segundo, ou seja, $v = 1$, logo o veículo encontra-se a $7,5m/s$ ou $27km/h$. Em grande parte dos modelos como no de Nagel-Schreckenberg utiliza-se uma velocidade máxima $v_{max} = 5$, chegando a um total de $135km/h$.

4.3.1 Modelos de células simples

O modelo de células simples é definido onde cada célula pode estar vazia ou ocupada por exatamente um veículo, onde todos os veículos apresentam o mesmo tamanho, considerando tanto o veículo como a distância entre o veículo vizinho como uma única célula. O trânsito é considerado homogêneo, onde todos os veículos mantêm-se em uma única mão da via (MAERIVOET; MOOR, 2005 tradução nossa).

4.3.1.1 Modelos determinísticos

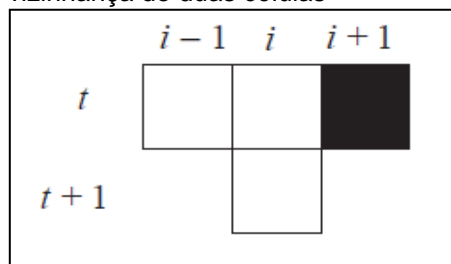
Os modelos determinísticos caracterizam-se pela alta precisão em relação aos estados finais, uma vez que removem o fator de randomização em um conjunto de regras. Dessa forma tendem a tornar o autômato mais simples para elaboração (NAGEL; HERRMANN, 1993, tradução nossa).

4.3.1.1.1 Modelo Regra 184 (CA-184)

A Regra 184 consiste de um modelo unidimensional que assume valores binários. Foi estudado por Stephen Wolfram³, a ideia era utilizar os valores da vizinhança da célula (à esquerda, à direita e o próprio valor da célula) para encontrar os estados correspondentes a cada atualização da célula no instante $t+1$. O número de regras é dado por $k^z = S$ onde k representa os estados, z os vizinhos e S a quantidade total de ACs que podem ser gerados. Aplicando determinados valores, tem-se 2^8 (2 estados e 8 vizinhos) constituindo assim um total de 256 regras que definem diferentes ACs, esse conjunto de 256 regras é conhecido como “regras de Wolfram” e os números associados como “notação de Wolfram” o autômato então recebe a notação 184 dentro das regras de Wolfram devido a formação binária dos novo estados da célula central, que pode ser observado na figura 10 cuja formação é 10111000 representando 184 na forma decimal (GREMONINI; VICENTINI, 2008; MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa; SOUSA, 2002).

A figura 9 representa a evolução de uma célula i em um estado de tempo t , considerando que um quadrado preenchido consiste no valor binário 1 e uma célula vazia no valor 0.

Figura 9 - de $p(i,t)$ para uma vizinhança de duas células

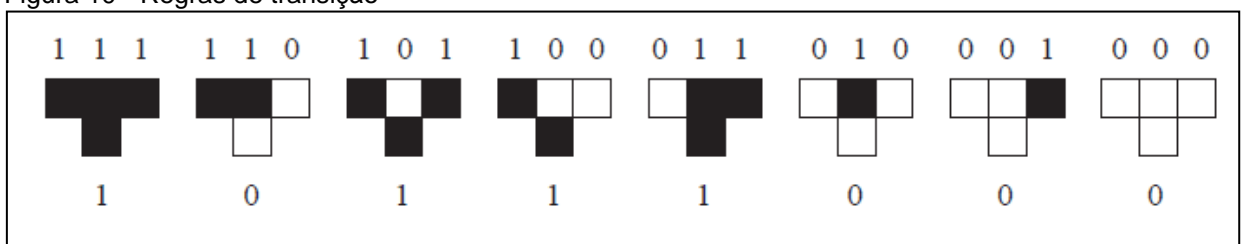


Fonte: Maerivoet e Moor (2005), p.17.

³ Stephen Wolfram é um cientista britânico-americano conhecido por atuar nas áreas de ciência da computação, matemática e física teórica. É conhecido por seus estudos e experimentos do comportamento dos ACs. É autor do livro *A New Kind of Science* e desenvolvedor da ferramenta Mathematica e do sistema Wolfram|Alpha que permite o acesso a maior quantidade de conhecimento possível de forma computável e acessível para todos. É o presidente e CEO da Wolfram Research e está envolvido atualmente nos desenvolvimentos tecnológicos da companhia.

A figura 10 representa o modelo da regra 184, onde encontram-se 2 estados (vazio e preenchido) e um total de 3 vizinhos da célula. Aplicando a regra de Wolfram é possível determinar a quantidade de autômatos que serão gerados, logo $k^z = S$ aplicando os valores da figura temos o $2^3 = 8$ possíveis configurações de autômatos.

Figura 10 - Regras de transição



Fonte: Maerivoet; Moor (2005), p.17.

Para um modelo de AC para tráfego é possível escrever as ações na forma de regras que são aplicadas a todos os veículos, para o modelo 184 tem-se as seguintes regras:

- R1:** aceleração e frenagem: $v_i(t) \leftarrow \min\{g_{s_i}(t-1), 1\}$;
- R2:** movimento do veículo: $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$.

A regra R1 determina a velocidade do i -ésimo veículo, definindo que o veículo sempre mantém-se dirigindo na velocidade de 1 célula por tempo, a menos que seja impedido pelo veículo posterior ocorrendo assim uma parada para evitar colisão. A regra R2 apenas permite que os veículos se movimentem pelo sistema do circuito (GREMONINI; VICENTINI, 2008; MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

4.3.1.1.2 Modelo Fukui-Ishibashi (FI-TCA)

Criado em 1996 por Fukui e Ishibashi, o modelo FI-TCA (Fukui-Ishibashi) consiste de uma modificação do modelo 184, onde foram realizadas duas alterações. A primeira é que a velocidade máxima de um veículo é incrementada de 1 até uma velocidade máxima (v_{max}), a segunda é que os veículos devem acelerar

instantaneamente para a maior velocidade possível (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa). A alteração da regra feita por Fukui e Ishibashi é a seguinte:

$$\text{a) R1: aceleração e frenagem: } v_i(t) \leftarrow \min\{g_{x_i}(t-1), v_{max}\}.$$

4.3.1.2 Modelos Estocásticos

Os modelos estocásticos são caracterizados por permitirem a aplicação de um fator de aleatoriedade nas regras dos ACs, permitindo o surgimento de congestionamentos no decorrer das transições de modo a representar o mesmo comportamento da vida real (NAGEL, 2008, tradução nossa).

4.3.1.2.1 Modelo de Nagel-Schreckenberg (STCA)

O autômato de Nagel e Schreckenberg trata-se de uma grade unidimensional com L células. Cada célula pode ser ou não ocupada por algum veículo. Cada veículo possui um valor inteiro que define sua velocidade, variando de 0 até uma velocidade máxima (v_{max}). Cada geração do sistema consiste em três regras consecutivas que são realizadas em paralelo para todos os veículos (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992, tradução nossa):

$$\text{a) R1: aceleração e frenagem: } (t) \leftarrow \min\{v_i(t-1) + 1, g_{s_i}(t-1), v_{max}\};$$

$$\text{b) R2: randomização: } (t) < p \rightarrow v_i(t) \leftarrow \max(0, v_i(t) - 1);$$

$$\text{c) R3: movimentação: } x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t).$$

Através das etapas de um a três, as propriedades do tráfego em pista única são modeladas com base em um valor inteiro, de acordo com as regras dos ACs. Um passo essencial na simulação é a randomização, através dela é possível gerar um comportamento realista no fluxo de tráfego, simulando as variações de velocidade que ocorrem devido ao comportamento humano ou condições externas (sinalização ou a situação do próprio fluxo da via). Sem a randomização, a cada geração do autômato faria o sistema chegar próximo a um ponto estacionário, onde os veículos apresentariam velocidades constantes (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992, tradução nossa; SOUSA, 2002).

4.3.1.2.2 Modelo com Controle de Cruzamento (TCA-CC)

O comportamento típico dos autômatos estocásticos é a constante geração de congestionamento artificiais. Devido a quantidade de ruído estocástico no modelo, um congestionamento pode ser formado a qualquer momento em qualquer densidade de veículos. Logo, uma forma de resolver essa formação constante é estabelecer um ramo de fluxo livre pelo diagrama (k, q) . Um exemplo do diagrama pode ser visto na figura 11, inibindo a randomização para veículos em alta velocidade (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa). Dessa forma é implementada uma nova regra (R0) no modelo de AC:

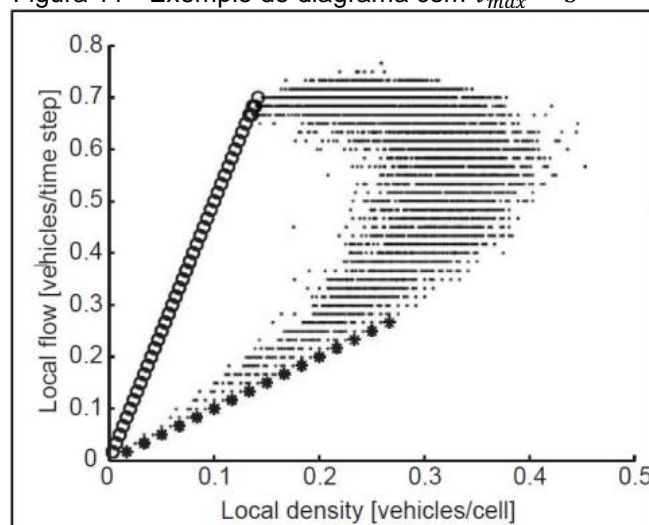
a) **R0**: determinar ruído estocástico:

$$v_i(t-1) = v_{max} \rightarrow p'(t) \leftarrow p$$

$$v_i(t-1) < v_{max} \rightarrow p'(t) \leftarrow 0$$

Onde p agora é substituído por $p'(t)$ na regra de randomização (regra R2 de Nagel-Schneckenberg) desabilitando a randomização para os veículos em alta velocidade, assim só poderão adquirir comportamento estocástico, os veículos que estiverem em um congestionamento.

Figura 11 - Exemplo do diagrama com $v_{max} = 5$



Fonte: Maerivoet e Moor (2005), p.23.

4.3.1.2.3 Modelo Estocástico de Fukui-Ishibashi (SFI-TCA)

Além do modelo determinístico, Fukui e Ishibashi desenvolveram um modelo estocástico somente para veículos que atingem a maior velocidade possível (LIMA, 2007; MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa). O modelo mantém as regras R1 e R3 do modelo de Nagel-Schreckenberg e adiciona uma nova regra:

a) **R0**: determinar ruído estocástico:

$$v_i(t - 1) = v_{max} \rightarrow p'(t) \leftarrow p;$$

$$v_i(t - 1) < v_{max} \rightarrow p'(t) \leftarrow 0.$$

Sendo que agora o p é substituído pelo $p'(t)$ na regra de randomização R2 do modelo Nagel-Schneckenberg.

4.3.1.3 Modelos *Slow-to-start*

Para obter um comportamento correto do fluxo de tráfego e um congestionamento estável, é necessário que o tempo mínimo de reação de um veículo seja menor que o tempo para sair do congestionamento. Os modelos *Slow-to-start* procuram simular de alguma forma essa reação de restabelecer o movimento de um veículo parado. Para a aplicação do modelo *Slow-to-start* utilizam-se duas condições diferentes nas simulações: uma homogênea onde em uma pista os veículos são distribuídos igualmente e outra congestionada com uma distribuição heterogênea (LIMA, 2007; MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

4.3.1.3.1 Modelo Takayasu-Takayasu (T^2 -TCA)

Proposto por Takayasu e Takayasu, o modelo Takayasu-Takayasu (T^2) é baseado no modelo 184, incorporando um atraso na aceleração de veículos parados. A ideia surgiu devido ao fato de que um veículo em alta velocidade pode facilmente desacelerar, porém leva tempo para iniciar seu movimento a partir de uma condição estacionada sendo um dos primeiros modelos propostos para simular o efeito *Slow-to-start*. Dessa forma, Takayasu-Takayasu introduziram um atraso na

aceleração, onde o veículo apenas se move ao reconhecer o movimento do veículo líder (que se encontra a sua frente) (LIMA, 2007; MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa). Traduzindo o modelo T² nas regras do modelo de Nagel-Schreckenberg tem-se:

- a) **R1**: Frenagem: $v_i(t - 1) > g_{s_i}(t - 1) \rightarrow v_i(t) \leftarrow g_{s_i}(t - 1)$;
- b) **R2**: atraso na aceleração: $v_i(t - 1) = 0 \wedge g_{s_i}(t - 1) \geq 2 \rightarrow v_i(t) \leftarrow 1$;
- c) **R3**: movimentação: $x_i(t) \leftarrow x_i(t - 1) + v_i(t)$.

A partir desta sequência de regras, um veículo se manterá em movimento na velocidade de uma célula por transição a menos que o veículo tenha de frear e parar de acordo com a regra R1. Só é permitida a aceleração do veículo caso exista espaço suficiente como é indicado na regra R2. Como resultado desta sequência, ocorre um atraso que afeta somente os veículos parados (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

4.3.1.3.2 Modelo de Benjamin, Johnson e Hui (BJH-TCA)

O modelo de Benjamin, Johnson e Hui (BJH-TCA) foi proposto ao mesmo tempo que o T² de Takayasu-Takayasy. O modelo consiste em considerar que a parada do veículo não é decorrente apenas do espaço existente entre os veículos, mas também se ele parou devido a outro veículo a sua frente. Sendo assim, adiciona-se uma nova variável para a regra de *slow-to-start* sendo ela uma probabilidade $1 - p_s$ onde se o veículo não se move, então ele tenta se mover novamente mas desta vez com a probabilidade p (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

4.3.1.3.3 Modelo Velocity Dependency Randomization (VDR-TCA)

O modelo *Velocity Dependency Randomization* (VDR-TCA) trata-se de uma forma generalizada do STCA de Nagel-Schreckenberg aplicando as probabilidades de desaceleração tanto para veículos em movimento como nos modelos estocásticos quanto para veículos parados como nos modelos *Slow-to-start*

(MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa). Dessa forma, o modelo VDR- TCA aplica as seguintes alterações nas regras do STCA:

a) **R0**: determinar ruído estocástico:

$$v_i(t-1) = 0 \rightarrow p'(t) \leftarrow p_0;$$

$$v_i(t-1) > 0 \rightarrow p'(t) \leftarrow p;$$

b) **R1**: aceleração e frenagem:

$$v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t-1) + 1, g_{s_i}(t-1), v_{max}\};$$

c) **R2**: randomização:

$$\varepsilon(t) < p'(t) \rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\};$$

d) **R3**: movimentação:

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t).$$

4.3.2 Modelos de Células Múltiplas

Como citado anteriormente, os modelos de células simples consistem em uma configuração de uma única célula, onde por exemplo, o veículo tende a ocupar uma única célula. Nos modelos de células múltiplas, aplica-se a possibilidade de que o veículo ocupe mais de uma célula em sentido longitudinal (LIMA, 2007).

4.3.2.1 Modelo de Helbing-Schreckenberg (HS-TCA)

Maerivoet e Moor (2005, tradução nossa) afirmam que nos modelos de células múltiplas, considera-se que os veículos ocupam até mais de uma célula, dessa forma é possível a inserção de veículos de tamanhos diferentes na grade. Similar ao STCA, o modelo de Helbing-Schreckenberg utiliza-se do modelo *Optimal Velocity* (OV), gerando as seguintes regras:

a) **R1**: aceleração e frenagem:

$$v_i(t) \leftarrow v_i(t-1) + [\alpha (V(g_{s_i}(t-1)) - v_i(t-1))];$$

b) **R2**: randomização:

$$\varepsilon(t) < p \rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\};$$

c) **R3**: movimentação:

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t).$$

A função $V(g_{s_i})$ na regra R1 é uma forma discreta da função de OV, cujo significado é que os valores altos para o parâmetro α indicam uma rápida adaptação da velocidade do veículo para a OV, enquanto valores mais baixos indicam uma adaptação mais lenta.

4.3.2.2 Modelo *Brake-light* (BL-TCA)

O modelo *Brake-light* adiciona a ideia de um sistema de antecipação, considerando as luzes de frenagem de um veículo. O BL-TCA apresenta uma randomização para frenagem espontânea, além de introduzir o comportamento do modelo *Slow-to-start* e a introdução de elementos para sincronizar o tráfego (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa). Traduzindo o modelo BL-TCA sobre as regras do modelo STCA tem-se:

a) **R0**: determinar ruído estocástico:

$$b_{i+1}(t-1) = 1 \wedge t_{h_i}(t-1) < t_{s_i}(t-1) \rightarrow p(t) \leftarrow p_b;$$

$$v_i(t-1) = 0 \rightarrow p(t) \leftarrow p_0, \text{ else } \rightarrow p(t) \leftarrow p_d, b_i(t) \leftarrow 0;$$

b) **R1**: aceleração:

$$(b_i(t-1) = 0 \wedge b_{i+1}(t-1) = 0) \vee t_{h_i}(t) \geq t_{s_i}(t) \rightarrow v_i(t) \leftarrow \min\{v_1(t+1), v_{max}\};$$

c) **R2a**: determinar o espaço efetivo:

$$g_{s_i}^*(t) \leftarrow g_{s_i}(t-1) + \max\{\min\{v_{i+1}(t-1), g_{s_i}(t-1)\} - g_{security}, 0\};$$

d) **R2b**: frenagem:

$$v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t), g_{s_i}^*(t)\}, v_i(t-1) \rightarrow b_i(t) \leftarrow 1$$

e) **R3**: randomização:

$$\varepsilon(t) < p(t) \rightarrow p(t) = p_b \wedge v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \rightarrow b_i \leftarrow 1, v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\};$$

f) **R4**: movimentação:

$$x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t).$$

Na sequência de regras, identifica-se $b_i(t)$ como o estado (0 ou 1) da luz do freio em um intervalo de tempo t . Onde t_{h_i} determina o tempo que um veículo leva para alcançar o veículo líder que fica em comparação com horizonte de

interação t_{s_i} , que depende da velocidade v_i e é restringida pelo h . Caso o veículo mantenha-se muito distante, não haverá interferência no veículo seguidor. A probabilidade de desaceleração p na regra R1 corresponde tanto à regra de frenagem p_b quanto a regra de *Slow-to-start* p_0 ou a desaceleração p_d .

4.3.2.3 Modelo Kerner, Klenov e Wolf (KKW-TCA)

De acordo com Maerivoet e Moor (2005, tradução nossa) o modelo KKW-TCA consiste em incorporar uma noção de distância de sincronização (*synchronisation distance*) para veículos individuais utilizando as seguintes regras:

a) **R1a**: determinar a distância de sincronização:

$$D_i(t) \leftarrow D_0 + D_1 v_i(t-1);$$

b) **R1b**: determinar a aceleração e desaceleração:

$$v_i(t-1) < v_{i+1}(t-1) \rightarrow \Delta_{acc_i}(t) \leftarrow a;$$

$$v_i(t-1) = v_{i+1}(t-1) \rightarrow \Delta_{acc_i}(t) \leftarrow 0;$$

$$v_i(t-1) > v_{i+1}(t-1) \rightarrow \Delta_{acc_i}(t) \leftarrow b;$$

c) **R1c**: determinar a velocidade desejada:

$$g_{s_i}(t-1) > (D_i(t) - l_i) \rightarrow v_{des_i}(t) \leftarrow v_i(t-1) + a;$$

$$g_{s_i}(t-1) \leq (D_i(t) - l_i) \rightarrow v_{des_i}(t) \leftarrow v_i(t-1) + \Delta_{acc_i}(t);$$

d) **R1d**: determinar a velocidade determinística:

$$v_i(t) \leftarrow \max\{0, \min\{v_{max}, g_{s_i}(t), v_{des_i}(t)\}\};$$

e) **R2a**: determinar a probabilidade de aceleração:

$$v_i(t) < v_p \rightarrow p_a(t) \leftarrow p_{a1}$$

$$v_i(t) \geq v_p \rightarrow p_a(t) \leftarrow p_{a2}$$

f) **R2b**: determinar a probabilidade de frenagem:

$$v_i(t) = 0 \rightarrow p_b(t) \leftarrow p_0$$

$$v_i(t) > 0 \rightarrow p_b(t) \leftarrow p_d$$

g) **R2c**: determinar o ruído estocástico:

$$\varepsilon(t) < p_a(t) \rightarrow \eta_i(t) \leftarrow a$$

$$p_a(t) \leq \varepsilon(t) < p_a(t) + p_b(t) \rightarrow \eta_i(t) \leftarrow -b$$

$$\varepsilon(t) \geq p_a(t) + b(t) \rightarrow \eta_i(t) \leftarrow 0$$

h) **R2d**: determinar a velocidade estocástica:

$$v_i(t) \leftarrow \max\{0, \min\{v_{max}, v_i(t) + \eta_i(t), v_i(t) + a\}\}$$

i) **R3**: movimentação: $x_i(t) \leftarrow x_i(t - 1) + v_i(t)$.

Na parte determinística das regras (regras de R1a até R1d), a distância de sincronização D_i é calculada primeiro com a regra R1a que utiliza uma função linear. A regra R1c determina a velocidade desejada v_{des_i} , onde a primeira parte da regra permite que o veículo acelere, enquanto a segunda parte utiliza a aceleração Δ_{acc_i} da regra R1b. Dessa forma, o veículo procura adaptar sua velocidade a do seu líder frontal quando o mesmo se encontra dentro da distância de sincronização. A regra R1d calcula a velocidade determinística levando em consideração a velocidade máxima v_{max} , o espaço entre veículos g_{s_i} , para evitar colisões e a velocidade desejada v_{des_i} . (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

Na parte estocástica das regras (R2a até R2d), é introduzida uma randomização para calcular a velocidade na regra R2d por meio de uma aceleração estocástica η_i . O valor de η_i é definido pela regra R2c utilizando a probabilidade p_a para a aceleração e p_b para a frenagem. A probabilidade p_a é dependente da velocidade determinística dos veículos e dos parâmetros v_p , p_{a1} e p_{a2} com $p_{a1} > p_{a2}$ e $p_{a1} + p_{a2} \leq 1$. A probabilidade p_b é dependente da velocidade determinística, da probabilidade de desaceleração p_d e da probabilidade *Slow-to-start* p_0 com $p_0 > p_d$. (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

5 TRANSIM

A teoria dos AC pode ser aplicada na simulação de diversos fenômenos, sendo eles naturais ou não de forma que se assemelhem a realidade. Ela utiliza sequências de regras simples que alteram os estados de uma grade, permitindo assim fácil assimilação dos resultados. Dentro dos AC existem modelos próprios para simulação de tráfego, seguindo uma abordagem específica de simulação (macroscópica, microscópica ou mesoscópica) define-se qual o melhor modelo de regras para uma simulação.

Através dos modelos de AC existentes é possível determinar novos modelos seguindo a teoria dos AC, uma vez que determinando uma grade, as células e os estados, basta desenvolver as regras do autômato para que se crie um novo modelo.

O TRANSIM trata-se de um protótipo de simulador de tráfego baseado em ACs desenvolvido por Pizzolo (2015), como um trabalho de conclusão de curso. O protótipo original abrange uma área específica para a simulação, sendo esta área, o entorno da UNESC na região de Criciúma. O TRANSIM propôs um modelo específico de AC que permite a inserção de semáforos, lombadas, faixas de pedestres, entre outros, na via original.

O desenvolvimento do TRANSIM dividiu-se em três etapas, sendo elas:

- a) **levantamento bibliográfico:** uma vez que é necessário conhecer e estudar sobre os fundamentos de ACs e seus modelos em fluxo de tráfego;
- b) **definição das ferramentas:** onde são definidas as ferramentas nas quais o protótipo será desenvolvido. Sendo neste caso utilizado o sistema Android com a ferramenta Android Studio;
- c) **definição do AC:** onde se determina qual o melhor modelo a ser aplicado no simulador em questão. Através da análise dos modelos, identificou-se a necessidade da criação de um novo modelo, pois os modelos existentes limitariam o protótipo impedindo as alterações definidas.

5.1 MODELO E DEFINIÇÕES DO TRANSIM

O objetivo principal é o desenvolvimento de um simulador de tráfego urbano para dispositivos móveis utilizando os conceitos de ACs permitindo determinadas alterações de estruturas das vias. Para o seu desenvolvimento, criou-se um modelo de simulação seguindo os seguintes padrões (PIZZOLO, 2015):

- a) **abordagem** macroscópica: o fluxo de tráfego deve ser avaliado como um todo;
- b) **estocástica**: há a necessidade da aplicação de regras randômicas para evitar um fluxo fixo que não condiz com a realidade;
- c) **dinâmicas**: por tratar-se de um estudo de um sistema ao longo do tempo;
- d) **discretas**: a evolução é gerada pela avaliação dos veículos gerando um evento que pode alterar os estados da grade;
- e) **células simples**: cada veículo representa uma única célula na grade;

Com relação as características de AC, o TRANSIM segue as seguintes definições:

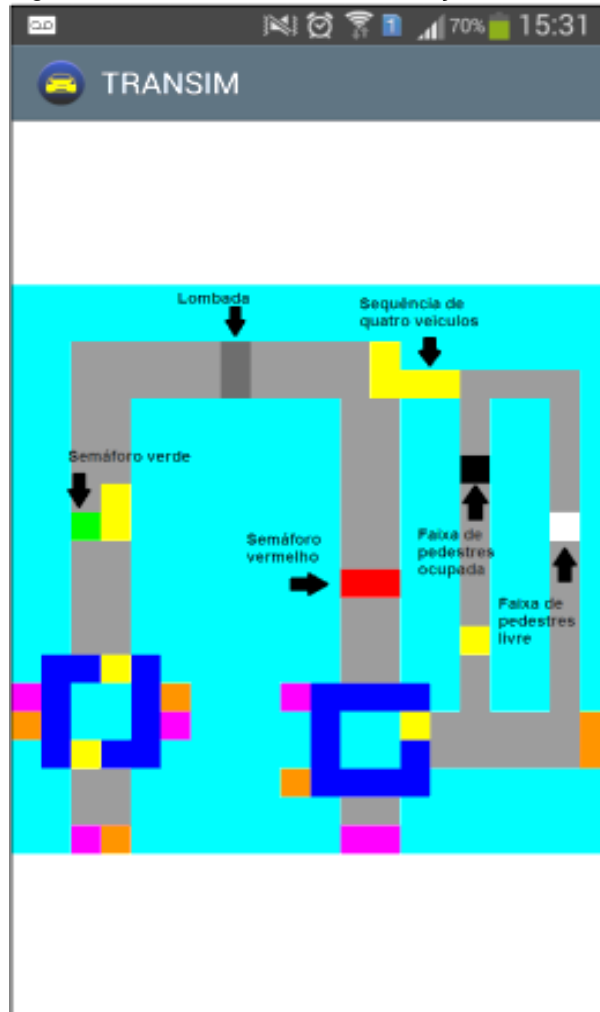
- a) **forma geométrica**: quadrangular;
- b) **dimensão**: bidimensional;
- c) **vizinhança**: Von Neumann;
- d) **tamanho da vizinhança**: raio igual a 1 (células adjacentes à célula central);
- e) **transição de estado**: depende do estado da célula atual e das células vizinhas.

5.2 DESENVOLVIMENTO DO TRANSIM

A área de atuação definida para a simulação do fluxo de tráfego foi o entorno da UNESC. Como os ACs trabalham utilizando uma grade com células para a execução das regras torna-se necessário aplicar o conceito sobre a área determinada. A figura 12 mostra a grade de células de tamanho 20x20 (20 colunas

por 20 linhas) representando o entorno da UNESCO, onde cada célula representa um estado com um objetivo específico (PIZZOLO, 2015).

Figura 12 - Grade ao iniciar a simulação



Fonte: Pizzolo (2015), p.63.

5.2.1 Configurações e estados

Todos os estados da grade possuem configurações internas que permitem o gerenciamento dos estados, sendo assim cada estado pode ter várias configurações, evitando que ocorram inconsistências durante a simulação (PIZZOLO, 2015). Sendo as seguintes configurações:

- a) **direção direita ou esquerda:** determina qual direção de tráfego a célula permite;

- b) **controle de direção:** indica se é permitido ou não a circulação para as células vizinhas;
- c) **célula original:** indica a configuração original da célula ou seja, quanto a mesma é alterada para o estado veículo, seu estado original é mantido;
- d) **coluna anterior:** indica a coluna anterior ocupada pelo estado veículo na ultima iteração;
- e) **linha anterior:** indica a linha anterior ocupada pelo estado veículo na ultima iteração;
- f) **redução em lombada:** indica a redução do estado veículo caso alguma célula vizinha possua o estado lombada;
- g) **alterada na ultima iteração:** indica se a célula foi ou não alterada na ultima iteração;
- h) **peso da célula:** valor inteiro definido para controlar a circulação na rotatória, sendo um valor exclusivo da rotatória;
- i) **saída rotatória:** indica se é uma célula que permite a saída da rotatória;
- j) **contador de semáforo:** trata-se de um contador de iterações, indicando quando um semáforo deve ser alterado.

A seguir são representados todos os estados presentes na grade assim como suas características:

- a) **início do tráfego:** representado pela cor laranja, o estado representa as células onde se inicia o tráfego de um veículo. É a única célula que pode ser alterada para o estado veículo quando não se encontra o veículo na grade. Possui como configurações direção direita ou esquerda e controle de direção;
- b) **fim do tráfego:** representado pela cor rosa, representa as células que terminam a circulação dos veículos. Possui como configurações direção direita ou esquerda e controle de direção;
- c) **fixo:** representado pela cor azul claro, o estado representa as células que não permitem o tráfego de veículo. Não possui configuração;

- d) **via**: representado pela cor cinza, o estado representa as células em que é permitido o trânsito dos veículos. Possui como configuração direção direita ou esquerda e controle de direção;
- e) **rotatória**: representado pela cor azul, indica as células onde o veículo pode circular em sentido anti-horário. Possui como configuração direção direita ou esquerda, controle de direção, peso da célula e saída rotatória;
- f) **veículo**: representado pela cor amarela, indica o veículo. Possui como configuração a célula original, coluna e linha anterior, redução em lombada e se foi alterada na última iteração;
- g) **lombada**: representado pela cor cinza escuro, indica a célula onde o veículo tenha que reduzir a velocidade ao transitar. Possui configurações como direção direita ou esquerda e controle de direção;
- h) **semáforo vermelho**: representado pela cor vermelha, indica as células onde o veículo não pode circular. Possui como configuração direção direita ou esquerda e controle de direção;
- i) **semáforo verde**: representado pela cor verde, indica as células onde o veículo pode circular assim como o estado da via. Possui como configuração direção direita ou esquerda e controle de direção;
- j) **faixa de pedestre ocupada**: representado pela cor preta, indica as células onde o veículo não pode circular. Possui como configuração direção direita ou esquerda e controle de direção;
- k) **faixa de pedestre livre**: representado pela cor branca, indica as células onde o veículo pode circular normalmente assim como o estado da via. Possui como configuração direção direita ou esquerda e controle de direção.

5.2.2 Regras e iterações

Para que ocorram as alterações na grade, cada célula é iterada de forma sequencial, onde ocorre a avaliação do estado anterior e atual da célula e dos estados vizinhos, logo, de acordo com os estados, são aplicadas as regras de transição corretas (PIZZOLO, 2015).

Os primeiros estados a serem avaliados dentro do simulador são os de veículos, semáforos e faixas de pedestres, após a análise de toda a grade, avalia-se a vizinhança da célula atual determinando qual célula pode receber o estado de veículo (PIZZOLO, 2015). Durante a análise são abordadas as seguintes regras:

- a) **alteração prévia:** verifica se a célula na iteração atual já foi alterada e caso tenha sido, evita que seja alterada novamente;
- b) **existe vizinhança:** verifica se a célula atual possui todos os vizinhos de acordo com a vizinhança de *Von Newman*, caso não apresente a vizinhança, a célula não pode ser um estado veículo;
- c) **é permitido seguir a direção determinada:** verifica se o estado onde está o veículo permite que a célula vizinha receba o estado de veículo de forma a evitar que o veículo retorne na contramão;
- d) **é coluna anterior:** verifica se a coluna anterior da célula atual é a mesma da célula vizinha que está sendo analisada;
- e) **é linha anterior:** verifica se a linha anterior da célula atual é a mesma da célula vizinha que está sendo analisada;
- f) **direção da via:** a regra é aplicada caso a célula vizinha analisada encontra-se em um dos seguintes estados: via, fim de tráfego, lombada, semáforo verde e faixa de pedestre livre. Ela verifica se a célula vizinha analisada possui o a mesma direção, pois caso apresente uma direção oposta, não pode adquirir o estado de veículo;
- g) **saída de rotatória:** é aplicada caso a célula original esteja no estado de rotatória e a célula vizinha esteja em um outro estado, verificando assim se a célula original possui a configuração de saída de rotatória.

Caso não possua a configuração, a célula vizinha não pode adquirir o estado de veículo;

- h) **alteração de posição na rotatória:** é aplicada quando a célula original e a célula vizinha estão no estado de rotatória. Avalia-se o peso das duas células, caso o peso da célula original mais um seja o mesmo da vizinha ou caso o peso da original seja doze e o da vizinha um, a célula vizinha pode adquirir o estado de veículo;
- i) **proibido retornar ao início:** a célula vizinha que possuir o estado início do tráfego, não pode receber o estado de veículo;
- j) **proibido sair do circuito:** a célula vizinha que possuir o estado fixo, não pode receber o estado de veículo;
- k) **proibido passar o sinal vermelho:** a célula vizinha que possuir o estado semáforo vermelho, não pode receber o estado de veículo;
- l) **proibido atravessar faixa de pedestre:** a célula vizinha que possuir o estado faixa de pedestre ocupada, não pode receber o estado de veículo;
- m) **redução em lombadas:** verifica se a célula vizinha que estiver no estado de lombada já aguardou uma rodada de iterações, caso tenha aguardado, poderá receber o estado de veículo, caso contrário não.

Após a aplicação das regras acima, é gerada uma lista das células que estão aptas a receberem o estado de veículo, onde uma delas é selecionada de forma aleatória para que receba o estado de veículo (PIZZOLO, 2015).

Depois de avaliar quais os estados capacitados para receber o estado de veículo, avalia-se as regras relacionadas aos semáforos. Nesta etapa a célula atual deixa de ser considerada veículo para ser um dos estados de semáforo (PIZZOLO, 2015). Sendo assim tem-se a seguinte regra:

- a) **contador de iterações:** se o contador de iterações apresentar um valor menor que cinco, não há alterações no estado do semáforo, caso seja igual a cinco, o estado é alterado.

Após a avaliação dos semáforos, é realizado o mesmo procedimento para as faixas de pedestres, seguindo a seguinte regra:

a) **transição de pedestres**: trabalha de forma aleatória com uma chance de um para quinze de ocorrência de passagem de pedestres.

Concluindo a avaliação dos semáforos e faixas de pedestres, a última etapa consiste em inserir novos veículos na grade. Nesta etapa somente as células no estado início do tráfego são consideradas, seguindo as seguintes regras (PIZZOLO, 2015):

a) **permite a inserção de veículos**: verifica se a densidade máxima de veículos foi alcançada;

b) **existe célula no estado início do tráfego**: o sistema busca na grade e gera uma lista com todas as células que estão no estado início do tráfego, após a busca, executa esta regra verificando se a lista não está vazia.

Dessa forma, caso a densidade máxima de veículos não tenha sido atingida e ainda existam células no estado de início de tráfego, o sistema tende a adicionar um novo veículo na grade (PIZZOLO, 2015).

Quando o simulador é iniciado, a grade carrega todas as 400 células, seus estados e suas configurações. A simulação não termina, sempre que os veículos saem da grade, novos veículos são repostos para manter o fluxo. O fluxo é validado de célula para célula, permitindo visualizar de forma global toda a evolução da simulação (PIZZOLO, 2015).

A simulação apresenta a limitação de área, onde a única área existente e que pode ser trabalhada é o entorno da UNESC que já está pré-definido, sendo assim não é possível gerenciar a quantidade de vias ou recursos (semáforos, lombadas, faixas de pedestre) que podem existir dentro da simulação.

Outros fatores desconsiderados são a velocidade de aceleração dos veículo, desta forma o fluxo é constante (de célula para célula) tornando certas aplicações como a desaceleração na lombada difíceis de serem avaliadas.

5.3 RESULTADOS DO TRANSIM

O desenvolvimento do protótipo TRANSIM demonstra que a utilização de AC é um método eficaz para a simulação de fluxo de tráfego. Dentro do protótipo pode-se constatar que com até sessenta veículos dentro do fluxo a simulação ocorre com êxito, porém com valores acima de sessenta veículos ocorrem engarrafamentos em determinados trechos, isto se deve por dois motivos (PIZZOLO, 2015):

- a) os veículos selecionam as vias de forma aleatória, sendo assim, nem sempre escolhem as vias com menor tráfego;
- b) a simulação primeiro avalia as células do início da matriz para depois analisar as células nas últimas posições, sendo assim as células do início são executadas primeiro, impedindo a movimentação das outras.

De acordo com Pizzolo (2015), uma das vantagens do TRANSIM é a disponibilidade de alterações nas vias, como a inserção de semáforos, lombadas e faixas de pedestre. A inserção dessas alterações servem para demonstrar como o circuito age caso estas alterações fossem reais. O protótipo atualmente permite apenas a inserção de algumas lombadas, faixas de pedestres e semáforos em pontos pré-definidos pelo protótipo, uma quantidade fixa e que não pode ser alterada.

Dentro do levantamento bibliográfico existem diversos modelos de fluxo de tráfego utilizando AC, cada um com características e aplicações específicas. Porém não foram utilizados por conterem algumas informações que não são de suma importância para o protótipo (PIZZOLO, 2015).

6 TRABALHOS CORRELATOS

A aplicação da teoria dos ACs possui ampla utilização no estudo ou desenvolvimento de simulações de diversos tipos de fluxos que trabalham com mudanças de estado, sendo um dos mais comuns a aplicação sobre o estudo do fluxo de tráfego, a seguir tem-se alguns exemplos de trabalhos que demonstra as aplicações de AC:

6.1 UM SIMULADOR DE TRÁFEGO URBANO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES

Consiste de uma dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), pelo acadêmico Leonardo Daniel Tavares no ano de 2010 em Belo Horizonte.

Aborda a construção de um simulador de fluxo de tráfego utilizando a teoria de autômatos celulares de forma que o mesmo contenha recursos como paradas de ônibus, cruzamento, semáforos ou outros eventos que possam gerar congestionamentos (TAVARES, 2010).

O modelo de fluxo de tráfego utilizado é baseado no modelo Cellular Automata for Urban Traffic Simulation (CAUTS) que consiste de um AC bidimensional, estocástico não homogêneo, pois o mesmo é capaz de simular características específicas do tráfego como as avenidas, semáforos, paradas de ônibus, entre outros (TAVARES, 2010).

O modelo CAUTS foi simulado na plataforma Matlab na versão 7.0 utilizando um cenário que apresente todos os recursos definidos no modelo, além da geração de eventos que causem possíveis congestionamentos. O cenário foi gerado a fim de comparar o comportamento do trânsito livre com o trânsito em congestionamento (TAVARES, 2010).

Os resultados da simulação demonstram que o modelo se comportou de maneira adequada, onde a velocidade de movimento dos veículos reduz de acordo com o aumento da quantidade de veículos, demonstrando que quanto maior a

ocupação relativa de veículos em uma determinada área (congestionamento), têm-se uma redução na velocidade do fluxo (TAVARES, 2010).

Os resultados da comparação demonstram o comportamento esperado de um fluxo de tráfego sob algum evento ou incidente que cause a interrupção do mesmo, porém a aplicação de autômatos celulares para sua simulação é o que torna relevante sua aplicação. A utilização das regras e dos estados permite que o sistema mantenha um fluxo constante de iterações e por ser um método estocástico o CAUTS permite o surgimento de eventos aleatórios que procuram condizer com um fluxo de tráfego real, sendo assim a simulação aparenta ser viável para comparação dos fluxos.

6.2 MODELOS MICROSCÓPICOS PARA SIMULAÇÃO DO TRÁFEGO BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES

Trata-se de uma dissertação para a obtenção do grau de Mestre em Computação da Universidade Federal Fluminense (UFF), pelo acadêmico Edgar Barbosa Lima no ano de 2007 em Niterói.

O trabalho aborda a proposta de um modelo microscópico baseado em autômatos celulares com a finalidade de simular o comportamento do tráfego urbano em uma auto-estrada (LIMA, 2007);

O modelo é baseado em um esquema de antecipação com o objetivo de evitar colisões na simulação recalculando a velocidade dos veículos, é utilizado também um modelo de multi-célula para definir diferentes acelerações e tamanhos de veículos e por fim é aplicada uma extensão de modelagem para considerar múltiplas faixas em uma via permitindo a mudança de faixas (LIMA, 2007).

É proposto um modelo probabilístico para atualizar a velocidade de cada veículo considerando o espaço disponível para descolamento. Para evitar as colisões na simulação, é inserido uma iteração que torna o algoritmo explícito no tempo, caso o veículo a frente não ande o esperado (LIMA, 2007).

O modelo apresentou bons resultados com poucas variáveis de calibração e mesmo com a configuração de multi-célula, não houve alteração nas principais características do modelo, dessa forma é possível considerar diversas possibilidades

de aceleração e desaceleração além de tamanhos de veículos sem que o resultado final seja comprometido (LIMA, 2007).

A aplicação de uma configuração multi-célula torna o controle das regras do autômato mais complexo, onde há a necessidade de levar outras variáveis em consideração e não apenas a posição e velocidade do veículo. De acordo com os resultados, o sistema de antecipação é funcional, onde dentro de um fluxo com a probabilidade de randomização da velocidade a aplicação de uma rotina que recalcula a velocidade dos veículos a cada iteração permite que não ocorram os acidentes.

6.3 UM MODELO DE AUTÔMATO CELULAR DE TRÁFEGO CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO ESTADO DE CONDUÇÃO NA RANDOMIZAÇÃO

Trata-se de um artigo apresentado na 2013 International Conference on Computational and Information Sciences por Zhengtao Xian et al. no ano de 2013 em Barcelona.

O artigo aborda um modelo de fluxo de tráfego utilizando autômatos celulares sendo baseado no modelo de Nagel-Schreckenberg (NS) aplicando uma forma de randomização para diferentes estados de direção (XIANG et al, 2013, tradução nossa).

O modelo consiste na alteração autômato NS onde a probabilidade de randomização não é influenciada pelo resultado da aceleração e redução. O modelo desenvolvido adiciona essa probabilidade, além de aplicar as regras do modelo *Slow-to-start* para a aceleração do veículo (XIANG et al, 2013, tradução nossa).

Os resultados obtidos demonstram que o fluxo máximo é maior que o fluxo do modelo NS e que a evolução do tráfego se torna mais complexa (XIANG et al, 2013, tradução nossa).

O modelo NS é uma base para o desenvolvimento de novas regras ou modelos de simuladores de tráfego, ele permite a adição e alteração de regras de modo a criar novos modelos de autômatos. De acordo com os resultados, a aplicação da randomização sobre a redução determinística do modelo NS tornou o fluxo mais compacto, permitindo maior densidade de veículos, dessa forma é possível utilizar

esse novo modelo na simulação de fluxos de tráfego que necessitem maior concentração de veículos.

6.4 UM MODELO MELHORADO DE AUTÔMATO CELULAR PARA FLUXO DE TRÁFEGO

Trata-se de um artigo apresentado na The Eighth International Conference on Electronic Measurement and Instruments por Gao Hebei do Wenzhou Vocational & Technical College no ano de 2007 na China.

O artigo aborda a proposta de um modelo de AC de fluxo de tráfego utilizando controle de cruzamentos através de políticas de tráfego (HEBEI, 2007, tradução nossa).

O autômato utiliza o modelo Biham-Middleton-Levine (BML) de tráfego que consiste de um número de veículos em posições iniciais aleatórias, onde cada veículo pode adquirir uma das seguintes funcionalidades: mover-se apenas para baixo ou mover-se apenas para a direita. Sobre o modelo BML o autor aplica os conceitos de seções de tráfego e políticas de tráfego, onde é avaliado o comportamento dos veículos durante um cruzamento (HEBEI, 2007, tradução nossa).

Os resultados obtidos demonstram que com a aplicação das políticas de tráfego a performance do fluxo aumenta consideravelmente, no modelo sem as políticas, em baixa densidade de veículos há o fluxo livre de veículos, enquanto em alta densidade há o congestionamento. As políticas de fluxo permitem que o veículo somente entre no cruzamento se o mesmo não estiver ocupado por outro veículo (HEBEI, 2007, tradução nossa).

Sem a aplicação das políticas de tráfego sobre o modelo BML os veículos tendem a ocupar a mesma célula nos cruzamentos, pois não são regidos por uma regra que possa restringir o acesso a célula. O novo modelo utilizando as regras de políticas de tráfego demonstra que a simples adição de regras e exceções sobre modelos pré-existentes de autômatos pode gerar novos modelos possíveis para simulações.

6.5 UM MODELO DE AUTÔMATO CELULAR PARA TRÁFEGO EM AUTO-ESTRADA

Consiste de um artigo publicado no Journal de Physique I por Kai Nagel e Michael Schreckenberg no ano de 1992 na França.

O artigo consiste em propor um modelo de AC estocástico e discreto para simular o tráfego em auto-estradas (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992, tradução nossa).

O modelo desenvolvido pelos próprios autores consiste de um autômato unidimensional, cujas células da grade representam a presença ou não de um veículo; O modelo é gerenciado por quatro regras aplicadas sobre todos os veículos, sendo elas: aceleração, redução, randomização e movimentação. Através desta sequência de regras é modelado o fluxo de uma via (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992, tradução nossa).

Os resultados obtidos demonstram que o modelo é vantajoso computacionalmente e que representa o desenvolvimento de um fluxo de trânsito de forma natural. O modelo se utiliza mais dos elementos do comportamento individual do veículo, sendo assim melhor utilizado em simulações que trabalham com o comportamento individual (NAGEL; SCHRECKENBERG, 1992, tradução nossa).

O modelo de Nagel-Schreckenberg utiliza regras simples na modelagem, permitindo a adição de novas regras a fim de criar novos modelos de simulação. Por esse motivo vários autores se utilizam do modelo para a elaboração de novas regras, uma vez que as regras básicas da movimentação dos veículos já está pré-definida.

7 IMPLEMENTAÇÃO DA SIMULAÇÃO

A teoria de ACs permite a elaboração de simulações que buscam reproduzir fenômenos sendo eles naturais ou não naturais de forma que se assemelhem a realidade. Por ser constituído de uma grade e um conjunto de células, é possível construir tal simulação com base em regras que alteram os estados de cada célula, estas regras normalmente avaliam a célula atual e as células adjacentes de modo a especificar qual valor deverá ser apresentado nas células avaliadas. Este conjunto de regras comanda então a evolução dos estados dentro da grade, entregando resultados na medida em que a simulação ocorre.

Um dos exemplos de fenômenos trabalhados pelos AC é a simulação do fluxo de tráfego de veículos, onde existem diversos modelos de regras que avaliam diferentes características de um fluxo de tráfego, como a frenagem e aceleração dos veículos, bem como a velocidade dentro do circuito. Estes modelos possuem características e metodologias próprias para sua aplicação na simulação de tráfego.

Para desenvolver uma simulação que trabalhe com fluxo de tráfego, é necessário conhecer seu funcionamento, para isso é utilizada a teoria do fluxo de tráfego que aborda conceitos que estão diretamente ligados em como um AC deve ser moldado para melhor representar o fluxo. Dentro da teoria de fluxo de tráfego, utiliza-se o conceito das abordagens para a simulação, sendo elas a macroscópica que avalia o fluxo como um todo, a microscópica que avalia a relação entre os veículos próximos e a mesoscópica que trabalha com uma integração entre as duas abordagens anteriores, resultando em analisar um conjunto de veículos em vez da sequência veículo-veículo.

Além da abordagem de simulação, deve-se ressaltar a classificação de como as simulações são implementadas, podendo ser determinísticas ou estocásticas, estáticas ou dinâmicas e discretas ou contínuas.

O protótipo implementado consiste de um simulador de fluxo de tráfego urbano baseado em ACs, usando o TRANSIM como base. As alterações feitas sob o TRANSIM permitem que o usuário elabore o próprio circuito de trânsito de modo a

testar diversas possibilidades e projetos de vias de forma a se assemelhar com a realidade.

Um dos objetivos do estudo é gerar novas regras de ACs que permitam ao usuário maior personalização e interação na montagem do circuito. O presente trabalho utiliza determinadas regras do modelo TRANSIM, além da alteração de adição de novas regras.

7.1 METODOLOGIA

Foi realizado um levantamento bibliográfico direcionado ao estudo do fluxo de tráfego, teorias de fluxo de tráfego, meios de transporte e regras de trânsito. Um dos principais tópicos de estudo foram os ACs, pois é necessária a compreensão teórica dos mesmos para o desenvolvimento prático. Juntamente com a teoria dos ACs, foram levantados e estudados os modelos de Autômatos Celulares direcionados ao fluxo de tráfego de veículos.

Na segunda etapa do trabalho foram definidas as ferramentas a serem utilizadas no desenvolvimento do protótipo. De modo a trabalhar com uma aplicação em desktop, foi optado o uso da linguagem de programação *Java* utilizando a *Integrated Development Environment (IDE) NetBeans*, por ser uma ferramenta prática no desenvolvimento, permitindo fácil manuseio das regras e da simulação.

A terceira etapa foi a definição do AC a ser utilizado no desenvolvimento. O modelo utilizado como base foi o protótipo TRANSIM, se utilizando então das suas especificações, modelo de grade e células, além das regras que regem o funcionamento do fluxo de tráfego. Juntamente com o modelo do TRANSIM, foram criadas novas regras para avaliar determinadas ações que o mesmo não tem controle ou possui um controle demasiadamente rígido.

7.1.1 Desenvolvimento

O protótipo foi desenvolvido utilizando como ambiente o *Java JDK 8 update 131*, com a IDE *NetBeans 8.2*. A máquina onde foi desenvolvido o protótipo

possui *8Gb RAM, 500Gb HD, processador Intel Core i5-6600K 3.5GHz* com sistema operacional *Windows 7 Ultimate 64 Bits*.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo elaborar um simulador de tráfego baseado em ACs para desktop, criando um modelo de simulação que permita que toda a estrutura tanto das vias como das sinalizações sejam alteradas.

Para a criação do modelo de simulação de fluxo de tráfego baseado em AC, foram seguidos os seguintes padrões de simulação de veículos com base nas teorias de AC e fluxo de tráfego:

- a) **macroscópica**: será avaliado o fluxo de tráfego como um todo;
- b) **estocástica**: em determinadas ocasiões, há a necessidade de regras randômicas;
- c) **dinâmica**: trata-se de um sistema ao longo do tempo;
- d) **discreta**: a evolução do autômato é feita pela avaliação dos estados caracterizados como veículos, dessa forma a evolução ocorre por etapas;
- e) **células simples**: cada veículo é representado por uma única célula na grade;

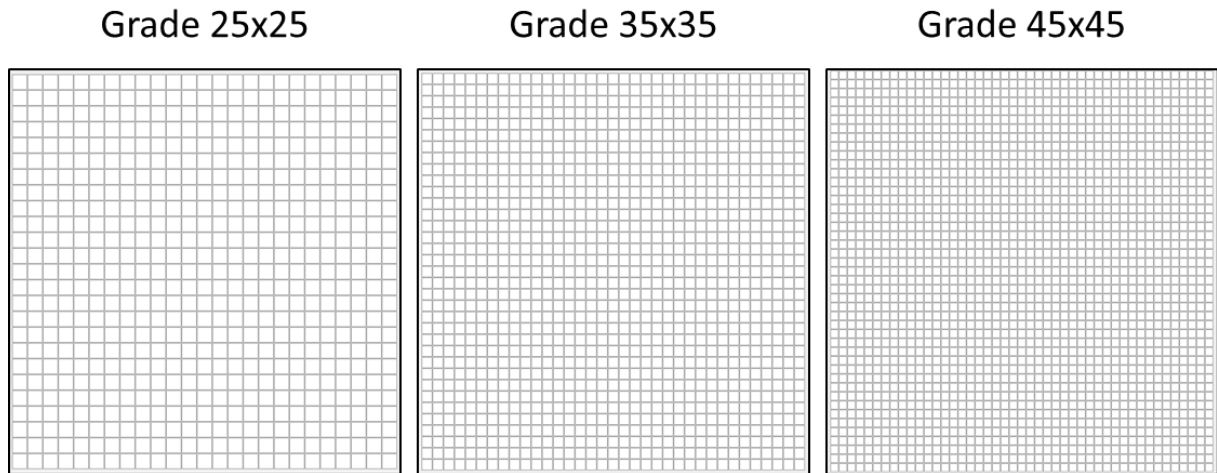
Sobre os ACs, o protótipo baseou-se nas seguintes características:

- a) **forma geométrica da célula**: quadrangular;
- b) **dimensão do AC**: bidimensional;
- c) **vizinhança**: Von Neumann;
- d) **tamanho da vizinhança**: raio igual a 1 (células adjacentes a célula central);
- e) **transição de estado**: depende do estado da célula atual e das células vizinhas;

A simulação trabalha inicialmente com uma grade padrão cujo tamanho é de 25 colunas, por 25 linhas, sendo permitidas ao usuário outras duas opções de tamanho variando entre 35 colunas e 35 linhas ou até mesmo 45 colunas e 45 linhas, o que fornece uma grade maior para circuitos mais extensos ou complexos. O circuito de vias pode ser montado pelo usuário dentro deste conjunto de células. A figura 13 representa os três modelos de grade disponíveis, demonstrando a quantidade de células e a sua disposição na grade. A grade localiza-se dentro de um

frame, desta forma ela é redimensionada de acordo com a resolução da tela onde é executada, evitando que a grade fique fora de posição.

Figura 13 - Variações de grades



Fonte: Do autor

Cada célula pode apresentar estados diversos, sendo estes estados de via, propriedade ou veículo, todos os estados criados possuem configurações que determinam suas características. Essas configurações buscam evitar que ocorram inconsistências durante a simulação, como por exemplo, um veículo entrar em uma via com direção oposta (contramão) ou então um veículo passar sobre outro veículo. Desta forma, uma célula pode possuir vários estados internos. Segue as configurações internas dos estados:

- a) **direção**: indica a direção das células, sendo retornado os valores Norte, Sul, Leste e Oeste;
- b) **controle de direção**: verifica as células vizinhas, indica se permite a circulação do veículos (não permite entrar na contramão) e seleciona de forma aleatória a direção do veículo;
- c) **célula ocupada**: indica que um veículo passou pela célula recentemente. E ela deve impedir que outro veículo a ocupe enquanto os veículos estão em movimento, representando a distância segura entre um veículo e outro. Quando um veículo para, os sucessores ocupam a célula ocupada pois não há movimento;

- d) **redução**: determina que o veículo deve reduzir caso a célula de movimento seja uma lombada, faixa de pedestre ou trilho de trem;
- e) **contador de semáforo**: conta as iterações e serve para indicar quando um semáforo deve ser alterado.
- f) **gerador de cruzamento**: ajusta o centro de um cruzamento (cruzamento de duas vias de mão dupla) de forma que o mesmo permita que o veículo execute a movimentação correta
- g) **via de mão dupla vertical**: determina que a célula atual e a adjacente a direita recebam respectivamente a direção sul e a direção norte, representando assim uma via de mão dupla;
- h) **via de mão dupla horizontal**: determina que a célula atual e a adjacente abaixo recebam respectivamente a direção oeste e a direção sul, representando assim uma via de mão dupla.

Os estados são divididos em três grupos, sendo eles:

- a) **vias**: indica que a célula que receber este estado é uma via e está apta a ser acessada por uma célula de propriedade veículo. Os estados de via recebem como configuração a direção, controle de direção, gerador de cruzamento, . O grupo vias possui como estados: viaN, viaS, viaL, viaO, vazio;
- b) **propriedades**: indica as sinalizações que uma célula pode receber, desta forma uma célula pode conter o estado via e um estado propriedade. Os estados de propriedade recebem as configurações de redução e contador de semáforo. O grupo propriedades possui como estados: lombada, faixa de pedestres, semáforo vermelho, semáforo verde, trilho de trem, entrada e sem atributo;
- c) **veículos**: fornece o estado de veículo ou célula ocupada sobre uma via, desta forma uma célula pode conter até três estados conjuntos, uma via, uma propriedade e um veículo. Os estados de veículo recebem a configuração de célula ocupada. O grupo veículos possui como estados: carro, célula ocupada e vazio;

Abaixo, são representados todos os estados e suas respectivas características:

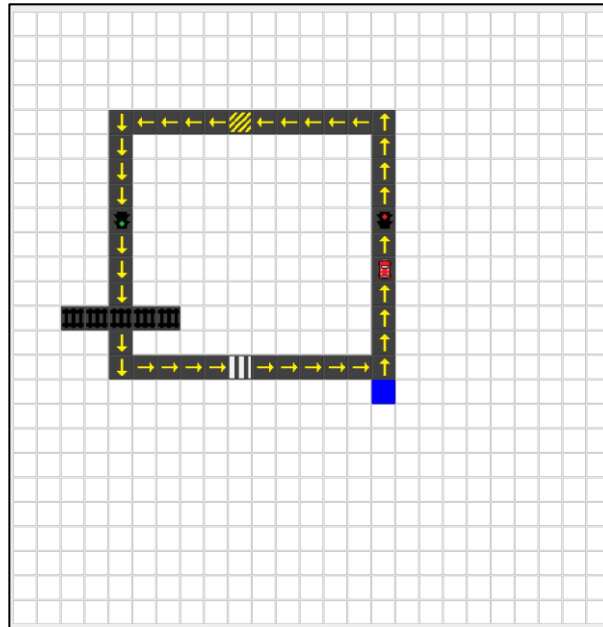
- a) **entrada**: representa as células onde inicia o fluxo de tráfego (de onde partem os veículos). Este estado é representado pela cor **azul** e não possui representação gráfica;
- b) **viaN**: representa a via de direção norte, indicando que a célula com este estado está direcionada para o norte. É representada por uma **seta para cima**;
- c) **viaS**: representa a via de direção sul, indicando que a célula com este estado está direcionada para o sul. É representada por uma **seta para baixo**;
- d) **viaL**: representa a via de direção leste, indicando que a célula com este estado está direcionada para o leste. É representada por uma **seta para a direita**;
- e) **viaO**: representa a via de direção oeste, indicando que a célula com este estado está direcionada para o oeste. É representada por uma **seta para a esquerda**;
- f) **vazio**: indica as células que não possuem nenhum estado ou configuração e não permitem nenhum tipo de circulação. Este estado é representado pela cor **branca** e não possui representação gráfica;
- g) **lombada**: representa o estado de lombada, indicando que o veículo deve desacelerar antes do mesmo deslocar-se para esta célula. É representada por **faixas diagonais amarelas**;
- h) **faixa de pedestres**: representa o estado de faixa de pedestres, indicando que o veículo deve desacelerar antes do mesmo deslocar-se para esta célula. É representada por **faixas verticais brancas**;
- i) **semáforo vermelho**: representa o estado de semáforo fechado, indicando que o veículo deve manter-se parado antes de deslocar-se para esta célula até que a mesma mude para o estado verde após um determinado número de iterações. É representada por um **semáforo vermelho**;

- j) **semáforo verde**: representa o estado de semáforo aberto, permitindo que o veículo transite livremente sobre a célula até que a mesma mude para o estado vermelho após um determinado número de iterações. É representada por um **semáforo verde**;
- k) **trilho de trem**: representa o estado de trilho de trem, indicando que o veículo deve desacelerar antes do mesmo deslocar-se para esta célula. É representada por **trilhos pretos**;
- l) **sem atributo**: representa o estado que não possui propriedade, este estado não possui representação, ele apenas indica que a célula em questão não possui nenhum tipo de sinalização;
- m) **carro**: representa o estado carro, indicando que a célula em questão está com um veículo transitando sobre ela. É representado por um **carro vermelho**, a representação gráfica do carro modifica sua direção de acordo com a direção da via sobre a qual ele transita;
- n) **célula ocupada**: representa o estado de célula ocupada, onde um veículo não pode transitar enquanto o veículo a sua frente estiver em movimento. Este estado não possui representação.

Todas as células que contém estados de vias ou propriedades diferentes de vazio, sem atributo ou entrada, recebem a cor **cinza escuro** para representar o asfalto de uma estrada.

A figura 14 demonstra uma grade 25x25 contendo exemplos de cada estado:

Figura 14 – Grade contendo células com todos os estados



Fonte: Do autor

A grade da figura 14 apresenta o menor tamanho de grade disponível no protótipo, com um total de 625 células, todas as células possuem estados iniciais, todos partindo do estado “vazio” para veículos e vias e do estado “sem atributo” para as propriedades. As células são iteradas uma a uma de forma sequencial, cada célula tem seu estado avaliado juntamente com o estado das células vizinhas, dessa forma aplicando as regras de transições correspondentes.

A primeira etapa do processo da simulação ocorre avaliando as células que apresentam o estado de entrada. Inicialmente são avaliados os estados vizinhos de cada entrada, determinando quais estados são vias e estão aptos a receber um estado carro sem que o mesmo entre na contramão. Ao determinar os estados disponíveis, caso as células vizinhas apresentem mais de uma via que possa receber um carro, é selecionada de forma aleatória uma destas células, a partir deste momento a célula recebe o estado carro. Caso existam diversas entradas, a quantidade de carros determinada pelo usuário é distribuída entre as entradas até que a quantidade de carros que devem ser inseridos seja zero.

De acordo com a figura 15 primeiro são verificadas as células vizinhas a entrada, então selecionada de forma aleatória a via que deverá receber o estado carro naquele momento como mostra a figura 16.

Figura 15 – Verificação das células vizinhas ao estado entrada

```
//PASSA POR TODAS AS CÉLULAS
for (int x = 0; x < length; x++) {
  for (int y = 0; y < width; y++) {
    //SEGURA O CARRO NA ENTRADA POR UMA ITERAÇÃO
    if (propriedade[x][y].equals("entrada") && iteracoes % 2 == 0) {
      //ADICIONA AS VIAS VIZINHAS DA ENTRADA EM UMA LISTA
      if (!vias[x + 1][y].equals("vazio") && !vias[x + 1][y].equals("viaO") && !veiculo[x + 1][y].equals("carro") && !veiculo[x + 1][y].equals("ocupada")) {
        select.add("leste");
      }
      if (!vias[x - 1][y].equals("vazio") && !vias[x - 1][y].equals("viaL") && !veiculo[x - 1][y].equals("carro") && !veiculo[x - 1][y].equals("ocupada")) {
        select.add("oeste");
      }
      if (!vias[x][y + 1].equals("vazio") && !vias[x][y + 1].equals("viaN") && !veiculo[x][y + 1].equals("carro") && !veiculo[x][y + 1].equals("ocupada")) {
        select.add("sul");
      }
      if (!vias[x][y - 1].equals("vazio") && !vias[x][y - 1].equals("viaS") && !veiculo[x][y - 1].equals("carro") && !veiculo[x][y - 1].equals("ocupada")) {
        select.add("norte");
      }
    }
  }
}
```

Fonte: Do autor.

Figura 16 – Seleção de via a receber o estado veículo

```
//VERIFICA SE EXISTEM CARROS PARA ENTRAR NO SISTEMA E SE EXISTEM VIAS DISPONIVEIS
if (totalCarros > 0 && select.size() > 0) {
  //SELECIONA UMA VIA ALEATORIA DENTRE AS DISPONIVEIS
  decide = random.nextInt(select.size());
  //MODIFICA A CÉLULA CORRESPONDENTE A VIA SELECIONADA
  //E REDUZ A QUANTIDADE DE VEICULOS DA ENTRADA E AUMENTA
  //A QUANTIDADE DENTRO DO CIRCUITO
  if (select.get(decide).equals("leste")) {
    veiculo[x + 1][y] = ("carro");
    totalCarros--;
    cars++;
  }
  if (select.get(decide).equals("oeste")) {
    veiculo[x - 1][y] = ("carro");
    totalCarros--;
    cars++;
  }
  if (select.get(decide).equals("sul")) {
    veiculo[x][y + 1] = ("carro");
    totalCarros--;
    cars++;
  }
  if (select.get(decide).equals("norte")) {
    veiculo[x][y - 1] = ("carro");
    totalCarros--;
    cars++;
  }
  select.clear();
}
}
```

Fonte: Do autor.

A partir da inserção dos carros dentro da simulação é onde se iniciam as regras de movimentação (transição dos estados). Nesta etapa o principal objetivo é avaliar a vizinhança das células que possuem estado carro determinando quais células vizinhas são possíveis candidatas a receberem o estado veículo. Nesta etapa são aplicadas as seguintes regras:

- a) **verificação da vizinhança:** neste momento, são avaliadas todas as células vizinhas a célula atual de acordo com a vizinhança de Von Newman, determinando assim quais as possíveis direções que o circuito pode tomar. Na simulação, as células vizinhas são determinadas da seguinte forma: a esquerda da célula atual $[coluna - 1][linha]$ recebe o valor oeste, a direita da célula atual $[coluna + 1][linha]$ recebe o valor leste, acima da célula atual $[coluna][linha - 1]$ recebe o valor norte e abaixo da célula atual $[coluna][linha + 1]$ recebe o valor sul. Caso alguma destas células não apresente algum estado de via ela não estará apta a receber o estado carro;
- b) **direcionamento da via:** esta regra verifica as direções possíveis que a célula atual pode determinar como candidatas. Uma célula vizinha somente pode receber o estado de carro da célula atual se sua direção for umas das direções correspondentes a direção da célula atual, por exemplo: caso a célula atual possua a direção norte e a célula norte $[coluna][linha - 1]$ possua direção sul, a mesma não está apta a receber o estado veículo, pois estaria seguindo na contramão. A regra é aplicada em determinada em ocasiões específicas, quando as células vizinhas possuem uma direção de via incompatível com a direção da célula atual. Como pode ser observada na figura 17, onde demonstra quais direções de vias estão disponíveis em determinada vizinhança de acordo com a direção da célula atual. É possível observar que para uma direção na célula atual, a célula oposta a sua direção não aceita uma direção oposta a sua.

Figura 17 – Verificação das direções de vias possíveis

VIZINHANÇA	DIREÇÃO DA CÉLULA ATUAL			
	NORTE	LESTE	SUL	OESTE
[coluna][linha-1]	N, L e O	N	-	N
[coluna+1][linha]	L	N, L e S	L	-
[coluna][linha+1]	-	S	L, S e O	S
[coluna-1][linha]	O	-	O	N, S e O

Fonte: Do autor.

- c) **ocupação prévia:** quando a célula atual encontra uma nova célula candidata a receber o estado carro, ela altera seu estado para célula ocupada, impedindo que outros carros a ocupem durante a mesma iteração;
- d) **redução:** quando a célula candidata apresenta o estado lombada, faixa de pedestre ou trilho de trem, a célula atual mantém o seu estado veículo por uma iteração, após isso ela segue seu percurso normalmente. Apesar de o estado lombada sobrescrever graficamente a direção da via, internamente a via ainda possui sua indicação de direção, sendo assim a célula ainda é avaliada pelo seu estado de via e por sua direção;
- e) **parada no semáforo vermelho:** caso a célula candidata apresente o estado de semáforo vermelho, a célula atual mantém-se no estado carro durante a quantidade de iterações necessárias para que o estado semáforo vermelho seja alterado para semáforo verde;

A simulação segue a sequência de regras anteriores, alterando o estado da célula candidata para o estado de carro a cada iteração. A célula atual que continua o estado de carro, passa a receber o estado de célula ocupada. Enquanto uma célula em estado carro estiver em transição, os estados de célula ocupada não podem assumir o estado de carro, considerando então que existe neste ponto a distância entre veículos, onde no trânsito real, consiste de uma margem de segurança para evitar colisões. Quando um estado carro estiver em parada, seja pela redução em uma lombada ou aguardando o estado semáforo vermelho, a célula ocupada

pode receber o próximo estado de carro formando uma fila de veículos aguardando a movimentação do veículo posterior.

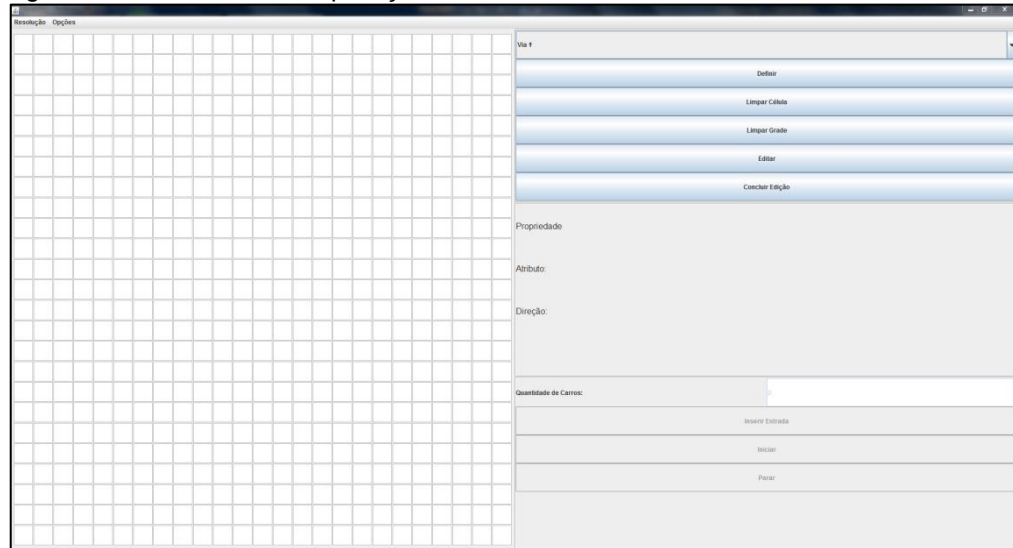
Após o início da simulação, ela atualiza todos os estados da grade a cada iteração, fazendo com que as células que eram idealizadas como candidatas, passem a receber o estado de carro e as células com estado carro passam a se tornar célula ocupada.

Juntamente com a etapa de atualização de estados, tem-se o controle de alteração do estado de semáforo, onde existe um contador de iterações, onde a cada oito iterações os estados de semáforo vermelho serão alternados para o estado de semáforo verde e vice-versa.

Quando uma célula atual cujo estado seja um carro, não apresentar nenhuma célula vizinha disponível (células vizinhas com estado vazio) ou a única célula disponível possui direção contrária, a célula atual passa a descartar o estado carro e volta ao seu estado padrão de via, considerando que o veículo saiu do circuito, dispensando a necessidade de inserir pontos de saída específicos. O mesmo só acontece se ao menos uma das células vizinhas seja um estado vazio, se todas as células vizinhas forem direções contrárias e não poderem ser candidatas, a célula atual mantém o estado carro até a parada da simulação.

A simulação é executada dentro de uma *thread* configurada para ser executada a cada um segundo, sendo que todas as regras são aplicadas antes que a grade seja recarregada, desta forma, a simulação primeiro executa todas verificações, regras e movimentações e no final a grade é atualizada para que a representação gráfica corresponda aos seus estados atuais. Na figura 18, tem-se a tela principal do protótipo exibindo a grade e todas as funcionalidades presentes dentro da aplicação.

Figura 18 – Tela inicial da aplicação



Fonte: Do autor.

O protótipo permite inserção e alteração de estados de todas as células da grade, permitindo que o usuário construa um circuito de trânsito de acordo com suas necessidades. A densidade de veículos que trabalham dentro do circuito é informada pelo usuário quando o mesmo inserir a quantidade de entradas que achar necessário na grade. Para que essas características possam ser inseridas dinamicamente pelos usuários, foram criadas opções para que o mesmo possa alterar a estrutura do circuito, como pode ser observado na figura 19.

Para garantir um funcionamento correto da simulação, as opções de inserção de estados, edição de estados e inserção de entradas só podem ser executadas quando a simulação estiver parada, desta forma, as opções são desabilitadas enquanto a simulação estiver em andamento e somente serão habilitadas novamente caso o usuário pare a simulação.

Figura 19 – Funcionalidades do protótipo

Via ↑	▼
Definir	
Limpar Célula	
Limpar Grade	
Editar	
Concluir Edição	
Propriedade	
Atributo:	
Direção:	
Quantidade de Carros:	0
Inserir Entrada	
Iniciar	
Parar	

Fonte: Do autor.

Dentre as funcionalidades que podem ser vistas nas figuras 17 e 18, tem-se as seguintes:

- caixa de seleção de estado:** aqui é selecionado o estado que será aplicado na célula selecionada. A caixa de seleção contém os seguintes estados: via↑ (via norte), via↓ (via sul), via→ (via leste), via← (via oeste), via↑↓ (via de mão dupla vertical), via↔ (via de mão dupla horizontal), semáforo verde, semáforo vermelho, faixa de pedestre, trilho de trem e lombada;
- definir:** altera o estado da célula selecionada de acordo com o estado selecionado na caixa de seleção de estado;
- limpar célula:** redefine todos os estados da célula selecionada, removendo os estados de via, de propriedade e de veículo, tornando-a uma célula vazia e sem atributos;

- d) **limpar grade**: redefine todos os estados de todas as células da grade, removendo os estados de via, de propriedade e de veículo tornando as células vazias e sem atributo;
- e) **editar**: habilita as opções de inserir e excluir as células após a conclusão da construção da grade, permitindo que o usuário edite o circuito montado;
- f) **concluir edição**: confirma a conclusão da construção do circuito, desabilita as opções de inserir e excluir estado e habilita as opções de inserir entradas e iniciar a simulação. A simulação só pode ser iniciada se a construção/edição estiver sido concluída;
- g) **informações da célula**: neste painel são exibidas as informações da última célula selecionada, representando o estado da mesma, a especificação do estado e a direção da via presente na célula;
- h) **quantidade de carros**: o usuário informa a quantidade de carros que deverão ser inseridas na simulação;
- i) **inserir entrada**: aplica o estado de entrada nas células selecionadas;
- j) **iniciar**: dá início a aplicação desabilitando todas as funcionalidades de inserção/edição e habilitando a opção de parar o circuito, evitando que o mesmo seja alterado durante sua execução;
- k) **parar**: para a execução da simulação, mantendo as células nos estados atuais e habilitando as opções de inserção e edição.

Além do painel de funcionalidades, o protótipo apresenta duas opções de menu, sendo elas a opção de resolução e de opções, dentro destes menus tem-se:

- a) **resolução pequena**: cria uma nova grade com 25 colunas por 25 linhas, um total de 625 células;
- b) **resolução média**: cria uma nova grade com 35 colunas e 35 linhas, um total de 1225 células;
- c) **resolução grande**: cria uma nova grade com 45 colunas e 45 linhas, um total de 2025 células;

- d) **grade**: uma opção alternável que permite habilitar ou desabilitar as bordas da célula, onde manter habilitado facilita no processo de edição e desabilitar facilita o processo de simulação;
- e) **salvar**: permite que o usuário salve o circuito montado em um arquivo. São apenas salvas as informações referentes aos estados de vias e propriedades, sendo assim não são salvos os veículos existentes na simulação;
- f) **abrir**: permite carregar um circuito salvo anteriormente para que o mesmo possa ser reutilizado ou até mesmo editado. É importante ressaltar que não é permitido abrir um circuito montado em uma resolução pequena numa grade de resolução diferente.

Para que ocorra a construção do circuito, o usuário seleciona as células que deseja que sejam alteradas, estas células selecionadas são representadas pela cor **cinza claro** e podem ser desmarcadas ao serem pressionadas novamente. Ao determinar o estado a ser aplicado e pressionar o botão definir, todas as células marcadas, recebem o estado definido, sendo assim, o circuito só é construído mediante a seleção de células pelo usuário.

O início da simulação se dá ao pressionar o botão iniciar, executando então a sequência de etapas citadas, partindo da inserção de veículos no circuito, verificação dos vizinhos de cada célula cujo estado seja um veículo e a alteração dos estados vizinhos. Assim é possível visualizar de uma forma global a evolução da simulação, com as alterações na quantidade de veículos, sinalizações e estrutura das células. Nesta simulação não são consideradas a velocidade e aceleração de veículos.

7.2 RESULTADOS OBTIDOS

Após o desenvolvimento deste protótipo verificou-se que a simulação de fluxo de tráfego utilizando AC é um método viável e eficaz. Através de um conjunto bem estruturado de regras, é possível exemplificar o tráfego de veículos de forma similar à realidade.

Em relação ao protótipo TRANSIM, a aplicação desenvolvida neste trabalho apresenta um número considerável de vantagens que complementam tal protótipo, sendo elas:

- a) **construção do circuito:** ao contrário do TRANSIM, esta aplicação permite que o usuário construa o circuito da forma que desejar, inserindo os estados onde lhe for conveniente ou houver necessidade, enquanto o TRANSIM trabalha com um circuito pré-montado que não permite ser alterado;
- b) **incremento e alteração de regras:** muitas das regras do TRANSIM foram utilizadas nesta aplicação, enquanto outras foram adaptadas ou até mesmo removidas. As regras que se diferenciam do TRANSIM são:
 - **célula ocupada:** ao invés de armazenar a informação de que uma célula foi alterada recentemente como no TRANSIM, esta regra gera uma distância segura entre os veículos, evitando que os mesmos entrem em colisão durante o circuito;
 - **entrada:** juntamente com o fato de que as entradas são definidas pelo usuário, esta regra se difere do TRANSIM por distribuir a quantidade de carros de forma aleatória nas vias adjacentes à célula de entrada e não de apenas inserir a quantidade especificada de veículos, dando a opção ao usuário de manter um fluxo constante ou apenas uma simulação rápida;
 - **saída:** remove-se a necessidade de utilizar estados de saída criando a regra onde os veículos saem do circuito de forma espontânea ao chegarem em uma via sem saída.Outras regras se tornam mais complexas em relação ao TRANSIM como a de direção, pelo fato de avaliar a direção de todas as células vizinhas ao invés de apenas determinar se a direção é oposta ou não;
- c) **quantidade de células/tamanho da grade:** a quantidade de células disponível é muito maior em comparação ao TRANSIM, permitindo a elaboração de circuitos mais extensos e complexos;

- d) **edição**: a possibilidade de editar o circuito célula por célula, podendo inserir novas vias e sinalizações logo após executar uma simulação;
- e) **distribuição de veículos**: a quantidade de entradas e onde se localizam as entradas ficam a critério do usuário, além de que a entrada seleciona de forma aleatória a direção (dentre as disponíveis) que o veículo deve seguir, diversificando as simulações;
- f) **visualização**: os estados são representados graficamente no circuito, assim como o estado veículo que se adapta a direção da via em que se localiza, melhorando visualmente a simulação;
- g) **armazenar e abrir circuitos**: a permissão de salvar um circuito montado e abrir futuramente para novas simulações ou alterações sobre um circuito já existente;
- h) **interface desktop**: se tornaria complicado para um engenheiro de trânsito que todas estas propriedades fossem realizadas em uma aplicação de dispositivos móveis, devido a necessidade de uma grande área de visualização e edição (uma vez que dispositivos móveis possuem tela pequena) o que acarretaria em dificuldade na elaboração dos circuitos, enquanto no desktop, se torna mais ágil a seleção das células além da visualização durante a construção e execução da simulação.

Utilizando como base o modelo de regras do TRANSIM, foram então elaboradas novas regras enquanto outras foram alteradas no quesito de algoritmo de execução. As novas regras desenvolvidas podem ser visualizadas na tabela 1:

Tabela 1 – Novas regras desenvolvidas

Regra	Descrição
Célula ocupada	Toda célula que apresenta um estado veículo deverá mudar seu estado para célula ocupada na próxima iteração. Este estado representa uma distância segura entre dois veículos que busca evitar colisões,
Entrada	Esta regra gerencia a entrada de veículos no circuito,

	distribuindo-os de forma equivalente entre todas os estados de entrada no circuito, além de selecionar de forma aleatória a via que receberá o veículo (considerando se há mais de um estado de via vizinho ao estado de entrada).
Saída	A regra consiste de que todo estado veículo que alcançar o final de um circuito (não possuir nenhum estado de via disponível para se mover) deverá automaticamente sair do circuito (o estado veículo é eliminado), sendo necessário que ao menos uma célula adjacente possua o estado vazio, caso contrario, se todas forem vias em contramão o veículo tende a ficar estacionário na célula atual.

Fonte: Do autor.

Algumas regras foram removidas, pois não se tornaram mais necessárias devido ao código desenvolvido, onde a forma em que as verificações de células vizinhas foram construídas de forma que uma única regra atendesse a toda a demanda de sua função. As alterações e exclusões de regras podem ser visualizadas na tabela 2:

Tabela 2 – Definição das alterações e exclusões de regras do TRANSIM

Regra TRANSIM	Situação	Motivo
Alteração prévia	Alterada para Célula Ocupada	Não há necessidade de verificar se a célula foi alterada recentemente, Sendo assim, foi inserida uma célula ocupada para manter uma distância de segurança entre veículos.
Existe vizinhança	Sem alteração	A regra é padrão para verificar a vizinhança.
Direção determinada	Sem alteração	A regra é padrão para verificar se a direção não é contramão
Coluna anterior	Removida	A célula avalia a vizinhança e o estado de direção da célula vizinha, não sendo necessário avaliar se ambas estão na mesma coluna para que não avaliem a

		direção errada.
Linha anterior	Removida	A célula avalia a vizinhança e o estado de direção da célula vizinha, não sendo necessário avaliar se ambas estão na mesma linha para que não avaliem a direção errada
Direção da via	Sem alteração	A regra é padrão para verificar o estado de via da célula vizinha
Saída de rotatória	Alterada para Saída	Um veículo sai do circuito mediante o atendimento dos requisitos da regra Saída, sendo desnecessária a criação de um estado exclusivo para esta ação.
Alteração de posição na rotatória	Removida	A posição na rotatória se dá pela regra de Direção da via e é aplicada para todas as vias.
Proibido retornar ao início	Removida	O estado de Entrada é considerado como sem presença de via, automaticamente é identificado como uma célula que não pode receber o estado de veículo.
Proibido sair do circuito	Alterada para Saída	Um veículo sai do circuito mediante o atendimento dos requisitos da regra Saída, sendo desnecessária a criação de um estado exclusivo para esta ação.
Proibido passar o sinal vermelho	Sem alteração	A regra é padrão para interromper o fluxo de veículos mediante um semáforo vermelho.
Proibido atravessar a faixa de pedestres	Alterada para Redução em Faixa de pedestres	A faixa de pedestres agora é considerada como redução, parando uma iteração somente.
Redução em lombada	Sem alteração	A regra é padrão para a parada de uma iteração mediante uma lombada.

Fonte: Do autor.

Como pôde ser observado nos levantamento bibliográfico existem vários modelos de TCA, cada um com características e aplicações distintas. Dentre os modelos citados, o único utilizado neste protótipo foi o modelo *slow-to-start* que faz com que o veículo aguarde o veículo posterior para assim iniciar seu movimento. Os outros modelos de TCA trabalham somente com velocidade e aceleração, o que não está diretamente ligado com os objetivos do projeto.

Com a finalização do protótipo é possível observar que as regras não são específicas para um circuito criado, concordando então com a teoria dos AC, onde um conjunto simples de regras é capaz de gerar simulações constantes que se desenvolvem a cada iteração.

Durante a elaboração das regras de movimentação, foi constatada uma certa dificuldade na definição das regras de direção, onde inicialmente as células não apresentariam o sentido da via, esta configuração foi alterada para que cada via recebesse uma direção específica, fazendo então com que o circuito seguisse os padrões de direção do trânsito evitando que o mesmo entre na contramão.

Outra dificuldade a se levar em consideração é a implementação de um modelo de velocidade e aceleração, pelo fato de que o circuito trabalha avaliando as células vizinhas adjacentes a célula atual o que torna complexa a elaboração de regras que aplicam velocidade ou aceleração sobre os veículos, uma vez que o veículo precisa saber todo o percurso para então receber a regra de velocidade de acordo com o TCA definido. Como é o caso da regra do STCA, onde o veículo recebe a quantidade de células de distância como velocidade em uma linha reta, num circuito personalizado, é necessário que o veículo saiba o percurso anteriormente para que em situações de curvas ou retornos ele receba a distância correta entre ele e o veículo que estiver a sua frente naquele percurso.

Deve-se ressaltar também, certa dificuldade na elaboração de novos veículos, principalmente veículos multicelulares como um ônibus ou caminhão por exemplo, onde é necessária a criação de novas regras semelhantes a movimentação dos carros, porém avaliando uma quantidade maior de variações. Essas novas regras acarretariam na necessidade de utilizar a vizinhança de Moore, pois será necessário avaliar células na diagonal da célula atual.

Pelo fato do protótipo possuir situações aleatórias, vale ressaltar que em determinados momentos o comportamento do veículo pode não ser o adequado, como em casos de cruzamento onde o mesmo pode acabar se movimentando em círculos no centro do cruzamento até que o algoritmo decida uma direção diferente em uma das iterações. Esta não é uma situação onde a movimentação não é permitida, mas é incomum, pois veículos não ficam circulando em cruzamentos.

Dentre os métodos para inserir os estados em uma célula, foi cogitada a utilização de uma opção para alterar as células de forma individual, onde ao clicar na célula, o usuário tivesse a opção de determinar o estado daquela célula, porém este método se torna lento para desenhar um circuito independente do tamanho, com isso optou-se por um método de seleção de células, onde cada célula clicada fica marcada com uma cor indicando que a mesma encontra-se selecionada. Dessa forma, é possível selecionar diversas células e atribuir o valor do estado para todas as selecionadas.

Como afirmado por PIZOLLO (2015), a principal limitação dos dispositivos móveis é a tela, o que necessita de um tamanho maior para as células reduzindo o tamanho do circuito. Esta limitação foi removida na aplicação para desktop, onde com a alteração de uma simples variável, é possível determinar a quantidade desejada de células de uma grade, porém o algoritmo não permite que o número de linhas e de colunas sejam diferentes. Neste protótipo apenas foram fornecidas as opções de 25x25, 35x35 e 45x45, mas são opções passíveis de alteração.

8 CONCLUSÃO

Com base nesta pesquisa foi possível perceber a importância da utilização de ACs principalmente nas suas aplicações em áreas que trabalham com sistemas evolutivos, pois através de conjuntos de regras bem definidos os ACs são capazes de simular o comportamento da vida real.

Em sua aplicação em fluxo de tráfego, a teoria dos AC consta com diversos modelos com regras já definidas que auxiliam no desenvolvimento de simulações, mas devido a liberdade de criação de regras, sempre há a possibilidade de desenvolver novos modelos e novas regras que de certa forma podem complementar até mesmo os modelos já desenvolvidos.

Após o desenvolvimento do protótipo, foi verificado que todos os objetivos desta pesquisa foram alcançados, além do desenvolvimento de funcionalidades extras que complementam os objetivos do trabalho, como por exemplo, a premissa de salvar circuitos e carregar circuitos pré-existentes.

O protótipo pode ser utilizado por agentes de trânsito ou engenheiro de tráfego para que os mesmos possam estruturar circuitos de vias juntamente com a inserção de sinalizações para avaliar a viabilidade de tais circuitos.

Para o desenvolvimento do protótipo, foi realizado um estudo aprofundado de ACs, teorias de fluxo de tráfego, regras de trânsito e do protótipo TRANSIM. O conhecimento em ACs é necessário para o funcionamento do protótipo pois o mesmo que define as regras da simulação. O estudo sobre fluxo de tráfego e regras de trânsito é essencial para a estruturação das vias e para a elaboração das regras de movimentação dos veículos. O estudo sobre o TRANSIM possibilitou uma exemplificação das regras de movimentação, além de ser a base para o desenvolvimento deste protótipo.

Deve-se relevar a falta de aplicação dos modelos de TCA estudados, pois os mesmos abrangem um contexto de velocidade e aceleração ao contrário de um contexto ligado a movimentação do veículo em um fluxo constante. Dessa forma acredita-se que os modelos de TCA são eficazes na avaliação de fluxos em vias de direção contínua ou até mesmo no desenvolvimento de *freeways* (rodovias de alta

velocidade), pois não precisam avaliar direções aleatórias, apenas levar em consideração os veículos adjacentes.

Com a implementação de um sistema de armazenamento de estados da via, é possível concluir que com alguns ajustes de algoritmo, pode-se portar uma via desenvolvida na aplicação de desktop para um dispositivo móvel, basta que a aplicação no dispositivo móvel (como por exemplo o TRANSIM) leia os estados da mesma forma que são armazenados na aplicação de desktop.

A partir deste protótipo é possível a criação de novos estados, necessitando apenas a criação das novas regras que regem estes estados ou até mesmo a criação de novos veículos, utilizando as regras já desenvolvidas como base.

O presente trabalho deu continuidade ao TRANSIM desenvolvendo as propriedades que o autor propõe anteriormente em seu trabalho, além de adicionar novas funcionalidades e possibilidades para desenvolvimentos futuros.

Propõe-se como trabalhos futuros o desenvolvimento de um modelo de simulação que trabalhe com a velocidade dos veículos no circuito. Outra proposta seria dar continuidade neste protótipo criando regras que trabalhem com a velocidade, o que permite então fazer o uso de maior parte da bibliografia de ACs para o fluxo de tráfego.

Propõe-se também a possibilidade de portar as vias desenvolvidas para uma aplicação em dispositivos móveis que apenas interprete os estados e execute a simulação sem a necessidade de construir o circuito da mesma, permitindo que agentes de trânsito ou engenheiros de tráfego levem a simulação para qualquer lugar.

Com o desenvolvimento do presente trabalho, conclui-se que a teoria de ACs é uma forma viável no desenvolvimento de simulações de fluxo de tráfego, seu conjunto de regras e estados pode facilmente demonstrar a evolução de um sistema ao longo do tempo, alterando os estados das células a cada iteração e gerenciando seu comportamento. Em relação ao TRANSIM, apesar de ser uma aplicação limitada no quesito de personalização e interação com o usuário, apresenta um exemplo sólido do funcionamento dos ACs perante um circuito de fluxo de tráfego bem

estruturado e como pode ser observado no presente trabalho, com apenas alguns ajustes e o desenvolvimento de uma forma de estruturar o circuito de trânsito, é possível elaborar uma aplicação completa que permita ao usuário construir cada pequeno detalhe das vias e do fluxo de tráfego.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Estudo de Tráfego**. Rio de Janeiro, 2006. 384 p. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/manual_estudos_trafego.pdf>. Acesso em: 08 nov. 2016.
- DENATRAN, 2006. **CTB – Código de Trânsito Brasileiro**: instituído pela lei nº 9.503, sw 23.09.97 – Brasília.
- FERRAZ, Antonio Clóvis Pinto; TORRES, Isaac Guillermo Espinosa. **Transporte público urbano**. 2. ed. ampl. e atual. São Carlos, SP: RiMa, 2004. xviii, 410 p.
- FRANZ, Cristine Maria; SEBERINO, Jose Roberto Vieira. **A História do Trânsito e Sua Evolução**. 2012. 24 f. Monografia (Especialização) - Curso de Pós Graduação Lato Sensu, Joinville, 2012. Disponível em: <http://www.transitobr.com.br/downloads/a_historia_do_transito_e_sua_evolucao.pdf>. Acesso em: 31 out. 2016.
- GREMONINI, Lucas; VICENTINI, Eduardo. **Autômatos Celulares**: Revisão Bibliográfica e Exemplos de Implementações. UNICENTRO. 2008.
- HEBEI, Gao. **An Improved Cellular Automaton Model for Traffic Flow**. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRONIC MEASUREMENT AND INSTRUMENTS, 8., 2007, Xian. p. 700 - 703. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/4351240/>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- LIMA, Edgar Barbosa. **Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares**. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. Disponível em: <<http://www2.ic.uff.br/PosGraduacao/Dissertacoes/361.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2016.
- MAERIVOET, Sven; MOOR, Bart De. Cellular automata models of road traffic. **Physics Reports**. v. 419, n. 1, p. 1-64, nov. 2005. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/physics/0509082.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2016.
- NAGEL, Kai; SCHRECKENBERG, Michael. A cellular automaton model for freeway traffic. **Journal de Physique I**, [s.l.], v. 2, n. 12, p.2221-2229, dez. 1992. EDP Sciences. Disponível em: <http://www.pd.infn.it/~agarfa/didattica/met_comp/lab_20150108/1992_origca.pdf>. Acesso em: 26 out. 2016.

NAGEL, Kai; HERRMANN, Hans J.. Deterministic models for traffic jams. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, [s.l.], v. 199, n. 2, p.254-269, out. 1993. Elsevier BV. Disponível em: <<http://www.comphys.ethz.ch/hans/p/156.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

NAGEL, Kai. Particle hopping models and traffic flow theory. **Phys. Rev. E**. v. 53, n.5, p. 4655-4672, mai. 2008. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/cond-mat/9509075.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

NAZARETH, Veridianne Soares; SOUSA, Luiz Afonso Penha de; RIBEIRO, Paulo Cezar Martins. **Análise Comparativa Entre Simuladores De Fluxo De Tráfego**. In: XIII CONGRESSO RIO DE TRANSPORTES, 13. 2015, Rio de Janeiro. Disponível em: <<http://www.riodetransportes.org.br/wp-content/uploads/artigo18.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2016.

PIZZOLO, Filipe de Betio. **Transim: simulação de tráfego urbano para dispositivos móveis, baseado em autômatos celulares**. 2015. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

RIBEIRO, Luiz Arthur Montes. **Manual de educação para o trânsito**. 2.ed Curitiba, PR: Juruá, 1999. 304 p.

RIZZARDO, Arnaldo. **Comentários ao código de trânsito brasileiro**. 7.ed. rev., atual. e ampl. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2008. 749 p. ISBN 9788520332870 (enc.)

SANTOS, Camila Nunes dos et al. **Avaliação nas velocidades operacionais das vias urbanas**. In: CONGRESSO RIO DE TRANSPORTES, 13., 2015, Rio de Janeiro. 2015. Disponível em: <<http://www.riodetransportes.org.br/wp-content/uploads/artigo23.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2016.

SILVA, Francisco Assis da et al. **Uma Metodologia para Detectar e Reconhecer Placas de Sinalização de Trânsito**. In: WORKSHOP DE VISÃO COMPUTACIONAL, 8., 2012, Goiânia, 2012. Disponível em: <http://iris.sel.eesc.usp.br/wvc/Anais_WVC2012/pdf/97147.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2016.

SILVA, Paulo Cesar Marques da. **Teoria do Fluxo De Tráfego**. Brasília, jul. 2007. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/teoria-do-fluxo-de-trafego.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2016.

SOUSA, Sonia Alexandra F. S. **Autômatos Celulares**. 2002. 96 f. Monografia em Ciência de Computadores – Faculdade de Ciências do Porto, Porto.

TAVARES, Leonardo Daniel. **Um Simulador de Tráfego Urbano Baseado em Autômatos Celulares**. 2010. 90 f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/113M.PDF>>. Acesso em: 10 nov. 2016.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara. **Transporte urbano nos países em desenvolvimento: reflexões e proposta**. 4. ed. São Paulo: Annablume, 2000. 293 p.

VASCONCELLOS, Eduardo Alcântara. **Os Conflitos na Circulação Urbana: Uma Abordagem Política da Engenharia de Tráfego**. Companhia de Engenharia de Tráfego, São Paulo, 1982. 5 p.

XIANG, Zhengtao et al. **A Cellular Automaton Traffic Model Considering the Influence of Driving State on Randomization**. 2013 International Conference On Computational And Information Sciences, [s.l.], p.1158-1161, jun. 2013. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6643224/>>. Acesso em: 14 nov. 2016.

APÊNDICE(S)

UM NOVO CONJUNTO DE REGRAS PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO E CRIAÇÃO DE VIAS UTILIZANDO AUTÔMATOS CELULARES

Jonathan Custodio¹, Christine Vieira Scarpato

¹Ciência da Computação – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC)
Criciúma – SC – Brazil

elendril2013@gmail.com

Abstract. *Cellular Automata has been used in the most diverse means of evolutionary systems simulation especially in traffic flow control. An example of these simulations is the prototype called TRANSIM which presents certain limitations that make it a simple simulation and stuck to its own circuit. According to these limitations, this paper presents a study on traffic flow theories and cellular automata in order to overcome TRANSIM's limitations through the creation and adaptation of new cellular automata rules, as well as to provide the means to create customized routes and traffic flows*

Resumo. *Os Autômatos Celulares vem sendo utilizados nos mais diversos meios de simulação de sistemas evolutivos, principalmente em controle do fluxo de tráfego. Um exemplo destas simulações é o protótipo TRANSIM que apresenta certas limitações que o tornam uma simulação simples e presa ao seu próprio circuito. Em vista destas limitações, o presente trabalho traz um estudo sobre as teorias de fluxo de tráfego e autômatos celulares com o objetivo de suprir as limitações do TRANSIM através da criação e adaptação de novas regras de autômatos celulares, além de possibilitar um meio de criação de vias e fluxos de tráfego personalizados.*

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais recursos da vida econômica e social de um país é o meio de transporte. Estima-se que em São Paulo existam aproximadamente 8 milhões de veículos, o que demonstra a existência de um crescimento considerável da área urbana. Sendo assim, quanto maior a quantidade de veículos presentes nas ruas, maior é a ocorrência de congestionamentos, tornando-se assim um dos principais problemas da sociedade moderna (TAVARES, 2010).

De acordo com Lima (2007), o aumento contínuo do tráfego rodoviário vem se tornando um dos principais problemas da sociedade moderna, devido ao impacto gerado e a saturação das vias. A simulação computacional pode ter um papel importante, permitindo avaliar diferentes métodos de controle e gerenciamento de tráfego. Diante destes fatos, percebe-se a necessidade de pensar em uma nova forma de estruturar o trânsito.

Para tal estudo, existe um conjunto de leis da matemática, da teoria da probabilidade e da física utilizados para descrever o comportamento do tráfego rodoviário, esse conjunto é denominado fluxo de tráfego. (SILVA, 2007). Uma forma de controlar esse constante fluxo de veículos é através da utilização de simulações de

tráfego, que permitem a elaboração prévia de como um circuito vai se comportar com um determinado fluxo de veículos.

Para desenvolver simulações de trânsito, é possível utilizar-se dos conceitos de Autômatos Celulares, que de acordo com Sousa (2002) são ferramentas que podem representar quase todos os sistemas evolutivos que se pode imaginar. Os Autômatos Celulares possuem a capacidade de gerar simulações, previsões e resultados que não podem ser obtidos utilizando métodos que envolvam equações matemáticas. (GREMONINI; VICENTINI, 2008).

Os autômatos celulares são utilizados em diversos simuladores de tráfego devido a possibilidade de utilizar poucas regras tais como, aceleração, desaceleração, velocidade aleatória, entre outras. Dessa forma se tornam eficientes para simular o fluxo de tráfego em tempo real (TAVARES, 2010).

Um exemplo dessa utilização no fluxo de tráfego é o aplicativo TRANSIM, que de acordo com Pizzolo (2015), trabalha com os conceitos de autômatos celulares de modo a simular o fluxo de tráfego urbano com o intuito de auxiliar os agentes de trânsito nas possíveis simulações de alterações do fluxo do trânsito. Por se tratar apenas de um protótipo e por ser desenvolvido exclusivamente para dispositivos móveis, nota-se uma quantidade significativa de limitações existentes.

Esta pesquisa deu origem a uma simulação de fluxo de tráfego utilizando um novo conjunto de regras de autômatos celulares no sistema TRANSIM de forma a permitir a criação de vias e a adição de novas funcionalidades na simulação de tráfego.

2. JUSTIFICATIVA

Com uma grande quantidade de população e concentração de veículos é de fundamental importância a realização de estudos sobre transportes em áreas urbanas, tais como os que buscam analisar o efeito de mudanças nas regras de circulação de um trânsito urbano através de técnicas computacionais como a simulação. (TAVARES, 2010).

Como objetos de estudo para a elaboração das regras de um simulador de tráfego resolveu-se utilizar os conceitos de Autômatos Celulares (AC). De acordo com Sousa (2002), os primeiros autômatos celulares foram criados por John von Neumann e Stanislaw Ulam com o objetivo de imitar os processos naturais que nos rodeiam, como o processo de reprodução por exemplo.

Os ACs podem imitar os processos naturais através de simples regras. São capazes de simular sistemas complexos que evoluem ao longo do tempo, partindo de regras simples que descrevem os mais variados fenômenos que nos rodeiam (SOUSA, 2002).

Em relação ao aplicativo TRANSIM, o mesmo foi desenvolvido para dispositivos móveis devido a portabilidade, crescimento e capacidade de computação. Além de que o mesmo pode ser utilizado por agentes de trânsito e engenheiros de tráfego em qualquer lugar onde eles estejam (PIZZOLO, 2015).

No TRANSIM observa-se a necessidade de interação entre o usuário e a aplicação. Uma vez que o protótipo se trata de uma simulação direcionada a idealização

de circuitos e desenvolvimento de vias, é necessário interagir com a aplicação a fim de projetar fluxos personalizados.

Outros fatores a serem implementados são a criação de novos estados realizada pelo próprio usuário, o TRANSIM trabalha com alguns recursos como semáforos e faixas de pedestres, mas não apresenta alguns pontos importantes a serem levados em consideração, como paradas de ônibus, trilhos de trem e cruzamentos. A criação de novos veículos e a permissão para que o usuário informe a quantidade de veículos presentes na simulação também são pontos relevantes que não estão presentes no aplicativo e são de grande importância para o fluxo de tráfego.

A aplicação foi desenvolvida para permitir ao usuário a montagem de circuitos de trânsito personalizados juntamente com a possibilidade de inserção de sinalizações como faixas de pedestre, lombadas, semáforos e trilhos de trem. Além da montagem do circuito, a aplicação busca simular o comportamento de uma quantidade de veículos determinadas pelo usuário dentro do circuito montado.

3. DESENVOLVIMENTO

O protótipo foi desenvolvido utilizando como ambiente o *Java JDK 8 update 131*, com a IDE *NetBeans 8.2*. A máquina onde foi desenvolvido o protótipo possui *8Gb RAM, 500Gb HD, processador Intel Core i5-6600K 3.5GHz* com sistema operacional *Windows 7 Ultimate 64 Bits*.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo elaborar um simulador de tráfego baseado em ACs para desktop, criando um modelo de simulação que permita que toda a estrutura tanto das vias como das sinalizações sejam alteradas.

Para a criação do modelo de simulação de fluxo de tráfego baseado em AC, foram seguidos os seguintes padrões de simulação de veículos com base nas teorias de AC e fluxo de tráfego:

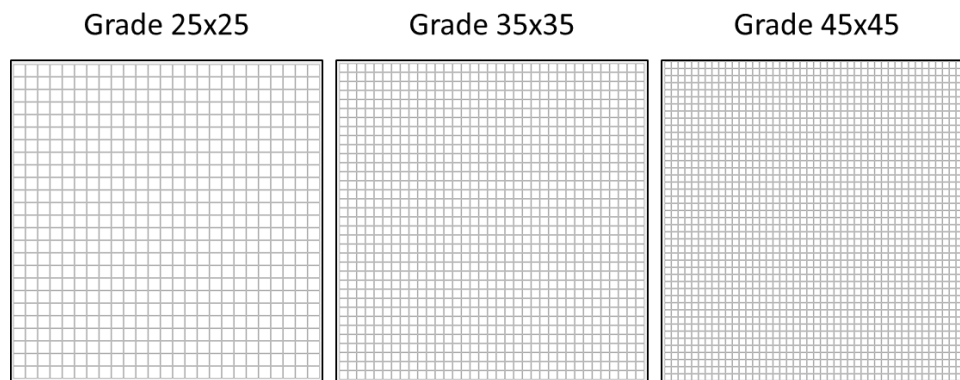
- a) **macroscópica**: será avaliado o fluxo de tráfego como um todo;
- b) **estocástica**: em determinadas ocasiões, há a necessidade de regras randômicas;
- c) **dinâmica**: trata-se de um sistema ao longo do tempo;
- d) **discreta**: a evolução do autômato é feita pela avaliação dos estados caracterizados como veículos, dessa forma a evolução ocorre por etapas;
- e) **células simples**: cada veículo é representado por uma única célula na grade;

Sobre os ACs, o protótipo baseou-se nas seguintes características:

- a) **forma geométrica da célula**: quadrangular;
- b) **dimensão do AC**: bidimensional;
- c) **vizinhança**: Von Neumann;
- d) **tamanho da vizinhança**: raio igual a 1 (células adjacentes a célula central);

e) **transição de estado**: depende do estado da célula atual e das células vizinhas;

A simulação trabalha inicialmente com uma grade padrão cujo tamanho é de 25 colunas, por 25 linhas, sendo permitidas ao usuário outras duas opções de tamanho variando entre 35 colunas e 35 linhas ou até mesmo 45 colunas e 45 linhas, o que fornece uma grade maior para circuitos mais extensos ou complexos. O circuito de vias pode ser montado pelo usuário dentro deste conjunto de células. A figura 1 representa os três modelos de grade disponíveis, demonstrando a quantidade de células e a sua disposição na grade. A grade localiza-se dentro de um frame, desta forma ela é redimensionada de acordo com a resolução da tela onde é executada, evitando que a grade fique fora de posição.



2 Figura 1. Variações do tamanho da grade disponíveis na aplicação

Para construção do circuito é necessária uma interface que permita que o usuário determine os estados presentes em cada célula. Desta forma, foi construída uma interface interativa utilizando três resoluções de grade, um tamanho pequeno com 625 células, um tamanho médio com 1225 células e um tamanho grande com 2025 células, estas resoluções podem ser alteradas durante a aplicação. Além da grade, a aplicação contém um menu lateral com as funções de definir estado, limpar célula, limpar grade, editar, concluir edição, informar o número de carros, inserir entradas, iniciar e parar a aplicação, além de uma área que exibe as informações da célula selecionada. Além do menu lateral, há uma barra de menu com algumas funcionalidades que podem ser vistas na figura 2.

The image shows a screenshot of a software application interface. At the top, there is a dropdown menu labeled 'Via' with a small upward-pointing arrow. Below this are five blue buttons with white text: 'Definir', 'Limpar Célula', 'Limpar Grade', 'Editar', and 'Concluir Edição'. Below these buttons is a large grey rectangular area labeled 'Propriedade'. Inside this area, there are labels for 'Atributo:' and 'Direção:'. Below the 'Propriedade' area is a text input field labeled 'Quantidade de Carros:' with the number '0' entered. Below the input field are three more buttons: 'Inserir Entrada', 'Iniciar', and 'Parar'.

3 Figura 2. Funcionalidades presentes na aplicação.

Após o desenvolvimento da interface, foram criados os estados que serão futuramente aplicados nas células pelo usuário ou no decorrer da simulação. Os estados presentes são: entrada, vias, lombada, faixa de pedestre, semáforo vermelho, semáforo verde, trilho de trem, carro e os estados de vazio, sem atributo e célula ocupada.

Com a criação dos estados, deve-se determinar os estados que estarão presentes na simulação, foram definidas as regras de ACs que devem controlar a simulação e foram desenvolvidos os códigos que ligam as regras com os estados criados, tratando as devidas exceções para manter um fluxo constante na simulação.

Com o fim da elaboração dos estados e das regras, tem-se o início da simulação, onde são inseridos os veículos dentro do circuito de acordo com as entradas e a quantidade de veículos informados. Durante a simulação, ocorrem iterações a cada um segundo, atualizando todos os estados da grade, alterando os estados para veículo de acordo com as regras definidas. A simulação ocorre em tempo real e pode ser parada para que sejam feitas alterações no circuito.

4. RESULTADOS

Após o desenvolvimento deste protótipo verificou-se que a simulação de fluxo de tráfego utilizando AC é um método viável e eficaz. Através de um conjunto bem estruturado de regras, é possível exemplificar o tráfego de veículos de forma similar à realidade.

Em relação ao protótipo TRANSIM, a aplicação desenvolvida neste trabalho apresenta um número considerável de vantagens que complementam tal protótipo, sendo elas:

- a) **construção do circuito:** ao contrário do TRANSIM, esta aplicação permite que o usuário construa o circuito da forma que desejar, inserindo os estados onde lhe for conveniente ou houver necessidade, enquanto o TRANSIM trabalha com um circuito pré-montado que não permite ser alterado;
- b) **incremento e alteração de regras:** muitas das regras do TRANSIM foram utilizadas nesta aplicação, enquanto outras foram adaptadas ou até mesmo removidas. As regras que se diferenciam do TRANSIM são:
- **célula ocupada:** ao invés de armazenar a informação de que uma célula foi alterada recentemente como no TRANSIM, esta regra gera uma distância segura entre os veículos, evitando que os mesmos entrem em colisão durante o circuito;
 - **entrada:** juntamente com o fato de que as entradas são definidas pelo usuário, esta regra se difere do TRANSIM por distribuir a quantidade de carros de forma aleatória nas vias adjacentes à célula de entrada e não de apenas inserir a quantidade especificada de veículos, dando a opção ao usuário de manter um fluxo constante ou apenas uma simulação rápida;
 - **saída:** remove-se a necessidade de utilizar estados de saída criando a regra onde os veículos saem do circuito de forma espontânea ao chegarem em uma via sem saída.
- Outras regras se tornam mais complexas em relação ao TRANSIM como a de direção, pelo fato de avaliar a direção de todas as células vizinhas ao invés de apenas determinar se a direção é oposta ou não;
- c) **quantidade de células/tamanho da grade:** a quantidade de células disponível é muito maior em comparação ao TRANSIM, permitindo a elaboração de circuitos mais extensos e complexos;
- d) **edição:** a possibilidade de editar o circuito célula por célula, podendo inserir novas vias e sinalizações logo após executar uma simulação;
- e) **distribuição de veículos:** a quantidade de entradas e onde se localizam as entradas ficam a critério do usuário, além de que a entrada seleciona de forma aleatória a direção (dentre as disponíveis) que o veículo deve seguir, diversificando as simulações;
- f) **visualização:** os estados são representados graficamente no circuito, assim como o estado veículo que se adapta a direção da via em que se localiza, melhorando visualmente a simulação;
- g) **armazenar e abrir circuitos:** a permissão de salvar um circuito montado e abrir futuramente para novas simulações ou alterações sobre um circuito já existente;
- h) **interface desktop:** se tornaria complicado para um engenheiro de trânsito que todas estas propriedades fossem realizadas em uma aplicação de dispositivos móveis, devido a necessidade de uma grande área de visualização e edição (uma vez que dispositivos móveis possuem tela

pequena) o que acarretaria em dificuldade na elaboração dos circuitos, enquanto no desktop, se torna mais ágil a seleção das células além da visualização durante a construção e execução da simulação.

Utilizando como base o modelo de regras do TRANSIM, foram então elaboradas novas regras enquanto outras foram alteradas no quesito de algoritmo de execução. As novas regras desenvolvidas podem ser visualizadas na tabela 1:

4 . Tabela 1. Novas regras desenvolvidas.

Regra	Descrição
Célula ocupada	Toda célula que apresenta um estado veículo deverá mudar seu estado para célula ocupada na próxima iteração. Este estado representa uma distância segura entre dois veículos que busca evitar colisões,
Entrada	Esta regra gerencia a entrada de veículos no circuito, distribuindo-os de forma equivalente entre todas os estados de entrada no circuito, além de selecionar de forma aleatória a via que receberá o veículo (considerando se há mais de um estado de via vizinho ao estado de entrada).
Saída	A regra consiste de que todo estado veículo que alcançar o final de um circuito (não possuir nenhum estado de via disponível para se mover) deverá automaticamente sair do circuito (o estado veículo é eliminado), sendo necessário que ao menos uma célula adjacente possua o estado vazio, caso contrario, se todas forem vias em contramão o veículo tende a ficar estacionário na célula atual.

Algumas regras foram removidas, pois não se tornaram mais necessárias devido ao código desenvolvido, onde a forma em que as verificações de células vizinhas foram construídas de forma que uma única regra atendesse a toda a demanda de sua função. As alterações e exclusões de regras podem ser visualizadas na tabela 2:

5 Tabela 2. Definição das alterações e exclusões das regras do TRANSIM.

Regra TRANSIM	Situação	Motivo
Alteração prévia	Alterada para Célula Ocupada	Não há necessidade de verificar se a célula foi alterada recentemente, Sendo assim, foi inserida uma célula ocupada para manter uma distância de segurança entre veículos.
Existe vizinhança	Sem alteração	A regra é padrão para verificar a vizinhança.
Direção	Sem alteração	A regra é padrão para verificar se a

determinada		direção não é contramão
Coluna anterior	Removida	A célula avalia a vizinhança e o estado de direção da célula vizinha, não sendo necessário avaliar se ambas estão na mesma coluna para que não avaliem a direção errada.
Linha anterior	Removida	A célula avalia a vizinhança e o estado de direção da célula vizinha, não sendo necessário avaliar se ambas estão na mesma linha para que não avaliem a direção errada
Direção da via	Sem alteração	A regra é padrão para verificar o estado de via da célula vizinha
Saída de rotatória	Alterada para Saída	Um veículo sai do circuito mediante o atendimento dos requisitos da regra Saída, sendo desnecessária a criação de um estado exclusivo para esta ação.
Alteração de posição na rotatória	Removida	A posição na rotatória se dá pela regra de Direção da via e é aplicada para todas as vias.
Proibido retornar ao início	Removida	O estado de Entrada é considerado como sem presença de via, automaticamente é identificado como uma célula que não pode receber o estado de veículo.
Proibido sair do circuito	Alterada para Saída	Um veículo sai do circuito mediante o atendimento dos requisitos da regra Saída, sendo desnecessária a criação de um estado exclusivo para esta ação.
Proibido passar o sinal vermelho	Sem alteração	A regra é padrão para interromper o fluxo de veículos mediante um semáforo vermelho.
Proibido atravessar a faixa de pedestres	Alterada para Redução em Faixa de pedestres	A faixa de pedestres agora é considerada como redução, parando uma iteração somente.
Redução em lombada	Sem alteração	A regra é padrão para a parada de uma iteração mediante uma lombada.

Como pôde ser observado nos levantamento bibliográfico existem vários modelos de TCA, cada um com características e aplicações distintas. Dentre os modelos citados, o único utilizado neste protótipo foi o modelo slow-to-start que faz com que o

veículo aguarde o veículo posterior para assim iniciar seu movimento. Os outros modelos de TCA trabalham somente com velocidade e aceleração, o que não está diretamente ligado com os objetivos do projeto.

Com a finalização do protótipo é possível observar que as regras não são específicas para um circuito criado, concordando então com a teoria dos AC, onde um conjunto simples de regras é capaz de gerar simulações constantes que se desenvolvem a cada iteração.

Pelo fato do protótipo possuir situações aleatórias, vale ressaltar que em determinados momentos o comportamento do veículo pode não ser o adequado, como em casos de cruzamento onde o mesmo pode acabar se movimentando em círculos no centro do cruzamento até que o algoritmo decida uma direção diferente em uma das iterações. Esta não é uma situação onde a movimentação não é permitida, mas é incomum, pois veículos não ficam circulando em cruzamentos.

Dentre os métodos para inserir os estados em uma célula, foi cogitada a utilização de uma opção para alterar as células de forma individual, onde ao clicar na célula, o usuário tivesse a opção de determinar o estado daquela célula, porém este método se torna lento para desenhar um circuito independente do tamanho, com isso optou-se por um método de seleção de células, onde cada célula clicada fica marcada com uma cor indicando que a mesma encontra-se selecionada. Dessa forma, é possível selecionar diversas células e atribuir o valor do estado para todas as selecionadas.

Como afirmado por PIZOLLO (2015), a principal limitação dos dispositivos móveis é a tela, o que necessita de um tamanho maior para as células reduzindo o tamanho do circuito. Esta limitação foi removida na aplicação para desktop, onde com a alteração de uma simples variável, é possível determinar a quantidade desejada de células de uma grade, porém o algoritmo não permite que o número de linhas e de colunas sejam diferentes. Neste protótipo apenas foram fornecidas as opções de 25x25, 35x35 e 45x45, mas são opções passíveis de alteração.

5. CONCLUSÃO

Em sua aplicação em fluxo de tráfego, a teoria dos AC consta com diversos modelos com regras já definidas que auxiliam no desenvolvimento de simulações, mas devido a liberdade de criação de regras, sempre há a possibilidade de desenvolver novos modelos e novas regras que de certa forma podem complementar até mesmo os modelos já desenvolvidos.

Para o desenvolvimento do protótipo, foi realizado um estudo aprofundado de ACs, teorias de fluxo de tráfego, regras de trânsito e do protótipo TRANSIM. O conhecimento em ACs é necessário para o funcionamento do protótipo pois o mesmo que define as regras da simulação. O estudo sobre fluxo de tráfego e regras de trânsito é essencial para a estruturação das vias e para a elaboração das regras de movimentação dos veículos. O estudo sobre o TRANSIM possibilitou uma exemplificação das regras de movimentação, além de ser a base para o desenvolvimento deste protótipo.

O protótipo pode ser utilizado por agentes de trânsito ou engenheiro de tráfego para que os mesmos possam estruturar circuitos de vias juntamente com a inserção de sinalizações para avaliar a viabilidade de tais circuitos.

Deve-se relevar a falta de aplicação dos modelos de TCA estudados, pois os mesmos abrangem um contexto de velocidade e aceleração ao contrário de um contexto ligado a movimentação do veículo em um fluxo constante. Dessa forma acredita-se que os modelos de TCA são eficazes na avaliação de fluxos em vias de direção contínua ou até mesmo no desenvolvimento de freeways (rodovias de alta velocidade), pois não precisam avaliar direções aleatórias, apenas levar em consideração os veículos adjacentes.

Com a implementação de um sistema de armazenamento de estados da via, é possível concluir que com alguns ajustes de algoritmo, pode-se portar uma via desenvolvida na aplicação de desktop para um dispositivo móvel, basta que a aplicação no dispositivo móvel (como por exemplo o TRANSIM) leia os estados da mesma forma que são armazenados na aplicação de desktop.

A partir deste protótipo é possível a criação de novos estados, necessitando apenas a criação das novas regras que regem estes estados ou até mesmo a criação de novos veículos, utilizando as regras já desenvolvidas como base.

Com o desenvolvimento do presente trabalho, conclui-se que a teoria de ACs é uma forma viável no desenvolvimento de simulações de fluxo de tráfego, seu conjunto de regras e estados pode facilmente demonstrar a evolução de um sistema ao longo do tempo, alterando os estados das células a cada iteração e gerenciando seu comportamento. Em relação ao TRANSIM, apesar de ser uma aplicação limitada no quesito de personalização e interação com o usuário, apresenta um exemplo sólido do funcionamento dos ACs perante um circuito de fluxo de tráfego bem estruturado e como pode ser observado no presente trabalho, com apenas alguns ajustes e o desenvolvimento de uma forma de estruturar o circuito de trânsito, é possível elaborar uma aplicação completa que permita ao usuário construir cada pequeno detalhe das vias e do fluxo de tráfego.

7. REFERÊNCIAS

- GREMONINI, Lucas; VICENTINI, Eduardo. Autômatos Celulares: Revisão Bibliográfica e Exemplos de Implementações. UNICENTRO. 2008.
- LIMA, Edgar Barbosa. Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares. 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói. Disponível em: <<http://www2.ic.uff.br/PosGraduacao/Dissertacoes/361.pdf>>. Acesso em: 14 nov. 2016.
- PIZZOLO, Filipe de Betio. Transim: simulação de tráfego urbano para dispositivos móveis, baseado em autômatos celulares. 2015. 101 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciência da Computação, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2015.

- SILVA, Paulo Cesar Marques da. Teoria do Fluxo De Tráfego. Brasília, jul. 2007. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br/artigos/teoria-do-fluxo-de-trafego.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2016.
- SOUSA, Sonia Alexandra F. S. **Autômatos Celulares**. 2002. 96 f. Monografia em Ciência de Computadores – Faculdade de Ciências do Porto, Porto.
- TAVARES, Leonardo Daniel. Um Simulador de Tráfego Urbano Baseado em Autômatos Celulares. 2010. 90 f. Dissertação (Pós graduação em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <<http://www.ppgee.ufmg.br/defesas/113M.PDF>>. Acesso em: 10 nov. 2016.