

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

**FILIFE DE BETIO PIZZOLO**

**TRANSIM: SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS,  
BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES**

**CRICIÚMA  
2015**

**FILIFE DE BETIO PIZZOLO**

**TRANSIM: SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS,  
BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado para a obtenção do grau de Bacharel no curso de Ciência da Computação da Universidade do Extremo Sul Catarinense, UNESC.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. MSc. Christine Vieira

**CRICIÚMA**

**2015**



**FILIPPE DE BETIO PIZZOLO**

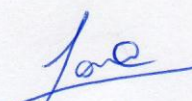
**TRANSIM: SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO PARA DISPOSITIVOS  
MÓVEIS, BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES**

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, 23 de junho de 2015.

**BANCA EXAMINADORA**

  
Prof<sup>a</sup> Christine Vieira - Msc. - (UNESC) - Orientador

  
Prof Luciano Antunes - Msc. - (UNESC)

  
Prof. Sergio Coral - Msc. - (UNESC)

**Dedico esse trabalho a minha família,  
especialmente para a minha mãe Terezinha  
e meu pai Waldir, além de todos os meus  
amigos.**

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe Terezinha da Graças da Silva e meu pai Waldir Pizzolo, pelo carinho, paciência, força de vontade para que eu pudesse ter uma boa formação educacional, pessoal e profissional.

Aos meus irmãos e familiares que me apoiaram neste desafio e sempre me ajudaram nos momentos de necessidade.

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

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



**“A imaginação é mais importante que o conhecimento.”**

**Albert Einstein**

## RESUMO

Autômatos celulares vêm sendo usado para a simulação de diversos problemas existentes, tais como comportamentos físicos, biológicos, químicos, ou de qualquer natureza como, por exemplo, criptografia de dados e imagens, alastramento de incêndio e padrões de crimes. Um destes campos, onde pode ser utilizado o conceito de autômatos celulares, é a área da teoria do fluxo de tráfego, permitindo que seja realizada a simulação do tráfego em um circuito fechado. Hoje em dia, com o trânsito caótico e a alta densidade de veículos existentes circulando no trânsito em horários de picos, principalmente em grandes cidades, o trânsito estagna e isso dificulta a locomoção das pessoas. Um dos pontos onde isso pode ser visualizado, são as imediações próximas à Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), em Criciúma - Santa Catarina. O presente trabalho traz um estudo sobre as teorias de fluxo de tráfego e autômatos celulares, e mostra um protótipo desenvolvido para dispositivos móveis, que simula o fluxo de tráfego nesta região. A ideia é que este protótipo de aplicativo possa ser utilizado por profissionais como os agentes de trânsito e os engenheiros de trânsito, como uma ferramenta que permita aos mesmos visualizarem e alterarem características dentro do mapa levantado antes de aplicarem estas alterações efetivamente.

**Palavras-chave:** Autômatos celulares. Dispositivos móveis. Fluxo de tráfego. Simulação.

## ABSTRACT

Cellular automata have been used for the simulation of various problems, such as physical behaviors, biological, chemical, or any existing nature, like for example data and image encryption, spread of fires and crime patterns. One of this fields where the cellular automata concept can be used is the area of traffic flow theory which allows the traffic simulation in a closed circuit. Nowadays, with chaotic traffic and high density of existing vehicles circulating at peak hours, especially in large cities, the traffic stagnates and this obstructs the mobility of people. One of the places where this situation can be observed are the vicinities of Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC), in Criciúma - Santa Catarina. This paper presents a study on the traffic flow theories and cellular automata, showing a prototype developed for mobile devices which simulates the traffic flow in the area. The idea is that this application prototype may be used by professionals like traffic police and traffic engineers as tool that allows them to view and modify characteristics within the featured map before applying these changes effectively.

**Key words:** Cellular automata. Mobile devices. Traffic flow. Simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama fundamental $f \times d$ .....	19
Figura 2 - Diagrama fundamental $v \times d$ .....	19
Figura 3 - Diagrama fundamenta $v \times f$ .....	20
Figura 4 - Desenho tradicional do modelo car following .....	21
Figura 5 - Dimensões de um autômato celular .....	24
Figura 6 - Estruturas de vizinhança de Von Neuman e Moore .....	26
Figura 7 - Evolução do modelo CA-184 .....	29
Figura 8 - Exemplo do diagrama com $v_{max} = 5$ .....	32
Figura 9 - Evolução da computação em eras .....	41
Figura 10 - Camadas do Sistema Operacional Android .....	45
Figura 11 - Grade ao iniciar simulação .....	52
Figura 12 - Grade contendo células com todos os estados .....	56
Figura 13 - Estrutura de repetição indicando as células que serão avaliadas pelas regras de transição .....	57
Figura 14 - Trecho onde poderia ocorrer uma colisão entre veículos .....	61
Figura 15 - Transição de estados .....	62
Figura 16 - Inserção de novos veículos .....	64
Figura 17 - Menu com simulação executando .....	65
Figura 18 – Menu com simulação interrompida .....	66
Figura 19 - Alteração de densidade de veículos .....	68
Figura 20 - Engarrafamento iniciado nas vias mais à direita .....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos de TCA abordados para célula simples .....	28
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTC	Autarquia de Segurança, Trânsito e Transportes de Criciúma.
BJH-TCA	O modelo TCA de Benjamin, Johnson, e Hui
BL-TCA	Brake-light TCA
CA	Autômato celular
CA-184	Wolfram's rule 184
CAUTS	Automata for Urban Traffic Simulation
CEDUP	Centro de Educação Profissional
CTB	Código de Trânsito Brasileiro
DFI-TCA	Modelo determinístico de Fukui–Ishibashi
HS-TCA	Helbing–Schreckenberg TCA
KKW-TCA	O modelo de Kerner, Klenov, e Wolf
OHA	Open Handset Alliance
PC	Computador pessoal
SATC	Associação Benficiente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina
SO	Sistema operacional
STCA	Nagel–Schreckenberg TCA
STCA-CC	STCA com controle de cruzamento
SFI-TCA	Modelo estocástico de Fukui–Ishibashi TCA
T <sup>2</sup> -TCA	Takayasu–Takayasu TCA
TCA	Automato celular de tráfego
UNESC	Universidade do extremo sul catarinense
VDR-TCA	Velocity dependency randomization

## LISTA DE SÍMBOLOS

$v$	Velocidade
$L\ell$	Número de vias em uma grade de um TCA
$g_s$	Intervalo médio entre os veículos
$v_{max}$	Velocidade máxima
$t$	Tempo
$\Delta_{acc_i}$	A aceleração determinística de um veículo $i$
$D_0$	Um parâmetro a distância de sincronização
$D_1$	Um parâmetro a distância de sincronização
$D_i$	A distância de sincronização do veículo $i$
$a$	A capacidade de aceleração de um veículo
$b$	A capacidade de desaceleração de um veículo
$g_{s_i}^*$	O intervalo do veículo $i$ no tempo $t$
$k$	Densidade de um TCA
$q$	O fluxo da grade de um TCA
$g_{s_{security}}$	Uma constante de segurança para o intervalo
$h$	O limite superior para o horizonte de interação
$\varepsilon(t)$	Um número randômico entre [0,1]
$p$	A probabilidade de desaceleração
$p_0$	A probabilidade <i>slow-to-start</i> entre [0,1]
$p_a$	A probabilidade de aceleração entre [0,1]
$p_{a1}$	Um parâmetro para probabilidade de aceleração
$p_{a2}$	Um parâmetro para probabilidade de aceleração
$p_b$	A probabilidade de frenagem entre [0,1]
$p_d$	A probabilidade de desaceleração no modelo BL-TCA entre [0,1]
$p_s$	A probabilidade <i>slow-to-start</i> no modelo BJH-TCA entre [0,1]
$p_t$	A probabilidade <i>slow-to-start</i> entre no modelo T <sup>2</sup> -TCA [0,1]
$t_{s_i}$	O horizonte de interação
$v_{des_i}$	A velocidade desejada de um veículo $i$

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	12
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	12
1.3 JUSTIFICATIVA .....	12
1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	15
<b>2 ENGENHARIA DE TRÁFEGO E TEORIA DE FLUXO DE TRÁFEGO</b> .....	<b>17</b>
2.1 ABORDAGENS DE SIMULAÇÕES DE TRÁFEGO .....	17
<b>2.1.1 Análise da Abordagem Macroscópica</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1.3 Análise da Abordagem Mesoscópico</b> .....	<b>21</b>
2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS SIMULAÇÃO .....	21
2.3 COMPONENTES DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS .....	22
<b>3 AUTÔMATOS CELULARES</b> .....	<b>23</b>
3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE UM autômato celular .....	23
<b>3.1.1 Grade ou Rede</b> .....	<b>23</b>
<b>3.1.2 Dimensão de um autômato celular</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1.3 Células de um autômato celular</b> .....	<b>24</b>
<b>3.1.4 Estados</b> .....	<b>25</b>
<b>3.1.5 Regras</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1.6 Vizinhança</b> .....	<b>26</b>
<b>4 MODELO DE AUTÔMATOS CELULARES PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO</b> .....	<b>27</b>
4.1 MODELOS DE CÉLULA SIMPLES .....	27
<b>4.1.1 Modelos Determinísticos</b> .....	<b>28</b>
4.1.1.1 Wolfram's rule 184 .....	28
4.1.1.2 Fukui–Ishibashi TCA .....	29
<b>4.1.2 Modelos Estocásticos</b> .....	<b>30</b>
4.1.2.2 STCA com controle de cruzamento .....	31
4.1.2.3 Modelo estocástico de Fukui–Ishibashi .....	32
<b>4.1.3 Modelos Slow-to-start</b> .....	<b>33</b>
4.1.3.1 Autômato Celular de Tráfego Takayasu–Takayasu .....	33
4.1.3.2 O Modelo de Benjamin, Johnson, e Hui .....	34
4.1.3.3 Modelo Velocity Dependency Randomization .....	35
4.2 modelos de células múltiplas .....	36

<b>4.2.1 Helbing–Schreckenberg TCA (HS-TCA)</b> .....	<b>36</b>
<b>4.2.2 Brake Light TCA (BL-TCA)</b> .....	<b>37</b>
<b>4.2.3 O Modelo de Kerner, Klenov e Wolf</b> .....	<b>38</b>
<b>5 DISPOSITIVOS MÓVEIS</b> .....	<b>40</b>
5.1 ANDROID.....	41
<b>5.1.1 Arquitetura</b> .....	<b>42</b>
<b>6 TRABALHOS CORRELATOS</b> .....	<b>46</b>
<b>7 Implementação do protótipo TRANSIM</b> .....	<b>48</b>
7.1 METODOLOGIA.....	50
<b>7.1.1 Desenvolvimento</b> .....	<b>50</b>
7.2 RESULTADOS OBTIDOS .....	68
<b>8 CONCLUSÃO</b> .....	<b>74</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>77</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em 2010 o Brasil registrou, segundo o Ministério da Justiça, 42.844 mortes no trânsito para uma frota de 64.817.974 veículos, perfazendo um total de 661 mortes para cada 1 milhão de veículos. Ficando, assim, atrás dos EUA com 134,2 mortes por milhão de veículo, da Europa com 113,7 mortes por milhão de veículos e do Japão com 64,5 mortes por milhão de veículos (SCARPATO et al, 2013).

À medida que ocorre o aumento do número de veículos em circulação, tende a agravar as condições de trânsito nas cidades. Dados divulgados pelo DENATRAN em 2013 dão conta de um aumento de 160% na frota de veículos em um período de treze anos (de janeiro 2000 até janeiro de 2013). Esta majoração no tamanho da frota não foi acompanhada pelo necessário e correspondente investimento em infraestrutura viária, mesmo tendo uma das malhas rodoviárias mais extensas do mundo, o Brasil ainda está muito aquém das principais economias do globo, com apenas 13% das rodovias pavimentadas (SCARPATO et al, 2013).

Na cidade de Criciúma os problemas de trânsito não são diferentes da realidade brasileira. A cidade tem um órgão, criado e gerenciado pela prefeitura denominado de Autarquia de Segurança, Trânsito e Transportes de Criciúma – (ASTC). Este órgão conta com os agentes de trânsito, estes fiscalizam, orientam e monitoram o trânsito. Compete a eles seguir as normas de acordo com o Código de Trânsito Brasileiro (CTB), efetuar policiamento ostensivo do trânsito urbano, aplicar penalidades e medidas administrativas conforme o CTB tais como: retenção e remoção do veículo, apreensão da carteira de habilitação, certificado do registro do veículo, entre outras. O agente trabalha em função da população e busca trazer segurança, ordem, disciplina respeitando a propriedade, direitos individuais e coletivos. Cabe a ele orientar e fiscalizar quanto às paradas, estacionamentos e determinadas infrações como falar ao celular, falta de uso do cinto de segurança, entre outras. O agente colabora na redução de acidentes, melhora na fluidez do tráfego de veículos da cidade, efetua ações educativas, atua nas travessias

escolares, intervenções semaforicas, auxilia nas obras e outros eventos.

De acordo com Cardoso et al (2012) a cidade de Criciúma é cortada de um extremo a outro por uma longa avenida denominada Avenida Centenário. Esta tem sido palco de inúmeros acidentes de trânsito, atropelamentos, entre outros. Os locais com maior concentração de pessoas e de veículos automotivos são propensos a ter um maior risco de acidentes, como as vias próximas a escolas e universidades. Diante destes fatos, percebe-se a necessidade de pensar uma nova forma de estruturar o trânsito nestas regiões.

Existe uma base de estudos chamada teoria do fluxo de tráfego que de acordo com Silva (2007), consiste da aplicação de leis da matemática, da teoria da probabilidade e da física à descrição do comportamento do tráfego veicular rodoviário.

Autômatos Celulares de acordo com Gremonini e Vicentini (2008) são modelos matemáticos propostos inicialmente para simular a evolução da vida (*Game of life*). Por expressar, em sua evolução, comportamentos característicos dos sistemas naturais, os Autômatos Celulares difundiram-se e sua formalização e implementação computacional. Vários sistemas biológicos, físicos e sociais servem de estímulo para as simulações, utilizando as técnicas dos Autômatos Celulares. A evolução de um Autômato Celular mostra semelhança com padrões encontrados na natureza. Os modelos implementados são delimitados por uma malha contendo células de mesmo tamanho e forma e que são identificadas por estados. Os estados evoluem através de regras de interação locais e com evolução temporal discreta.

Esta pesquisa deu origem a um aplicativo capaz de simular o fluxo de tráfego urbano podendo ser utilizado em dispositivos móveis. Este aplicativo utiliza como base autômato celular, pois, de acordo com as características citadas no parágrafo anterior, o uso de autômatos celulares se tornou uma solução plausível para a simulação de comportamentos característicos dos sistemas naturais. A ideia da implementação para dispositivos móveis, tem como objetivo auxiliar os agentes de trânsito nas possíveis simulações de alterações no fluxo do trânsito com o dinamismo proporcionado por esta tecnologia, antes de fazerem as modificações

reais. Além auxiliar os engenheiros de trânsito na simulação de alterações do estado das vias de trânsito, como inserção de sinalização, lombadas eletrônicas, mudança de sentido das ruas e inserção de rotas.

### 1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver um simulador de tráfego urbano baseado em autômatos celulares para dispositivos móveis.

### 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O presente trabalho aborda temas referentes aos seguintes objetivos específicos:

- a) compreender o conceito de autômatos celulares, e sua aplicação em simulação de tráfego;
- b) compreender sistemas de transportes e o fluxo veículos urbanos;
- c) compreender a Teoria de fluxo de tráfego;
- d) definir o modelo de autômatos celulares para aplicação de um simulador de tráfego urbano;
- e) entender a importância de sistemas móveis na atualidade;
- f) montar um simulador de fluxo de tráfego.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Assim como visto por Tavares (2010), entre os recursos importantes para a vida econômica e social de um país, o Sistema de Transporte possui grande destaque. Este, por sua vez, vem sofrendo grande impacto, haja vista o efeito da urbanização e o crescente volume no número de veículos. Diante destes fatos, pesquisas devem ser realizadas a fim de minimizar os efeitos dos

congestionamentos, entre eles o desenho das vias, número de veículos maior do que a capacidade suportada, reparos e acidentes.

Como objeto de estudo para a elaboração de um simulador de tráfego urbano, resolveu-se utilizar o conceito de autômatos celulares. Autômatos celulares foram originalmente introduzidos por John von Neumann e Stan Ulam como uma possível idealização de sistemas biológicos com um propósito específico de modelagem biológica, auto reprodução conforme define Nunes (2009) apud Wolfram (1994). Esta abordagem tem sido usada desde então para estudar uma grande variedade de outros sistemas naturais complexos, físicos, químicos e biológicos conforme identifica Nunes (2009, tradução nossa).

De acordo com Nunes (2009, tradução nossa), o uso de autômatos celulares em modelagem de vários sistemas, incluindo os biológicos tem vantagens significativas.

Segundo Nunes (2009, tradução nossa), podem-se listar algumas delas:

- a) autômatos celulares são suficientemente simples para permitir a análise matemática detalhada, mas complexos o suficiente para expor uma grande variedade de fenômenos complexos;
- b) autômatos celulares fornecem uma técnica computacionalmente eficiente para analisar as propriedades coletivas de uma rede de células interligadas;
- c) os modelos baseados em autômatos celulares fornecem uma abordagem alternativa envolvendo coordenadas discretas e variáveis para representar o sistema dinâmico complexo;
- d) o modelo de comportamento está completamente especificado por um mecanismo de funcionamento simples em termos de relações locais, que podem ser suficientes para sustentar toda uma hierarquia de estruturas e fenômenos.

Outra importante decisão foi definir para qual plataforma será desenvolvido o aplicativo. A escolha da plataforma Android se deu ao fato de sua portabilidade, seu crescimento e capacidade de computação, como exemplificado

conforme Hashimi e Komatineni (2009, tradução nossa). A computação pessoal continua a se tornar mais "pessoal", em que os computadores estão se tornando cada vez mais acessíveis a qualquer hora, em qualquer lugar. Na base deste avanço estão os dispositivos portáteis que vem se transformando em plataformas de computação. Os telefones celulares já não são apenas para conversar, eles têm sido capazes de transportar dados e vídeo. Os dispositivos móveis estão se tornando tão capazes de cálculos e processamentos que podem se tornar o novo computador pessoal. Prevê-se também que um número de fabricantes como ASUS, HP, Dell e estará produzindo netbooks baseados no sistema operacional Android.

Com o desenvolvimento deste protótipo para dispositivos móveis, será possível visualizar a evolução destes dispositivos, e sua capacidade matemática e de processamento. Além disto, outro ponto que de destaque para o desenvolvimento do TRAMSIM para dispositivos móveis, se deve ao fato do mesmo poder ser utilizado pelos agentes de trânsito e engenheiros de tráfego em qualquer lugar onde eles estejam, pois isso garantiria que aos mesmos estarem no ponto de análise para assim, desenvolver a simulação, avaliando o tráfego real junto à simulação.

O desenvolvimento deste simulador dará suporte ao trabalho dos agentes de trânsito, bem como dos engenheiros de tráfegos. O simulador visa possíveis alterações na estrutura do trânsito. De acordo com Lopes (1998), considera-se trânsito a utilização das vias por pessoas, veículos e animais, isolados ou em grupos, conduzidos ou não, para fins de circulação, parada estacionamento e operação de carga ou descarga.

O protótipo foi desenvolvido para simular o fluxo de tráfego na cidade de Criciúma-SC, e a princípio, o foco é a região próxima a Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC. A ideia surgiu, pois no horário de pico o fluxo de veículos que chegam e saem desta região possui um nível considerado, devido também às instituições de ensino que existem ao redor deste local, como o Centro de Educação Profissional - CEDUP "ABÍLIO PAULO" e a Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC).

Os agentes de trânsito bem como os engenheiros poderão simular as possíveis consequências do fluxo do trânsito nestas intermediações caso haja alguma alteração nas vias de acesso e saída. Sendo exemplos destas alterações, a inserção de sinaleiras, lombadas eletrônicas, aumento do fluxo de carros, entre outras alterações que possam ocorrer.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Os temas abordados pelo trabalho foram distribuídos em 5 capítulos, sendo o primeiro composto pela introdução, objetivo principal, objetivos específicos, justificativa e a própria estrutura do trabalho, aqui relatada. Quanto os demais capítulos, os assuntos abordados foram:

- a) **capítulo 2, Engenharia de Tráfego e Teoria de Fluxo de Tráfego:** trata-se de conceitos voltados a engenharia de tráfegos, e busca definir as regras e os conceitos ligados a mesma. Dentre os assuntos abordados foram levantados as formas de simulação existentes, e suas características, assim como visto os componentes existentes em um fluxo de tráfego;
- b) **capítulo 3, Autômatos Celulares (AC):** este capítulo tem como objetivo definir as características de um AC, definindo sua importância para as simulações de evento complexos que existem nos ambientes, quanto suas características estruturais e comportamentais;
- c) **capítulo 4, Modelo de Autômatos Celulares para Simulação De Tráfego:** este capítulo une os tópicos abordados nos capítulos anteriores, demonstrando tecnologias existentes e que podem ser aplicadas para a simulação de tráfegos urbanos. Este capítulo também subdivide estes modelos já existentes de acordo com suas características e aplicações;
- d) **capítulo 5, Dispositivos Móveis:** este capítulo visa levantar a importância dos dispositivos móveis no ambiente atual, destacando o

- sistema operacional (SO) *Android*, com suas principais características;
- e) **capítulo 6, Trabalhos Correlato:** neste capítulo, são informados trabalhos que se utilizam das teorias de autômatos celulares para a simulação de situações tanto relacionadas a teoria do fluxo de tráfego, quanto a outras formas de simulação que podem ser aplicadas a teoria de autômatos celulares;
  - f) **capítulo 7, Implementação do protótipo TRANSIM:** este capítulo demonstra toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do protótipo, além de demonstrar os resultados obtidos com este protótipo.
  - g) **capítulo 8, Conclusão:** aqui será concluído o trabalho, demonstrando as experiências e ideias obtidas com este trabalho, além de ser levantado possíveis trabalhos futuros relacionado a área de aplicação do presente trabalho.

## **2 ENGENHARIA DE TRÁFEGO E TEORIA DE FLUXO DE TRÁFEGO**

De acordo com o Institute of Transportation Engineers (ITE) engenharia de tráfego e transportes é a aplicação de tecnologia e princípios científicos para o planejamento, design funcional, operações, e gerenciamento de recursos para qualquer forma de transporte, a fim de proporcionar a circulação no trânsito de forma segura, rápida, confortável, prático, econômico e compatível com o ambiente de pessoas e mercadorias (HALL, 2001, tradução nossa).

Existe uma base de estudos chamada teoria do fluxo de tráfego, sendo esta uma das áreas da engenharia de tráfego, que de acordo com Silva (2007), consiste da aplicação de leis da matemática, da teoria da probabilidade e da física à descrição do comportamento do tráfego veicular rodoviário, descrevendo o comportamento de veículos e o relacionamento entre os mesmos em relação à infraestrutura do ambiente.

Segundo Morais (2001), foi analisada que a utilização de simulações e ferramentas computacional sendo uma forma de auxílio iminente para prever e aperfeiçoar o fluxo de tráfego.

### **2.1 ABORDAGENS DE SIMULAÇÕES DE TRÁFEGO**

Segundo Silva (2007) existem três abordagens básicas da análise de tráfego: a macroscópica, que se preocupa em descrever o comportamento das correntes de tráfego, a microscópica, que se interessa pela interação ente dois veículos consecutivos numa corrente de tráfego, e a mesoscópica, cujas unidades analisadas são agrupamentos de veículos que se formam nos sistemas viários. Assim, pode ser visto que a diferença entre os modelos se dá entre o tamanho da rede passível de representação, e o grau de detalhamento possível de análise. Estes modelos são aplicados na criação de novos modelos de autômatos celulares para o tráfego, pois eles definem como o tráfego deve ser analisado, sendo que, um modelo de autômato pode aplicar mais de um conceito diferente, ou seja, um

autômato celular para o tráfego pode ser criado visando tanto modelos microscópicos quanto macroscópicos.

### 2.1.1 Análise da Abordagem Macroscópica

Esta abordagem baseia-se na teoria de que as correntes de tráfego são meios contínuos. A análise macroscópica utiliza-se das Leis da Hidrodinâmica, assim esta abordagem torna-se conhecida também como Analogia Hidrodinâmica do Tráfego (SILVA, 2007).

De acordo com suas características e considerações, as análises macroscópicas tornam-se mais úteis quando aplicadas ao estudo de tráfego de alta densidade, mas não é aconselhado o uso da mesma em situações onde o tráfego é rarefeito, quando é alta a variação de comportamento entre os condutores (SILVA, 2007).

A análise macroscópica das correntes de tráfego ininterrupto permite ao engenheiro projetista uma melhor compreensão das limitações de capacidade dos sistemas viários e a avaliação de consequências de ocorrências que provoquem pontos de estrangulamento nos mesmos (TAVARES, 2010).

Esta abordagem utiliza três grandezas básicas para análise, que seriam o fluxo ou volume do tráfego, concentração ou densidade e velocidade média (SILVA, 2007):

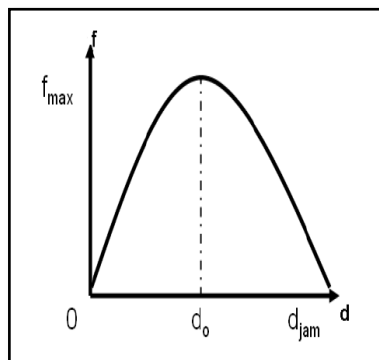
- a) **fluxo ou volume de tráfego:** fluxo de tráfego, também conhecido como volume de tráfego, define o número de veículos que cruzam determinada seção de uma via, considerada dentro de um dado intervalo de tempo;
- b) **concentração ou densidade:** é uma grandeza espacial, significando o número de veículos presentes numa determinada extensão de via;
- c) **velocidade:** Define a velocidade do fluxo de acordo com a densidade e fluxo de tráfego.

A partir das dimensões de fluxo ( $f$ ), densidade  $d$  e velocidade  $v$ , Greenchiold formulou o que é conhecido atualmente como diagramas fundamentais conforme vistos nas figuras 1, 2 e 3 (SILVA, 2007; TAVARES, 2010).

Onde:

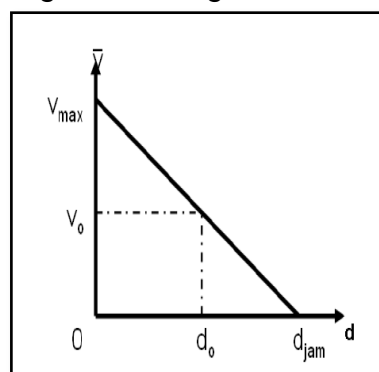
- a)  $f_{max}$  é o fluxo máximo comportado pela via;
- b)  $d_0$  é a densidade ideal, sendo que a densidade ideal ocorre na metade da densidade máxima;
- c)  $d_{jam}$  é a densidade máxima, nesta densidade ocorre o congestionamento;
- d)  $v_{max}$  é a velocidade máxima, nessa situação o fluxo está livre;
- e)  $v_0$  é a velocidade ideal, sendo que a velocidade ideal ocorre na metade da velocidade máxima.

Figura 1 - Diagrama fundamental  $f \times d$



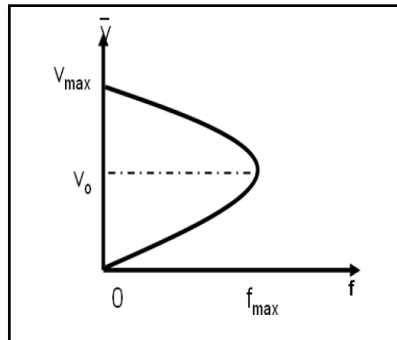
Fonte: Tavares (2010).

Figura 2 - Diagrama fundamental  $v \times d$



Fonte: Tavares (2010).

Figura 3 - Diagrama fundamenta  $v \times f$



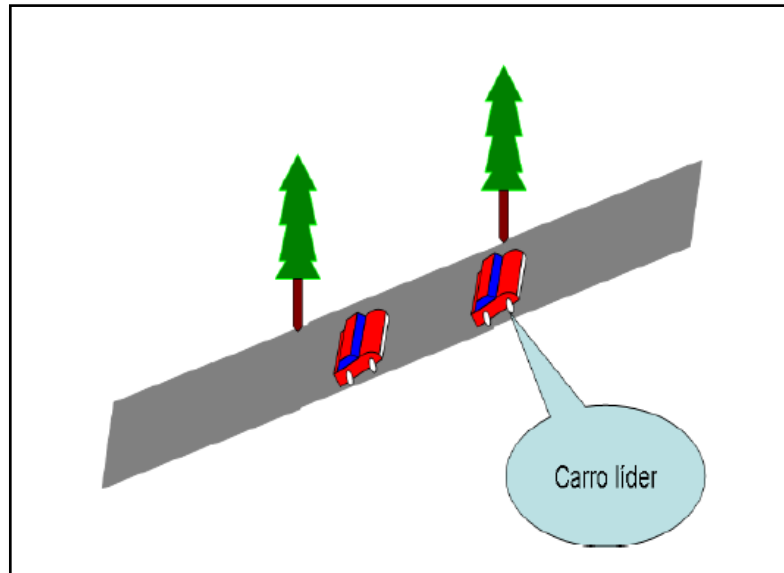
Fonte: Tavares (2010).

### 2.1.2 Análise da Abordagem Microscópica

Esta abordagem baseia-se na iteração entre veículos por veículos, seguindo o modelo conhecido como modelo de perseguição ou leis de sequência (*car following*). Considera-se, segundo este modelo, que os movimentos dos veículos são em forma de veículo-veículo. Esta abordagem analisa a variação de velocidade entre o veículo seguidor e o veículo líder, que seria o veículo mais a frente, como pode ser visto na figura 4 (SILVA; 2007).

Nesta abordagem, os objetos de análise são os veículos e seus atributos que seriam sua posição, velocidade e aceleração (SILVA, 2007; TAVARES, 2010). Modelos que utilizam como base esta abordagem, devem utilizar estes atributos como base de cálculo.

Figura 4 - Desenho tradicional do modelo car following



Fonte: Tavares (2010).

### 2.1.3 Análise da Abordagem Mesoscópica

Concentram-se em alguns aspectos de áreas urbanas, os quais variam em relação à área em estudo, sendo requeridos detalhes específicos. Nesta abordagem são combinados os princípios das abordagens levantadas anteriormente (SILVA; 2007).

Consideram-se os movimentos dos veículos em forma de pelotões, sua dispersão e movimento. Este modelo assemelha-se aos aspectos abordados no modelo microscópico, diferenciando-se no fato de que a análise é executada em pelotões, e não de forma individual (TAVARES, 2010).

## 2.2 CLASSIFICAÇÃO DAS SIMULAÇÕES

De acordo com Tavares (2010), as simulações recebem classificações de acordo como elas são realizadas. Como comparativo entre as formas de classificação se tem:

- a) **determinística ou estocástica:** uma simulação é determinística quando todas as variáveis são também determinísticas. Ao contrário, uma simulação estocástica baseia-se geralmente numa decisão mais próxima e também mais complexa da realidade. Neste caso, o modelo contém uma ou mais variáveis aleatórias cujo papel, numa simulação, será representado através de amostras;
- b) **estática ou dinâmica:** uma simulação é estática para situações em que a dimensão do tempo não é relevante. Porém, a maioria das aplicações da simulação refere-se ao estudo de um sistema ao longo do tempo, caracterizando assim uma simulação dinâmica;
- c) **discreta ou contínua:** numa simulação discreta, a passagem do tempo é feita aos pedaços, entre um evento e outro. Neste caso, supõe-se que o estado do sistema não se altera ao longo do intervalo compreendido entre dois eventos consecutivos. A maioria das simulações estocásticas são também discretas. Numa simulação contínua, a passagem do tempo é vista como se fosse realmente contínua, muito embora ela seja feita a pequenos intervalos de tempo, por imposição do método empregado e do próprio computador.

### 2.3 COMPONENTES DO TRÁFEGO DE VEÍCULOS

Dentre os componentes do tráfego viário, temos as próprias vias de circulação, e suas intersecções, e o movimento sobre as mesmas gerando as correntes de tráfego, sendo estas decorrentes da movimentação de veículos ou pedestres.

### 3 AUTÔMATOS CELULARES

Autômatos Celulares (AC) são constituídos de células, que são componentes simples, que se agrupam e se ligam, formando redes que possuem comportamentos complexos, a primeira vez que AC foram descritos foi na década de 40 por Johann Louis von Neumann, mais precisamente em 1948, com o objetivo inicial de criar um modelo que pudesse reproduzir os sistemas e processos naturais que nos rodeiam (SOUZA, 2002). Von Neumann estava a procura de um autômato que pudesse controlar seus próprios estados, e ao mesmo tempo se auto reproduzir. Com o progresso de sua pesquisa, von Neumann começou a trabalhar junto com Stanislaw Marcin Ulam, assim, eles descreveram a estrutura física de um AC (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

Em um autômato celular o espaço é representado por uma rede de  $n$  dimensões, e preenchido por células. Cada célula possui seu conjunto finito de estados e regras que servem para mudar seu estado atual, essas regras dependem muitas vezes do estado atual da célula e o estado das células vizinhas (SOUZA, 2002).

#### 3.1 CONCEITOS BÁSICOS DE UM AUTÔMATO CELULAR

Os AC possuem algumas características que devem ser assimiladas, para que sua estrutura possa ser compreendida, sendo o seu modelo constituído de  $AC = (L, S, N, f)$ , sendo  $L$  grade ou rede,  $S$  os estados,  $N$  vizinhança e  $f$  função de transição, como será visto nos tópicos a seguir (LIMA, 2007).

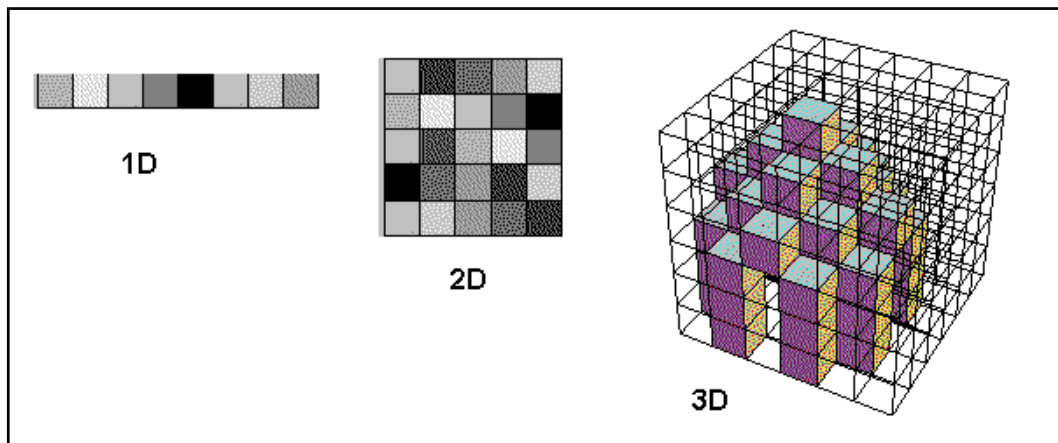
##### 3.1.1 Grade ou Rede

Define o espaço onde as células serão dispostas em um AC. A grade pode ter  $n$  dimensões, e pode ser representado por  $L$ .

### 3.1.2 Dimensão de um autômato celular

Um autômato celular pode ter  $n$  dimensões, sendo que um autômato celular unidimensional irá possuir uma cadeia de células justapostas em linha, assim, um autômato celular bidimensional é composto por células lado a lado formando uma estrutura plana, enquanto, uma estrutura de um autômato celular tridimensional é montada de forma espacial, como pode ser visto na figura 5 (GREMONINI; VINCENTINI, 2008).

Figura 5 - Dimensões de um autômato celular



Fonte: Gremonini e Vincentini (2008).

### 3.1.3 Células de um autômato celular

Uma célula, dentro de um AC pode ser considerada como um elemento que possui estado, e que será analisada pelo AC. As células geralmente estão em conjuntos formando assim, o que se denomina de vizinhança, que seria a fronteira entre as células dentro de uma grade (MORAES, 2007).

Uma característica importante das células de um AC é o fato de que todas devem possuir o mesmo formato, e tamanho.

### **3.1.4 Estados**

O estado são os possíveis valores que uma célula pode obter. Exemplos simples de estados são ligados e desligados, cores, etc. Os estados possíveis de uma célula devem ser finitos e pré-determinados, para que os mesmos possam ser avaliados e analisados. Os estados são representados por  $S$  (SOUZA, 2002).

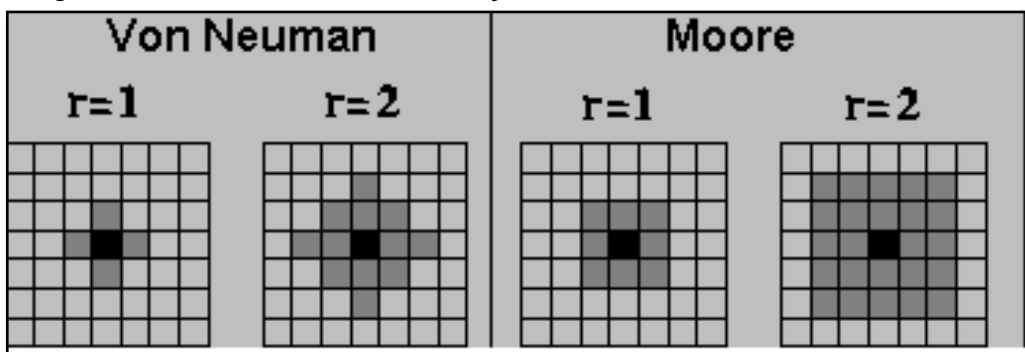
### 3.1.5 Regras

Dentro de um AC, as células podem sofrer variações em seus estados. O mecanismo utilizado para que as transições de estados ocorram são as regras as regras. Um conjunto de regras pode formar o que é chamado de função de transição  $f$ , essas regras são definidas de acordo com as alterações dos estados das células vizinhas, e o estado da célula em si (KINJO; LEMOS; DELANHESE, 2008).

### 3.1.6 Vizinhaça

A vizinhaça  $N$  de uma célula é um dos fatores que caracterizam a sua mudança de estados e seu estado atual. A geometria e a forma como as células vizinhas estão dispostas interfere diretamente na aplicação das regras de transição de estados. Dentre os modelos de transição de estados, destacam-se os modelos de von Neuman que refere-se as células vertical e horizontal adjacentes a célula de referência, enquanto o modelo de Moore considera também as células dispostas diagonalmente à célula de referência, como destacado na figura 6. A figura 6 está considerando a função de transição com o símbolo  $r$ , diferente de como será abordado no presente trabalho (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

Figura 6 - Estruturas de vizinhaça de Von Neuman e Moore



Fonte: Maerivoet e Moor (2005).

## 4 MODELO DE AUTÔMATOS CELULARES PARA SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO

Em um Autômato Celular para o Tráfego (TCA) cada faixa da estrada é denominada como um autômato celular, com os seguintes elementos (LIMA, 2007):

- a)  $L$ , uma grade que representa a via, onde cada trecho da pista é representado por uma célula;
- b)  $S$ , o conjunto de estado que uma célula pode assumir. Este conjunto de estado pode ser composto por informações sobre o veículo, sendo que as informações a serem utilizadas irão depender de como e qual modelo de simulação será adotado. Exemplos de informações são, velocidade do veículo, tamanho, peso, entre outros;
- c)  $N$ , a vizinhança é o conjunto de células à frente da célula avaliada, de acordo com o sentido do tráfego. A vizinhança também sofre alterações de acordo com o modelo a ser adotado;
- d)  $f$ , função de transição é o conjunto de regras que irá definir como o veículo irá se movimentar.

De acordo com Maerivoet e Moor (2005, tradução nossa), os TCA podem ser divididos pela quantidade de células utilizadas para sua representação, esta divisão seria entre modelos de células simples, e modelos de células múltiplas.

De acordo com Lima (2007) os modelos de AC para o tráfego podem ser divididos em determinísticos e probabilísticos, onde os probabilísticos podem ser subdivididos em *slow-to-start* e estocástico. Na tabela 1 serão listados os principais modelos de cada divisão, que posteriormente serão detalhados.

### 4.1 MODELOS DE CÉLULA SIMPLES

Segundo Maerivoet e Moor (2005, tradução nossa) cada célula pode estar vazia, ou é ocupada por exatamente um veículo; todos os veículos têm o mesmo comprimento  $l_i = 1$  célula. O tráfego também é considerado homogêneo, de modo que todas as características dos veículos podem ser assumidas como idênticas. Na

tabela 1 são demonstrados alguns modelos existentes que serão analisados no trabalho para servirem de modelo para o simulador.

Tabela 1. Modelos de TCA abordados para célula simples

Determinístico	Estocástico	Slow-to-start
Wolfram's rule 184 (CA-184)	Nagel–Schreckenberg TCA (STCA)	Takayasu–Takayasu TCA ( $T^2$ - TCA)
Modelo determinístico de Fukui–Ishibashi TCA (DFI-TCA)	STCA com controle de cruzamento (STCA-CC)	O modelo TCA de Benjamin, Johnson, e Hui (BJH-TCA)
	Modelo estocástico de Fukui–Ishibashi TCA (SFI-TCA)	Velocitydependencyrandomization (VDR-TCA)

Fonte: Maerivoet e Moor (2005).

#### 4.1.1 Modelos Determinísticos

Modelos determinísticos têm como característica fornecer uma precisão alta com relação aos estados finais, pois se deve fornecer um conjunto de regras que contemplem todas as transições do TCA em questão (NAGEL, 2008, tradução nossa).

##### 4.1.1.1 Wolfram's rule 184

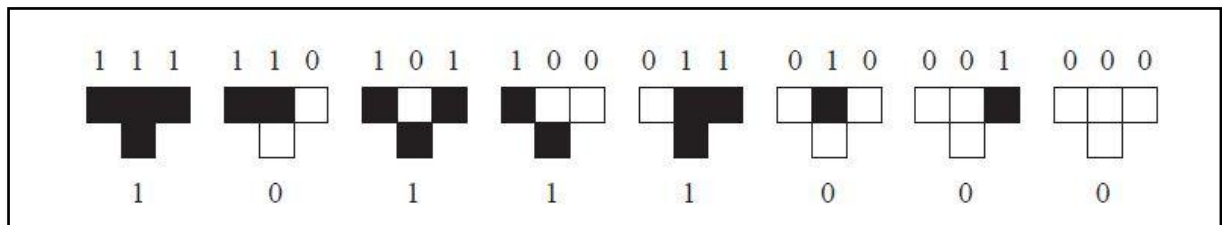
Os Autômatos Celulares determinísticos unidimensionais foram profundamente estudados por Wolfram. A proposta seria encontrar os estados correspondentes para a atualização de cada célula no instante  $t+1$  baseado nos valores da sua vizinhança, que no caso seriam os vizinhos a esquerda, direita e seu próprio valor. Considerando que uma célula pode possuir dois estados para este modelo de autômato, foi definida a equação  $S^S = X$  e após  $X^N$ , onde  $S$  é a quantidade de estados e  $X$  o resultado do cálculo, aplicando os valores teremos  $2^2 = 4$  e  $4^3 = 256$ . Este grupo de 256 autômatos celulares é chamado de *regras de*

Wolfram, e os números associados com cada regra como *notação de Wolfram* (GREMONINI; VICENTINI, 2008; LI; PACKARD, 1990, tradução nossa).

O modelo CA-184 é um TCA unidimensional com estados binários. Este CA recebe a notação 184 dentro das regras de Wolfram. O esquema de Wolfram é baseado na representação de como o estado de uma célula evolui com o tempo, dependendo de sua vizinhança local.

A figura 7 mostra o estado  $S_i(t)$  de uma célula central  $i$  no intervalo de tempo  $t$  em conjunto com os estados  $S_{i-1}(t)$  e  $S_{i+1}(t)$  dos seus dois vizinhos diretos  $i - 1$  e  $i + 1$ , respectivamente. Todos os três constituem a vizinhança local, e ainda na figura 7 também demonstra um exemplo de evolução deste modelo (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

Figura 7 - Evolução do modelo CA-184



Fonte: Maerivoet e Moor (2005).

Este modelo possui as seguintes regras

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

A regra a (aceleração e frenagem) define a velocidade do  $i$ -ésimo veículo, afirmando que um veículo está em uma velocidade constante de uma célula/intervalo de tempo. A regra b na verdade não é uma regra "real"; ela apenas permite que os veículos avancem no sistema (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa; WOLFRAM, 1983, tradução nossa).

#### 4.1.1.2 Fukui–Ishibashi TCA

Em 1996, Fukui e Ishibashi construíram uma generalização do modelo prototípico TCA CA-184. A alteração que eles buscaram foram duas, por um lado, a velocidade máxima foi aumentada de uma célula para  $v_{max}$ /intervalo de tempo, por outro lado, os veículos iriam acelerar instantaneamente para a maior velocidade possível (FUKUI; ISHIBASHI, 1996, tradução nossa).

A equação a seguir, mostra as mudanças entre a regra definida para a CA-184 e a regra definida para esta regra:

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

Tal como antes, um veículo não irá evitar uma colisão, tomando em consideração o tamanho do seu espaço de folga. Para este fim, ele irá aplicar uma desaceleração instantânea: por exemplo, um veículo em movimento rápido pode ter que chegar a uma paragem completa quando se aproxima o fim de um congestionamento, assim, caindo bruscamente sua velocidade de  $v_{max}$  a 0, em um intervalo de tempo.

#### 4.1.2 Modelos Estocásticos

Modelos TCA estocásticos (ou seja, CAs probabilísticos) permitem o aparecimento espontâneo de congestionamentos. Como será mostrado, todos esses modelos incorporam explicitamente um termo estocástico em suas equações, a fim de realizar este tipo de comportamento na vida real (NAGEL; HERRMANN, 1993, , tradução nossa).

##### 4.2.2.1 Modelo de Nagel–Schreckenberg

O modelo proposto por Nagel e Schreckenberg chamado de Nagel–Schreckenberg TCA (STCA) como visto por Emmerich e Rank (1996) distingue sete estados possíveis para cada célula do autômato. Sendo zero estado referido a uma célula desocupados, enquanto os estados 1 à 6 correspondem a células ocupadas por carros de velocidade 0 a uma velocidade máxima  $v_{max} = 5$ . As células são

dispostas em uma linha de modelagem de fluxo de tráfego em apenas uma direção. Uma lacuna inteira (*integer gap*) vai denotar o número de locais vazios na frente de um veículo. Este modelo possui as seguintes regras:

- a) aceleração e frenagem,  $v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t-1) + 1, g_{s_i}(t-1), v_{max}\}$ ;
- b) randomização,  $(t) < p \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\}$ ;
- c) movimento do veículo,  $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$ .

Assim como nos modelo determinísticos, este possui uma regra de aceleração e frenagem (a), e uma regra para o movimento do veículo (c). A diferença se encontra na segunda regra (b) deste modelo, onde é implementado a probabilidade no sistema, considerando um número aleatório no intervalo  $[0, 1]$  ( $\varepsilon(t)$ ) tirada no tempo  $t$  de uma distribuição uniforme. Este número é depois comparado com um parâmetro de ruído estocástico  $p \in [0, 1]$  (chamado de probabilidade desaceleração), como resultado, existe uma probabilidade de  $p$  que um veículo irá diminuir a velocidade a  $v_i(t) - 1$  células/intervalo de tempo. O modelo STCA é chamado de modelo mínimo, no sentido de que todas essas regras são uma necessidade para imitar as características básicas de fluxos de tráfego e seus engarrafamentos da vida real (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

#### 4.1.2.2 STCA com controle de cruzamento

Assim como no modelo STCA, este modelo também tem como característica gerar engarrafamentos artificiais instáveis. Devido ao ruído estocástico inerente ao modelo, um congestionamento sempre pode se formar em qualquer densidade, mesmo induzindo um colapso local do tráfego, no regime de tráfego de fluxo livre. Uma forma de remediar esta situação é através da estabilização do ramo de fluxo livre pelo diagrama  $(k, q)$  um exemplo deste diagrama pode ser visto na figura 8. Isto pode ser feito através da inibição da randomização para veículos de alta velocidade. Para este fim, Nagel e Paczuski reutilizaram as regras definidas para o modelo STCA, mas agora complementado com uma nova regra

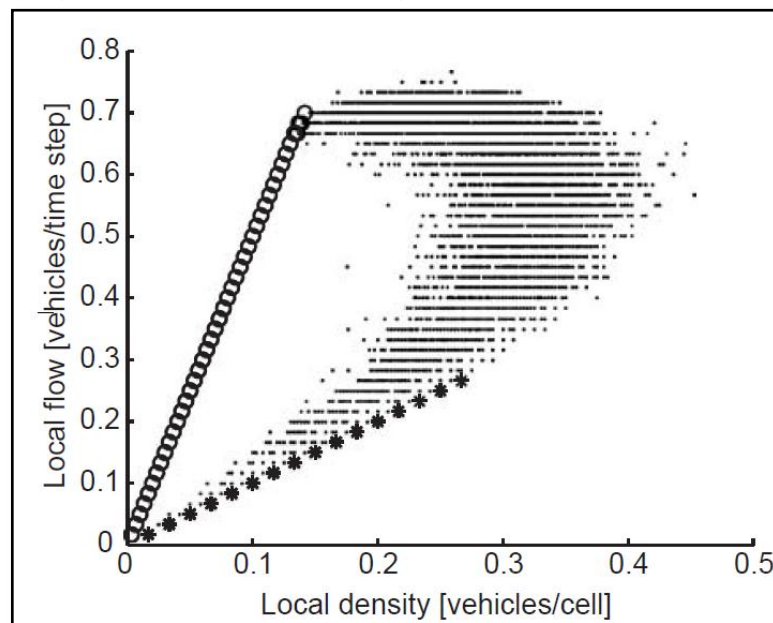
(MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa; NAGEL; PACZUSKI, 1995, tradução nossa):

a) determinar ruído estocástico

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

Com  $p$  agora substituído por  $p'(t)$  na regra de randomização do TCA (regra (b) definida no tópico 4.2.2.1). Esta nova regra desabilita a randomização para veículos em alta velocidade, assim, somente veículos congestionados terão comportamento estocástico (NAGEL; PACZUSKI, 1995, tradução nossa).

Figura 8 - Exemplo do diagrama com  $v_{max} = 5$



Fonte: Maerivoet e Moor (2005).

#### 4.1.2.3 Modelo estocástico de Fukui–Ishibashi

Na seção 4.1.1.2, foi demonstrado a parte determinística do modelo de Fukui–Ishibashi (DFI-TCA), que é uma implementação mais genérica da implementação do modelo TCA CA-184. Em sua fórmula original, Fukui e Ishibashi também introduziram padrões estocásticos em seu modelo, mas agora apenas para a condução de veículos com a maior velocidade possível de  $v_{max}$  células/intervalo de tempo (FUKUI; ISHIBASHI, 1996, tradução nossa).

Para este modelo de acordo com, têm-se as regras:

a) randomização,  $(t) < p'(t) \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\}$ ;

b) movimento do veículo,  $x_i(t) \leftarrow x_i(t - 1) + v_i(t)$ ;

c) aceleração e frenagem,  $v_i(t) \leftarrow \min\{g_{s_i}(t - 1), v_{max}\}$ ;

d) determinar ruído estocástico,

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

Com agora  $p$  alterado para  $p'$  na regra de randomização (a). Pode ser visto que, para  $v_{max} = 1$ , o modelo SFI-TCA e o modelo STCA são idênticos. Além disso, para  $p' = 0$  o SFI-TCA torna-se totalmente determinístico, e em contraste com o comportamento do fluxo de zero do STCA, o caso onde o SFI-TCA é  $p' = 1$  corresponde ao STCA com  $p = 0$  e  $v_{max} = 1$  (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

#### 4.1.3 Modelos Slow-to-start

Todos os modelos *slow-to-start* simulam, de alguma forma, a lenta reação do motorista para restabelecer o movimento de um veículo parado. Mesmo não sendo causada por esse comportamento a meta estabilidade que seria uma região de densidade média, sendo que nesta região a configuração do tráfego influencia diretamente no seu fluxo, podendo gerar um fluxo livre ou congestionado, é reproduzida por esse procedimento e aparece quando se utilizam duas condições iniciais diferentes nas simulações: uma homogênea, quando os veículos são distribuídos igualmente na pista, e outra congestionada, quando se inicia a simulação com uma distribuição heterogênea, contendo grandes engarrafamentos (BARLOVIC et al, 1998, tradução nossa; LIMA, 2007).

##### 4.1.3.1 Autômato Celular de Tráfego Takayasu–Takayasu

Em 1993, Takayasu e Takayasu propuseram um modelo TCA determinista, com base no CA-184 que incorporou um atraso na aceleração para

veículos parados. Sua motivação decorre do fato de que os veículos em alta velocidadesão, em geral, capazes de desacelerar muito rapidamente, mas por outro lado, leva muito mais tempo para atingir a velocidade máxima quando iniciado da condição parado. Takayasu e Takayasu introduziram um atraso, com base na lógica que um veículo só vai começar a mover-se quando reconhece o movimento de seu líder direto (TAKAYASU; TAKAYASU, 1993, tradução nossa).

Traduzindo isso em um conjunto de regras, pode-se escrever as regras do T<sup>2</sup>-TCA com base nas regras do CA-184, com as seguintes modificações(note que  $v_{max} = 1$  células/intervalo de tempo):

- a) frenagem,  $v_i(t - 1) > g_{s_i}(t - 1) \Rightarrow v_i(t) \leftarrow g_{s_i}(t - 1)$ ;
- b) delay de aceleração,  $v_i(t - 1) = 0 \wedge g_{s_i}(t - 1) \geq 2 \Rightarrow v_i(t) \leftarrow 1$ ;
- c) movimento do veículo,  $x_i(t) \leftarrow x_i(t - 1) + v_i(t)$ .

De acordo com este conjunto de regras, um veículo sempre será conduzido em uma velocidade de uma célula/intervalo de tempo, a menos que o mesmo tenha que frear e parar (regra de frenagem). Além disso, o veículo só é permitido acelerar novamente para a velocidade de uma célula/intervalo de tempo, com a condição de que ele tem uma folga suficientemente, sendo isto, definido na regra de *delay* de aceleração. A regra de *delay* de aceleração só é aplicada em veículos parados (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

#### 4.1.3.2 O Modelo de Benjamin, Johnson, e Hui

Nesse modelo Benjamin-Johnson-Hui propõem não se levar em consideração somente o espaço que existe à frente do veículo, considerando também se ele parou devido a outro veículo à sua frente. Se isso ocorre então o veículo continuará parado com probabilidade  $p_s > p_m$ . Isso é simulado adicionando-se outra variável ao algoritmo para informar se o veículo parou devido a outro à sua frente (*flag*) (LIMA, 2007). Este modelo possui as seguintes regras:

- a) *slow-to-start*,  $v_i = 0$  com probabilidade  $p_s$  se  $flag_i = 1$ ;
- b) aceleração,  $v_i = \min(v_i + 1, v_{max})$ ;

c) frenagem,  $v = d_i$  se  $v_i > d_i$  e  $flag_i = \begin{cases} 1 & \text{se } d_i = 0 \\ 0 & \text{se } d_i \neq 0 \end{cases}$ ,

d) randomização,  $v_i = v_i - 1$  com probabilidade  $pm$  e se  $v_i > 0$ ;

e) atualização,  $x_i^t = x_i^{t-1} + v_i^t$ .

O modelo BJH-TCA é baseado no modelo STCA, mas estendendo-o com uma regra que adiciona um pequeno *delay* para um veículo parado que está à frente da fila. Atribui-se essa regra para o fato de que ele imita o comportamento de um motorista que perde momentaneamente a atenção, ou quando o motor de um veículo é lento para reagir. Sua regra *slow-to-start* permite que um veículo parado se mover novamente com esta probabilidade *slow-to-start*  $p_s = 1$ . Se o veículo não se moveu, então ele tenta se mover novamente, mas desta vez com probabilidade a probabilidade  $p_s$  (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

#### 4.1.3.3 Modelo Velocity Dependency Randomization

O VDR-TCA é muito semelhante ao STCA, mas agora existem duas probabilidades envolvidas: a probabilidade de desaceleração padrão agora é usada para veículos em movimento, e a outra probabilidade é usada para veículos parados. Este comportamento leva ao comportamento de retardação (*Slow-to-Start*). O VDR-TCA dá origem a uma separação de fases no sistema, o fluxo de tráfego livre coexiste com um congestionamento compacto apertado de veículos parados.

Este modelo possui as seguintes regras:

a) randomização:  $\varepsilon(t) < p'(t) \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\}$ ;

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

c) movimento do veículo:  $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$ .

Como visto nos modelos anteriores, na regra (b), com  $\varepsilon(t) \in [0,1]$  denota um número aleatório uniforme (especificamente desenhado para o veículo  $i$  no momento  $t$ ), e  $p'(t)$  é o parâmetro do ruído estocástico, dependente da velocidade do veículo. A probabilidade de  $p_0$  e  $p$  são chamadas de probabilidade *slow-to-start* e

a *slowdown* (desaceleração) respectivamente, com  $p_0$  e  $p$  pertencentes a  $[0,1]$ . (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

## 4.2 MODELOS DE CÉLULAS MÚLTIPLAS

Os modelos de células múltiplas consideram que um veículo pode ter um número maior que 1 de células consecutivas em uma direção longitudinal, ou seja, nos modelos a seguir serão considerados que um veículo pode ocupar mais de uma célula dentro de uma grade de um AC (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

### 4.2.1 Helbing–Schreckenberg TCA (HS-TCA)

Este modelo de células múltiplas considera que o veículo possui o comprimento de 1 ou 2 células, ou seja, significa que estes modelos consideram veículos de tamanhos diferentes, mas com diferentes discretização espacial, levando assim a diferentes densidades de congestionamentos. Este modelo possui as seguintes regras (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa):

- a) aceleração e frenagem,  $v_i(t) \leftarrow v_i(t-1) + \alpha(V(g_{s_i}(t-1)) - v_i(t-1))$ ;
- b) randomização,  $\varepsilon(t) < p \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\}$ ;
- c) movimento do veículo,  $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$ .

A função  $V(g_{s_i})$  na primeira equação é a versão discreta da função conhecida como Optimal Velocity Function (OVF), esta função pode ser demonstrada na forma de uma tabela de consulta, que contém entradas de velocidade para cada lacuna, e tem o seguinte significado: valores altos para o parâmetro  $\alpha$  indicam uma adaptação quase instantânea da velocidade do veículo para o OVF, em contra partida, os valores mais baixos indicam um aumento da inércia e tempos mais longos de adaptação (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

### 4.2.2 Brake Light TCA (BL-TCA)

Este modelo incorpora luzes de freio em todos os veículos para definir uma indicação de parada para os veículos, juntamente com antecipação e comportamento do VDR-TCA slow-to-start, o BL-TCA reproduz engarrafamentos bastante realistas, pois o foco deste modelo TCA está em três fases do tráfego introduzidas por Kernel et al. (2000). Primeiro o BL-TCA possui randomização para frenagem espontânea, segundo possui comportamentos *slow-to-start*, e terceiro incorpora inclui elementos para reproduzir um tráfego sincronizado. Por implementar vários comportamentos, este modelo se torna muito complexo em comparação com os modelos vistos anteriormente (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

As regras deste modelo são:

- a) determinar o ruído estocástico,  $b_{i+1}(t-1) = 1 \wedge t_{h_i}(t-1) < t_{s_i}(t-1) \Rightarrow p(t) \leftarrow p_b, v_i(t-1) = 0 \Rightarrow p(t) \leftarrow p_0, \text{ else } \Rightarrow p(t) \leftarrow p_0, b_i(t) \leftarrow 0$ ;
- b) aceleração,  $(b_i(t-1) = 0 \wedge b_{i+1}(t-1) = 0) \vee t_{h_i}(t) \geq t_{s_i}(t) \Rightarrow v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t+1), v_{max}\}$ ;
- c) determinar o espaço efetivo da lacuna,  $g_{s_i}^*(t) \leftarrow g_{s_i}(t-1) + \max\{\min\{v_i(t-1), g_{s_{i+1}}(t-1)\} - g_{security}, 0\}$ ;
- d) frenagem,  $v_i(t) \leftarrow \min\{v_i(t), g_{s_i}^*(t)\}, v_i(t) < v_i(t-1) \Rightarrow b_i \leftarrow 1$ ;
- e) randomização,  $\varepsilon(t) < p(t) \Rightarrow p(t) = p_b \wedge v_i(t) = v_i(t-1) + 1 \Rightarrow b_i(t) \leftarrow 1, v_i(t) \leftarrow \max\{0, v_i(t) - 1\}$ ;
- f) movimento do veículo,  $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$ .

Neste modelo  $b_i(t)$  denota o estado (0 ou 1) da luz de freio do veículo no intervalo de tempo  $t$ ,  $t_{h_i} = g_{s_i}/v_i$  e  $t_{s_i} = \min\{v_i, h\}$  com  $h$  sendo a faixa interação da luz de freio. Onde  $b_i(t)$  denota o estado (0 ou 1) da luz de freio do veículo líder no intervalo de tempo. Como  $t_{h_i}$  é o tempo para chegar ao veículo líder que fica em comparação com um horizonte de interação  $t_{s_i}$ , que depende da velocidade  $v_i$  e é

restringida pelo  $h$ . Se o veículo líder estiver muito distante, a luz de freio não irá interferir no veículo seguidor. Além disso, a regra (a), leva em conta que os motoristas estão mais alertas do que quando eles estão dirigindo em alta velocidade. A probabilidade de desaceleração,  $p$  na regra (a), corresponde tanto à velocidade de frenagem  $p_b$ , quanto a probabilidade de *slow-to-start*  $p_0$  ou a probabilidade de slowdown (desaceleração)  $p_d$ . E o  $g_{s_i}^*$  nas regras (c) e (d), determinam a lacuna efetiva, baseado na velocidade antecipada do veículo líder e levando em consideração a constante de segurança  $g_{security}$  (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

#### 4.2.3 O Modelo de Kerner, Klenov e Wolf

Com base na teoria apresentada no tópico anterior de tráfego de três fases, a KKW-TCA apresenta uma distância de sincronização individual de veículos, levando o pelotão de veículos a uma evolução realista de engarrafamentos. Este modelo possui as seguintes regras (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa):

- a) determinar distância sincronizada,  $D_i(t) \leftarrow D_0 + D_1 v_i(t-1)$ ;
- b) 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) 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) determinar velocidade determinística,  $v_i(t) \leftarrow \max\{0, \min\{v_{max}, g_{s_i}(t), v_{des_i}(t)\}\}$ ;
- e) determinar probabilidade de aceleração,  $v_i < v_p \Rightarrow p_a(t) \leftarrow p_{a1}$ ,  $v_i \geq v_p \Rightarrow p_a(t) \leftarrow p_{a2}$ ;
- f) determinar probabilidade de frenagem,  $v_i = 0 \Rightarrow p_b(t) \leftarrow p_0$ ,  $v_i > 0 \Rightarrow p_b(t) \leftarrow p_d$

- g) determinar ruído estocástico,  $\varepsilon(t) < p_a(t) \Rightarrow \eta_i(t) \leftarrow a$ ,  $p_a(t) \leq \varepsilon(t) < p_a(t) + p_b(t) \Rightarrow \eta_i(t-1) \leftarrow -b$ ,  $\varepsilon(t) \geq p_a(t) + p_b(t) \Rightarrow \eta_i(t) \leftarrow 0$ ;
- h) determinar velocidade estocástica,  $v_i \leftarrow \max\{0, \min\{v_{max}, v_i(t) + \eta_i(t), v_i(t) + a\}\}$ ;
- i) velocidade do veículo,  $x_i(t) \leftarrow x_i(t-1) + v_i(t)$

As regras se dividem em determinísticas (regras de a até d) e estocásticas (regras de e até h). Dentre as regras determinísticas, a distância sincronizada  $D_i$  é determinada com a primeira regra definida. A regra c, determina a velocidade desejada  $v_{des_i}$ : a primeira parte da regra permite que o veículo acelere, enquanto que a segunda parte desta regra usa uma aceleração  $\Delta_{acc_i}$  definida pela regra b (os parâmetros existentes nas regras deste modelo  $a$ ,  $b$  e  $d$  denotam a capacidade de aceleração, frenagem e desaceleração respectivamente). Como tal, um veículo tenderá a adaptar sua velocidade ao do seu líder frontal, quando o veículo se encontra dentro de uma zona de interação isto é distância de sincronização. A velocidade determinística é então calculada pela regra d, que leva em consideração a velocidade máxima  $v_{max}$ , o espaço entre carros  $g_{s_i}$  para evitar colisão e a velocidade desejada definida na regra anterior (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

Na parte estocástica, para calcular a velocidade é introduzido uma randomização pela regra h por meio de uma aceleração estocástica  $\eta_i$ . O valor de  $\eta_i$  é obtido pela regra g com a probabilidade de  $p_a$  para aceleração,  $p_b$  para frenagem. O probabilidade  $p_a$  é dependente dos parâmetros  $v_p$ ,  $p_{a1}$  e  $p_{a2}$  com  $p_{a1} > p_{a2}$  e  $p_{a1} + p_{a2} \leq 1$ . Já  $p_b$  tem a dependência da velocidade determinística calculada e a probabilidade de desaceleração  $p_d$  e a probabilidade de *slow-to-start*  $p_0$  com  $p_0 > p_d$  (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

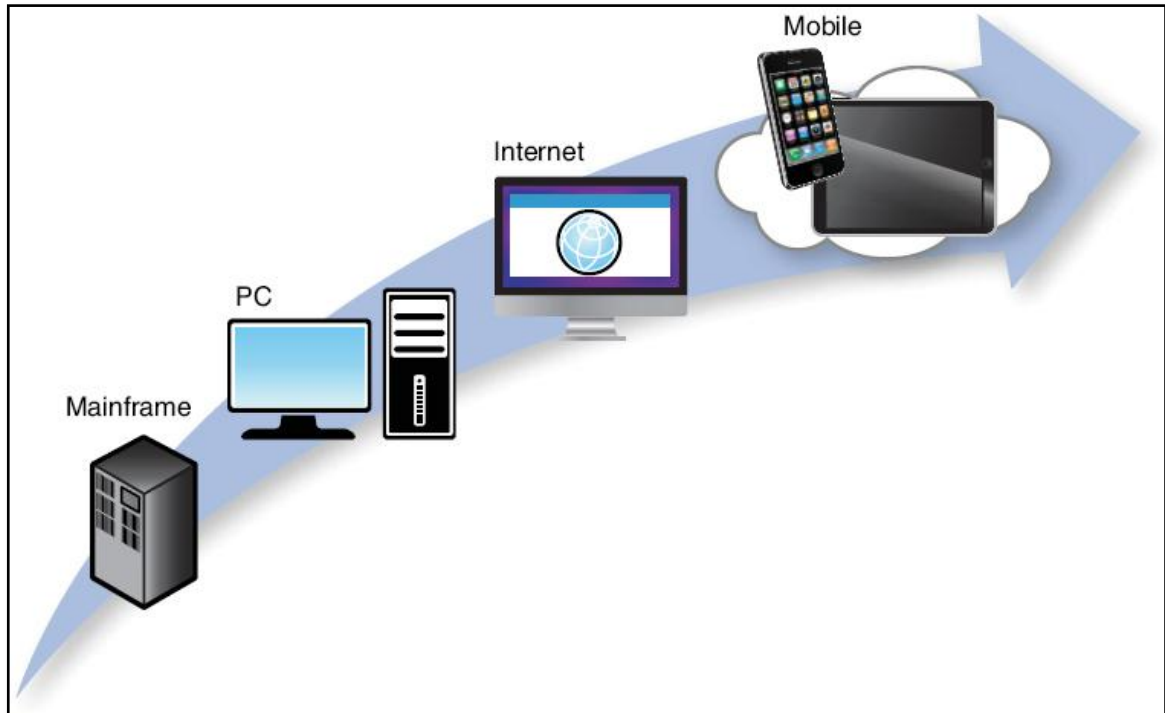
## 5 DISPOSITIVOS MÓVEIS

Hoje, nós podemos interagir com o mundo de quase todos os locais onde estamos desde que existe uma conexão com a internet. No ônibus, viajando pelo mundo, ou simplesmente andando pelas ruas e avenidas enquanto trabalha, sendo que em muitos casos, não é necessário uma conexão com a internet, pois muitos aplicativos podem entreter, ou ajudar no trabalho mesmo *off-line*, isso demonstra que o mundo está em mobilidade (JENKINS, 2009, tradução nossa).

O que nos garante a forma de interação com o mundo citada no capítulo anterior, são os dispositivos móveis, como os *tablets* e *smartphones*. Dispositivos móveis são mais portáteis, são poderosos, mais fáceis de utilizar e significativamente mais baratos que dispositivos como os Computadores Pessoais (PC). Estes motivos levaram a adoção em larga escala destes dispositivos no mundo todo, criando ramificações diversas e muitas tecnologias móveis surgiram (ROWLES, 2014, tradução nossa).

A figura 9 ilustra a evolução das tecnologias durante as eras da computação. O era do *Mainframe*, trouxe consigo, poder computacional e inteligência no negócio, ajudando na automatização de tarefas. A era dos PCs permitiu que o poder computacional pudesse entrar no lar e escritórios da população. A era da Internet, permitiu que a informação se tornasse ubíqua, permitindo que as pessoas se comunicassem *online*, com o mundo todo. Já a era de dispositivos móveis, utilizasse das tendências das eras passadas, tais como fácil acesso ao poder computacional, e a informação, assim, como o PC, tornou as pessoas mais produtivas em casa e no escritório, os dispositivos móveis tornou as pessoas mais produtivas em todos os lugares (NICOL, 2013, tradução nossa).

Figura 9 - Evolução da computação em eras



Fonte: Nicol (2013).

## 5.1 ANDROID

O Sistema Operacional Android é uma plataforma de software de código aberto (*open source*) completa criada para uma ampla variedade de dispositivos móveis. Seus principais objetivos são a criação de uma plataforma de software open source disponível para operadoras e desenvolvedoras, criando um produto completamente aberto a customização e portabilidade, melhorando a experiência móvel para seus usuários (ANDROID, 2014, tradução nossa).

A empresa Google desejava lançar um aparelho com serviços baseados em localização, mas não possuía plataforma para isso. Então, em agosto de 2005, adquiriu a Android Inc., uma pequena empresa em Palo Alto (Califórnia - EUA) que desenvolvia uma plataforma para celulares baseada em Linux, com o objetivo de ser uma plataforma flexível, aberta e de fácil migração para os fabricantes (BUSINESSWEEK, 2005, tradução nossa).

Após dois anos de muitas especulações, em 7 de Novembro de 2007 a Google anunciou o Android como uma plataforma e a criação do consórcio Open Handset Alliance (OHA), formado por empresas como Samsung, Sony, operadoras de telefonia, fabricantes de dispositivos, liderados pela Google. O Android se tornou uma verdadeira plataforma open source que separa o hardware do software que nele roda, permitindo um número muito maior de dispositivos para executar as mesmas aplicações e criando um rico ecossistema para desenvolvedores e consumidores (GARGENTA, 2011, tradução nossa).

Em 22 de Outubro de 2008, foi lançado comercialmente o primeiro aparelho móvel com o sistema Android, o HTC Magic ou G1, que utilizava a versão 1.0 do Android. A partir de então, inúmeras versões foram sendo lançadas, trazendo novas melhorias a cada versão. A partir da versão 1.5, todas as novas versões lançadas passaram a serem batizadas com nomes de alguma sobremesa, sendo em ordem alfabética (GOOGLE, 2014, tradução nossa):

- a) **1.5:** Cupcake, lançada em 2009;
- b) **1.6:** Donut, lançada em 2009;
- c) **2.0 e 2.1:** Eclair, lançada em 2010;
- d) **2.2:** FroYo (Frozen Yogurt) , lançada em 2010;
- e) **2.3:** Gingerbread, lançada em 2010;
- f) **3.0 e 3.2:** Honeycomb, lançada em 2011;
- g) **4.0:** Ice Cream Sandwich, lançada em 2011;
- h) **4.1, 4.2 e 4.3:** Jelly Bean, lançada em 2012;
- i) **4.4:** KitKat, lançada em 2013;
- j) **5.0:** Lollipop, anunciada em 16 de outubro de 2014.

### 5.1.1 Arquitetura

O sistema operacional Android é formado por várias camadas, sendo cada camada com suas próprias características e finalidade. O Android é construído sob um *Kernel* Linux, ou seja, seu motor de funcionamento é o Linux. Inúmeros

fatores levaram à escolha do Linux como base para o Android, dentre elas pode-se citar a portabilidade, segurança e recursos (GARGENTA, 2011, tradução nossa).

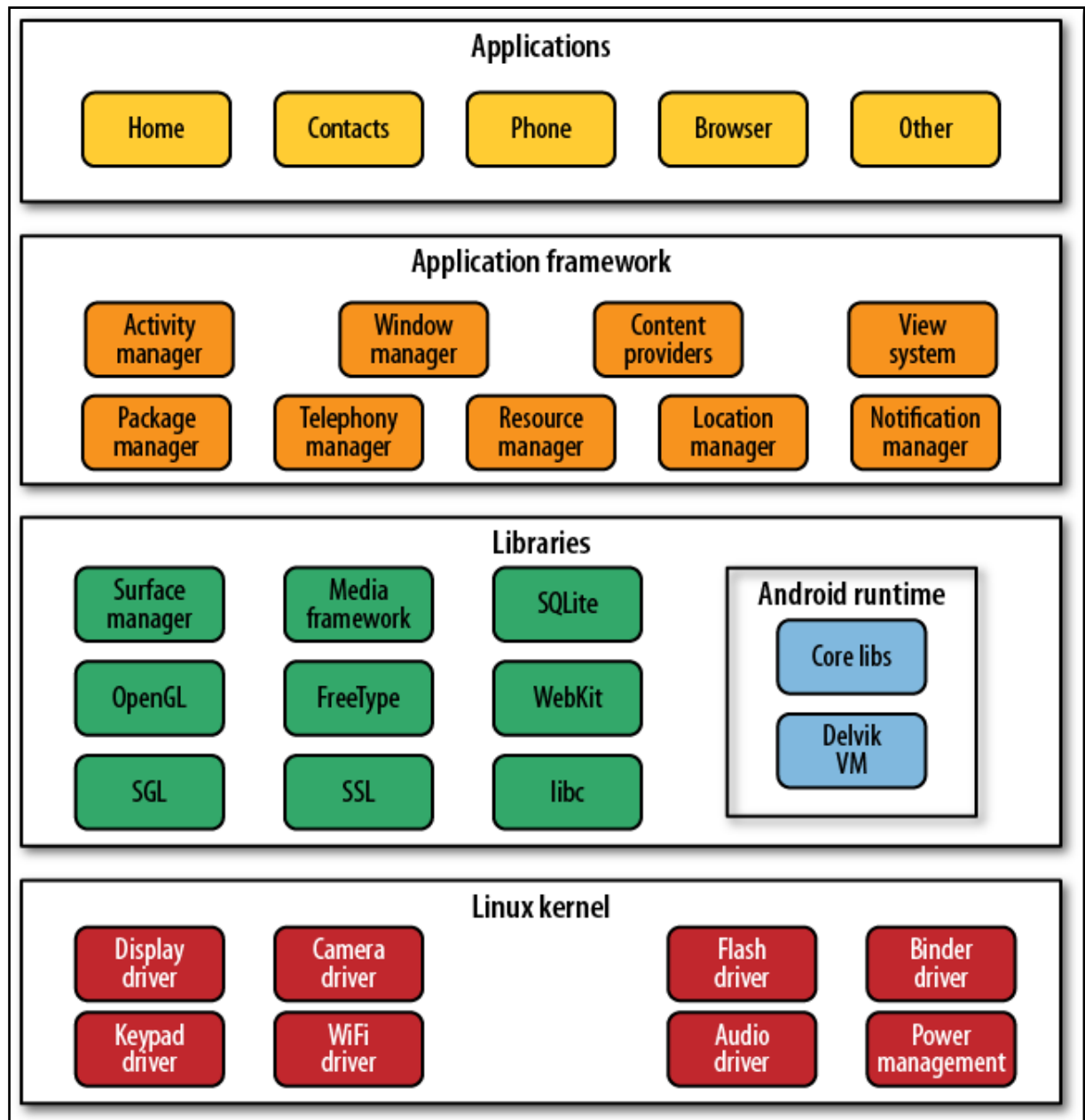
Para Gargenta (2011, tradução nossa), o Android é dividido nas seguintes camadas:

- a) **camada de Kernel Linux**: é a camada mais baixa e é responsável pelo controle do hardware do dispositivo;
- b) **camada de bibliotecas**: é a segunda camada, nela estão as bibliotecas C/C++ que são utilizadas pelo sistema, bibliotecas de multimídia, visualização de camadas 2D e 3D, funções para navegadores web, funções de aceleradores de hardware, renderização 3D e funções para acesso ao banco de dados SQLite;
- c) **camada de Runtime**: nessa camada é onde é feita a instancia da máquina virtual Delvik, criada para cada aplicação executada no Android, ela é projetada para executar vários processos paralelamente;
- d) **camada de Framework de Aplicação**: esta camada disponibiliza aos desenvolvedores as mesmas Application Programming Interface (API) usadas para criar as aplicações originais do sistema. Este framework permite que o desenvolvedor tenha o mesmo acesso ao sistema, que os aplicativos da camada de aplicativos possuem. Este framework foi criado para abstrair a complexidade e simplificar o reuso de procedimentos. Ela funciona como um meio de ligação com a camada de bibliotecas do sistema que serão acessadas através de APIs contidas no framework;
- e) **camada de aplicação**: é a camada mais alta da arquitetura do sistema, é composta pelo conjunto de aplicativos nativos do sistema, onde podemos citar: cliente de e-mail, mapas, jogos, navegador, dentre outros.

A figura 10 demonstra o esquema da pilha de camadas do sistema operacional Android:



Figura 10 - Camadas do Sistema Operacional Android



Fonte: Gargenta (2011).

## 6 TRABALHOS CORRELATOS

Os AC e TCA estão sendo aplicados e estudados para simulações de fluxo de tráfego entre outras formas de simulação, por diversos pesquisadores. Segue alguns exemplos:

- a) na universidade UNESC, foi realizado um trabalho de conclusão de curso visando demonstrar a teoria de Autômatos celulares, neste trabalho foi realizado um estudo para entender como funciona esta teoria. Demonstrando o seu funcionamento em um protótipo que tem como objetivo simular o alastramento de um incêndio florestal. Além disso, foi realizado um levantamento de as áreas onde podem ser aplicados os conceitos de AC (SILVA, 2009).
- b) em 2010, na Universidade Federal de Minas Gerais, foi realizado uma dissertação para o programa de pós-graduação no curso de engenharia elétrica, teve como objetivo demonstrar algumas considerações sobre a simulação de trânsito, definir alguns conceitos fundamentais sobre a Teoria de Fluxo de Tráfego. Foi apresentado um modelo de simulação de tráfego urbano utilizando como base o modelo Celular Automata for Urban Traffic Simulation – Autômato Celular para Simulação de Tráfego Urbano (CAUTS), que utiliza como base a teoria de autômatos celulares (TAVARES, 2010).
- c) a Katholieke Universiteit Leuven (KU Leuven) da Bélgica realizou uma pesquisa, onde foi feito um levantamento de vários modelos de TCA existente, definindo suas regras, características e aplicações. Nesta pesquisa, foi realizada uma revisão sobre modelos TCA, suas aplicações e características, e realizado também uma revisão do conceito de AC. A parte final desta pesquisa teve como objetivo ilustrar algumas das aproximações analíticas mais comuns dentre os modelos TCA unicelulares (MAERIVOET; MOOR, 2005, tradução nossa).

- d) O departamento de física aplicada da universidade de Nagoya desenvolveu um modelo de TCA sendo uma versão estendida da regra-184 (CA-184). Considerando o deslocamento de um veículo por muitos lugares dentro de um espaço de tempo. Neste projeto foi desenvolvido um protótipo de um TCA unidimensional determinístico (FUKUI; ISHIBASHI, 1996, tradução nossa).
- e) na Universidade de Dortmund foi desenvolvido um artigo que tinha como objetivo, a partir do modelo para o fluxo de tráfego STCA, definir possíveis mudanças para este modelo visando uma melhoria significativa (EMMERICH; RANK, 1996).

## 7 IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO TRANSIM

A teoria de Autômatos Celulares (AC) é uma tecnologia que pode ser utilizada para a simulação tanto de fenômenos naturais como não naturais de um modo que se assemelhe a realidade, tendo estudos e implementações em diversas áreas como criptografia de dados, ocupação territoriais, incêndios florestais, dentre outros. Essa teoria permite uma fácil assimilação dos resultados através de regras comumente simples, e a evolução dos estados na grade de um autômato, entregando resultados complexos na medida em que a simulação e a transição de estados das células vão evoluindo com o tempo.

Existem modelos de AC próprios para a simulação do tráfego de veículos, cada um destes possuem suas próprias características, metodologias e são utilizados para determinados modelos de simulação de tráfego.

A teoria de fluxo de tráfego aborda três modelos de simulação. A macroscópica que se preocupa com a evolução do tráfego como um todo, avaliando a densidade e o fluxo de veículos nas vias. A microscópica, que é um modelo de perseguição avaliando a sequência de veículos na via, velocidade, aceleração e posição de um veículo com relação ao próximo veículo. A mesoscópica que utiliza conceitos dos dois modelos apresentados anteriormente, sendo está uma análise de pelotões de veículos, diferente do modelo microscópico, que se baseia na sequência veículo-veículo.

Além dos modelos citados, as simulações podem ser classificadas de acordo como foram implementadas, podendo ser determinísticas ou estocásticas, estáticas ou dinâmicas e discretas ou contínuas.

O protótipo implementado é um simulador do fluxo de tráfego urbano, baseado em AC. A região escolhida para a simulação do tráfego é o entorno da UNESC.

Um dos objetivos do estudo é a alteração da estrutura nas vias. Para que essas alterações, como inserção de semáforos, lombadas e faixas de pedestres, funcionassem corretamente teve que ser criado um modelo específico de AC. Para o

presente trabalho não foi utilizado nenhum dos modelos existentes, foi proposto um modelo de célula simples.

## 7.1 METODOLOGIA

Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o conceito de fluxo de trânsito mundial, nacional e regional, das teorias de fluxo de tráfego de veículos, das tecnologias para dispositivos móveis. Um dos principais tópicos de estudos foram os autômatos celulares, pois a compreensão teórica do mesmo é primordial para o desenvolvimento prático. Por último, foram levantados e estudados modelos de autômatos celulares específicos para o tráfego de veículos.

A segunda etapa a definição das ferramentas para desenvolvimento do protótipo. Foi optado pelo uso, do *Android*, utilizando a integrated development environment (IDE) *Android Studio*, pois é uma ferramenta robusta e focada no desenvolvimento para a plataforma *Android*.

A terceira etapa foi a definição do AC que seria utilizado para desenvolvimento do protótipo. Nesta fase foi identificado que o mais interessante seria desenvolver um modelo próprio, pois se fosse utilizado um dos modelos existentes, limitaria o protótipo, e não seria possível desenvolver as alterações na estrutura da via, sendo este, um dos objetivos almejados. Foi desenvolvido um modelo único com regras e estados próprios, para que as peculiaridades abordadas fossem realizadas.

Após levantamento bibliográfico e as definições acerca do protótipo e do modelo de simulação, também foram definidos alguns padrões de como a simulação irá funcionar para então implementar o protótipo.

### 7.1.1 Desenvolvimento

O TRAMSIM foi desenvolvido utilizando como ambiente o *Java JDK 7 Update 55*, com a IDE *Android Studio 1.1.0*. O modelo do aparelho móvel utilizado como base de testes foi o *Samsung SM-G7102t* com a versão do *Android 4.3*. A máquina onde foi desenvolvido o protótipo possui, *4Gb RAM*, *500 Gb HD*, processador *Intel Core i3-2350M 2.3 Ghz x4* com sistema operacional *Ubuntu 13.10*.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo desenvolver um simulador de tráfego urbano baseado em autômatos celulares para dispositivos móveis, criando para isso, um modelo de simulação, que permita que determinadas estruturas das vias possam ser alteradas.

Foi criado um modelo de simulação de fluxo de tráfego de veículos baseado em AC, seguindo os padrões de simulação de veículos:

- a) **macroscópica**: o fluxo do tráfego será avaliado como um todo, tendo como preocupação a evolução do tráfego como um todo;
- b) **estocásticas**: pois irá possuir em determinadas ocasiões, a necessidade de regras randômicas, como por exemplo, na decisão por qual direção o veículo deverá seguir;
- c) **dinâmicas**: a maioria das aplicações do TRAMSIM refere-se ao estudo de um sistema ao longo do tempo, caracterizando assim uma simulação dinâmica;
- d) **discretas**: a evolução do autômato é feita pela avaliação dos veículos. Esta avaliação gera um evento que pode alterar os estados da grade, assim, a evolução não será contínua, e sim em etapas;
- e) **células simples**: pois é um modelo mais simples, onde um veículo é representado por uma célula na grade.

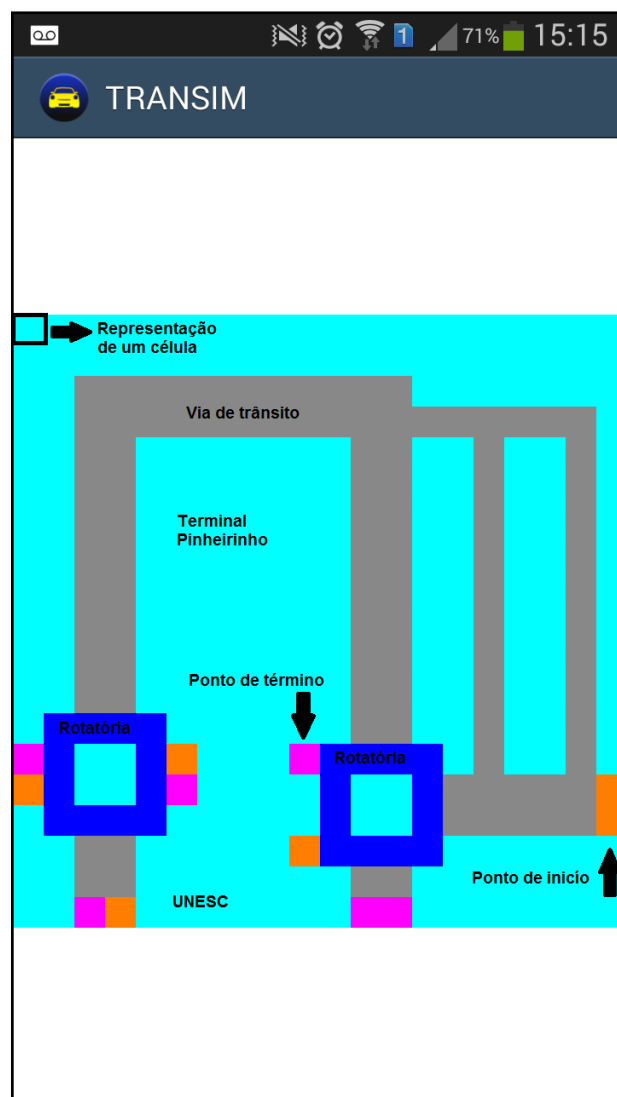
Sobre as características do AC, o TRAMSIM baseou-se nas seguintes:

- a) **forma geométrica da célula**: quadrangular;
- b) **dimensão do AC**: bidimensional;
- c) **vizinhança**: Von Neumann;
- d) **tamanho da vizinhança**: raio igual a 1, sendo as células adjacentes a célula central;
- e) **transição de estado**: depende do estado da célula atual, ou seja, a célula que se encontra no centro e dos estados das células vizinhas.

Para demonstrar a evolução do fluxo do tráfego na simulação, foi criado um mapa simples, abordando o entorno da UNESC. Este mapa que representa a grade do AC possui um tamanho de 20 colunas, por 20 linhas. A figura 11

representa a configuração inicial do autômato enfatizando o significado de cada célula, além de demonstrar uma representação do que é uma célula dentro da grade, além de demonstrar a disposição das células na grade com os estados iniciais e a figura 12 representa uma demonstração do autômato em execução, podendo assim, serem visualizadas todas as células com todos os estados possíveis. Vemos então que cada item desta matriz de 20 por 20 representa uma célula que, por conseguinte são representados pelos seus respectivos estados.

Figura 11 - Grade ao iniciar simulação



Fonte: Do autor.

Quase todos os estados criados, possuem internamente configurações que determinam suas características e auxiliam no funcionamento correto da simulação. Essas configurações foram criadas com o intuito de permitir que os estados dos autômatos sejam gerenciados, garantindo que não existam inconsistências durante a simulação. Isso significa que um estado pode ter vários estados internos que será chamado daqui em diante de configurações, um exemplo destas configurações existe no estado rotatória, onde, para a mesma foi criado uma configuração que dá um peso a célula que possui este estado, este peso auxilia nas regras de transição de veículo na rotatórias. Segue a lista de todas as configurações de estados que existem:

- a) **direção direita ou esquerda:** indica que a célula permite o tráfego apenas na direção direita para esquerda, ou vice-versa;
- b) **controle de direção:** indica se a célula permite ou não a circulação do veículo para as suas células vizinhas, de acordo com a vizinhança de *Von Newman*, sendo assim, existe quatro controles de direção, sendo estes, permitido descer, permitido seguir à esquerda, permitido seguir à direita e permitido subir.
- c) **célula original:** indica a configuração original em determinada posição da célula. Quando uma célula for alterada para o estado veículo, o estado original da mesma é mantido;
- d) **coluna anterior:** indica a coluna anterior ocupada pelo estado veículo durante a última iteração;
- e) **linha anterior:** indica a linha anterior ocupada pelo estado veículo durante a última iteração;
- f) **redução em lombada:** indica se o estado veículo já reduziu ou não, quando possui uma célula vizinha com o estado lombada;
- g) **foi alterada na última iteração:** indica se a célula já foi, ou não alterada durante a iteração na matriz;

- h) **peso da célula:** peso inteiro criado para controlar a circulação na rotatória, este valor pode variar de 1 à 12, e é exclusivo do estado rotatória;
- i) **saída rotatória:** indica se a célula, é uma célula que permite a saída da rotatória;
- j) **contador de semáforo:** é um contador de iterações, que serve para indicar quando um semáforo deve ser alterado de vermelho para verde, ou vice-versa.

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

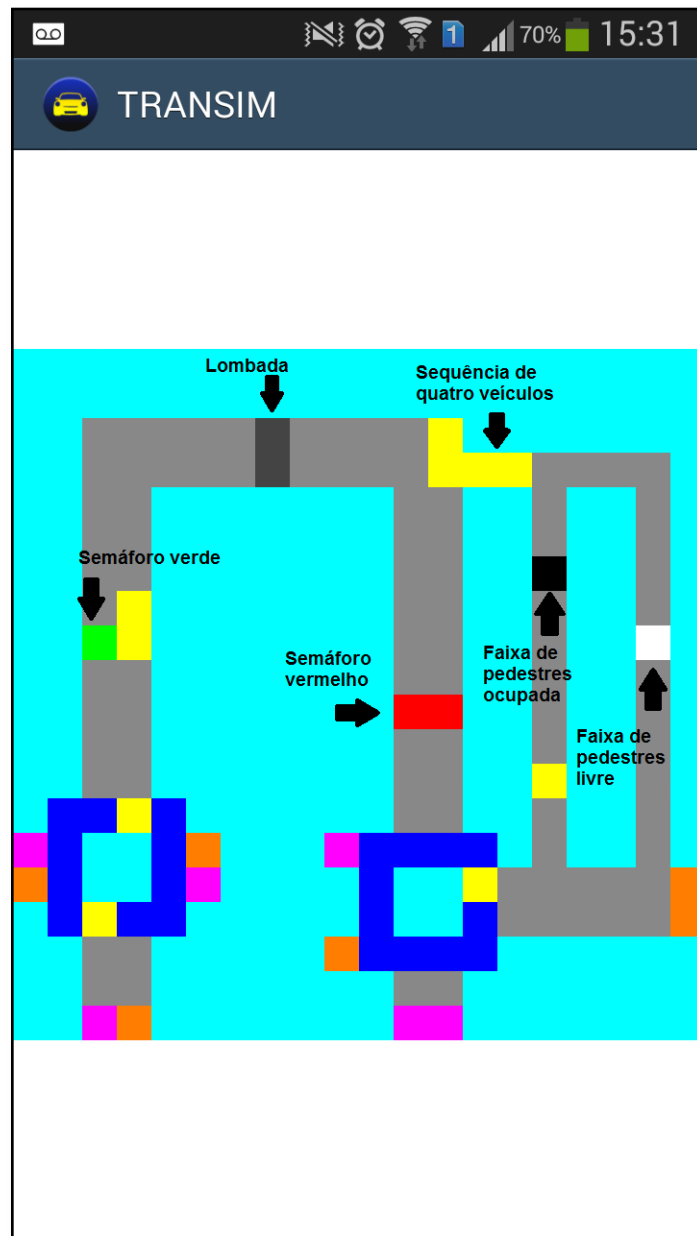
- a) **início do tráfego:** representa as células onde pode-se iniciar o tráfego de veículo. Esta é a única célula que pode ser alterada para o estado de veículo em circulação quando o veículo não se encontra na grade, assim, criando um novo veículo na pista. Este estado é representado pela cor **laranja**, e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção;
- b) **fim do tráfego:** representa as células que indicam o término da circulação dos veículos. Este estado é representado pela cor **rosa**, e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção;
- c) **fixo:** representa as células que não permitem o tráfego de veículos, seriam como estabelecimentos, escolas, terminais de ônibus entre outros. Este estado é representado pela cor **azul claro** e não possui configuração;
- d) **via:** representa as células onde o veículo pode transitar normalmente. Este estado é representado pela cor **cinza**, e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção;
- e) **rotatória:** representa as células onde o veículo pode transitar no sentido anti-horário. Este estado é representado pela cor **azul**, e possui

como características direção direita ou esquerda, controle de direção, peso da célula e saída rotatória;

- f) **veículo:** este estado, representa o veículo, pode ser visualizado pela cor **amarela** e possui como características a célula original, coluna anterior, linha anterior, redução em lombada e se foi alterada na última iteração.
- g) **lombada:** representa as células onde o veículo pode transitar, desde que haja uma redução de velocidade. Este estado é representado pela cor **cinza escuro** e possui como características, o fato de possuir direção direita ou esquerda e controle de direção;
- h) **semáforo vermelho:** representa as células onde o veículo não pode transitar. Este estado é representado pela cor **vermelha**, e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção;
- i) **semáforo verde:** representa as células onde o veículo pode transitar normalmente, assim como o estado via. Este estado é representado pela cor **verde**, e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção;
- j) **faixa de pedestre ocupada:** representa as células onde o veículo não pode transitar. Este estado é representado pela cor **preta** e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção;
- k) **faixa de pedestre livre:** representa as células onde o veículo pode transitar normalmente, assim como o estado via. Este estado é representado pela cor **branca** e possui como características direção direita ou esquerda e controle de direção.

Exemplos destas células são apresentados nas figuras 11 e 12.

Figura 12 - Grade contendo células com todos os estados



Fonte: Do autor.

A grade da figura 11 possui um total de 400 células, todas as células possuem estados iniciais. Estas células são iteradas uma a uma de forma sequencial. Durante a iteração elas são submetidas a avaliação de seus estados, e

posteriormente de seus estados vizinhos para, dependendo de seu estado, e dos estados vizinhos, serem aplicados as regras de transições corretas.

Na primeira etapa do processo onde são avaliadas as células atuais, para que sejam aplicadas as regras, apenas nas células no estado veículo, semáforo vermelho ou verde, faixa de pedestres ocupadas ou livres ou quando estiver no estado inicial, nesta ordem. Para cada um destes casos será realizada um tipo de análise diferente, como pode ser visto no código apresentado na figura 13.

Figura 13 - Estrutura de repetição indicando as células que serão avaliadas pelas regras de transição.

```
//Passa por todos os campos para aplicar as regras
for (int i = 0; i < COLS; i++) {
    for (int j = 0; j < ROWS; j++) {
        //Passar por todas as células do tipo veículo, para aplicar as regras
        if (!celulasDraws[i][j].isFoiAlterada()) {
            acionaCelula(i, j);
        }

        //Avalia semáforo a cada cinco iterações, na grade
        if (contadorIteracoes % 5 == 0) {
            if (celulasDraws[i][j] instanceof CelulaSemaforoDraw) {
                if (celulasDraws[i][j].getSquareColor().getColor() == Color.GREEN) {
                    celulasDraws[i][j].getSquareColor().setColor(Color.RED);
                } else {
                    celulasDraws[i][j].getSquareColor().setColor(Color.GREEN);
                }
            }

            if (celulasDraws[i][j].getCelulaDrawOriginal() instanceof CelulaSemaforoDraw) {
                if (celulasDraws[i][j].getCelulaDrawOriginal().getSquareColor().getColor() == Color.GREEN) {
                    celulasDraws[i][j].getCelulaDrawOriginal().getSquareColor().setColor(Color.RED);
                } else {
                    celulasDraws[i][j].getCelulaDrawOriginal().getSquareColor().setColor(Color.GREEN);
                }
            }
        }

        //Avalia se está passando pedestres, branco significa trânsito sem pedestres,
        // enquanto preto significa passagem de pedestres
        if (celulasDraws[i][j] instanceof CelulaPedestreDraw) {
            if (getEstaPassandoPedestres()) {
                celulasDraws[i][j].getSquareColor().setColor(Color.BLACK);
            } else {
                celulasDraws[i][j].getSquareColor().setColor(Color.WHITE);
            }
        }
    }
}
```

Fonte: Do autor.

Como demonstra a figura 13 os primeiros estados a serem avaliadas são veículos, semáforos em geral e faixas de pedestres em geral. Depois que foram analisadas todas as células na grade é realizado uma nova busca para que sejam

aplicadas as regras de inserção de novos veículos, esta etapa é realizada logo na sequência das etapas demonstradas na figura 13.

Na primeira etapa das regras de transições, onde o estado da célula atual é do tipo veículo, o principal objetivo é avaliar a vizinhança da célula atual, verificando quais as células vizinhas são possíveis candidatas a ser uma célula do tipo veículo. Nesta etapa são aplicadas as seguintes regras:

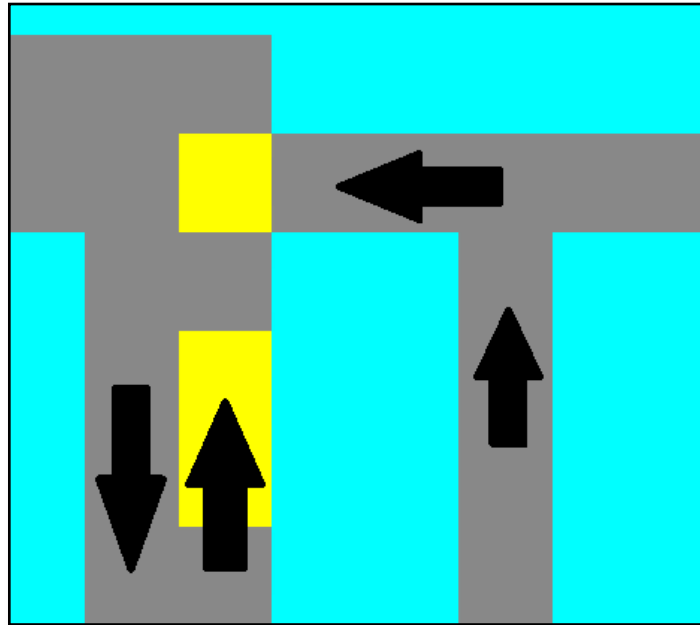
- a) **alteração prévia:** se a célula sendo analisada, já foi alterada anteriormente nesta iteração ela não será alterada novamente, pois, caso ela seja alterada novamente isso implicaria numa movimentação dupla de um veículo na mesma iteração;
- b) **existe vizinhança:** neste momento é avaliado se a célula atual possui todos os vizinhos de acordo com a vizinhança de *Von Newman*, estes vizinhos seriam as posições, esquerda da célula atual [*coluna* - 1] [*linha*], direita da célula atual [*coluna* + 1] [*linha*], acima da célula atual [*coluna*] [*linha* - 1] e abaixo da célula atual [*coluna*] [*linha* + 1]. Caso alguma destas vizinhanças não exista essa posição não poderá ser uma candidata a receber o estado veículo;
- c) **é permitido seguir a direção determinada:** como na regra anterior esta regra considera a vizinhança de *Von Newman*, assim sendo, nesta regra é verificado se o estado anterior da célula, onde está o veículo, permite que a célula vizinha seja uma candidata ao estado veículo. O principal objetivo desta regra é não permitir que um veículo faça um retorno na contramão, pois a regra direção da via, que é explicada no tópico *f*, não garante que um veículo que está indo da direita para à esquerda quando encontrar um ponto onde o mesmo não pode seguir como em vias paralelas de mesma direção, mas que, sem esta regra ele poderia entrar na contra mão, como pode ser visto na figura 14, onde o veículo está seguindo na direção direita para esquerda e encontra uma rua paralela de mesma direção, mas caso ele retorne ou tente ir para o vizinho abaixo dele, ele pode entrar na contramão;

- d) **é coluna anterior:** essa regra existe para destacar se a coluna anterior da célula atual é a mesma coluna da célula vizinha sendo analisada;
- e) **regra é linha anterior:** essa regra existe para destacar se a linha anterior da célula atual é a mesma linha da célula vizinha sendo analisada. Esta regra trabalha em conjunto com a regra é coluna anterior. Caso as duas ocorram a célula vizinha não poderá ser uma candidata ao estado veículo, pois isso poderia ocasionar um retorno indevido;
- f) **direção da via:** esta regra é utilizada caso a célula vizinha sendo analisada esteja em um dos seguintes estados: via, fim do tráfego, lombada (caso já tenha aguardado uma iteração), semáforo verde e faixa de pedestre livre. Neste ponto é comparado se a direção (esquerda ou direita, nas configurações de estados) da célula original que está armazenada junto à célula atual, é igual à direção da célula vizinha sendo analisada, caso não seja significa que a célula vizinha é uma célula de direção contrária, assim, não podendo ser uma candidata ao veículo;
- g) **saída de rotatória:** caso a célula original esteja no estado rotatória, e a célula vizinha seja uma célula que esteja em um estado diferente de rotatória, então é aplicado esta regra que avalia se a célula original está configurada como saída de rotatória. Caso não esteja a célula vizinha não poderá ser uma candidata, mas caso esteja a célula vizinha automaticamente será considerada uma candidata;
- h) **alteração de posição na rotatória:** caso tanto a célula original quanto a célula vizinha sendo analisada estejam no estado rotatória é aplicado este regra. Avalia-se o peso da célula original e da célula vizinha sendo analisada, e caso o peso da célula original mais um for igual ao peso da célula vizinha sendo analisada, ou o peso da célula original seja doze e o peso da célula vizinha seja um, a célula vizinha torna-se uma célula candidata ao estado de veículo, caso contrário não. Como se

pode perceber a regra demonstra a circulação de veículos na rotatória, podendo inclusive reiniciar um novo ciclo na mesma;

- i) **proibido retornar ao inicio**: caso a célula vizinha esteja no estado inicio do tráfego a mesma automaticamente será descartada da lista de candidatas ao estado veículo;
- j) **proibido sair do circuito**: caso a célula vizinha esteja no estado fixo, a mesma automaticamente será descartada da lista de candidatas ao estado veículo, pois o estado fixo representa áreas onde o veículo não pode transitar;
- k) **proibido atravessar o sinal vermelho**: caso a célula vizinha esteja no estado semáforo vermelho, a mesma automaticamente será descartada da lista de candidatas ao estado veículo;
- l) **proibido atravessar a faixa de pedestres**: caso a célula vizinha esteja no estado faixa de pedestre ocupada, a mesma automaticamente será descartada da lista de candidatas ao estado veículo;
- m) **de redução em lombadas**: caso a célula vizinha esteja no estado lombada, é verificado se o veículo já aguardou uma rodada de iterações, caso o veículo não tenha aguardado esta célula não poderá se tornar candidata nesta rodada, sendo possível se tornar candidata apenas na próxima rodada de iterações.

Figura 14 - Trecho onde poderia ocorrer uma colisão entre veículos



Fonte: Do autor.

Após serem aplicadas todas as regras da primeira etapa, para todas as células vizinhas, é gerada uma lista de células candidatas ao estado veículo. Neste momento é aplicada uma nova regra, que dentre estes vizinhos é selecionado um deles de forma aleatória para que receba o estado de veículo.

A partir deste momento, é realizada a transição de estados de uma célula a outra seguindo os passos abaixo, que podem ser melhores visualizados no código apresentado na figura 15:

- a) se a célula candidata selecionada estiver no estado fim do tráfego, o veículo é retirado da grade, ou seja, nem a célula candidata e nem a célula atual irá mais possuir o veículo. Neste momento o estado original da célula atual será retornado devido a variável de configuração célula original, pois essa variável armazena o estado original de uma célula que foi alterada para o estado veículo;
- b) se a célula candidata selecionada for qualquer outro estado válido, então esta célula será alterada para o estado veículo, salvando como suas configurações a célula original, a coluna anterior, a linha anterior e

também será informado que está célula já foi alterada nesta iteração. Após isso, o estado original da célula atual será retornado devido a variável de configuração célula original, pois essa variável armazena o estado original de uma célula que foi alterada para o estado veículo.

Figura 15 - Transição de estados

```

//Insere a nova célula randomicamente de acordo com as vizinhanças, e define a posição anterior
if (!celulaCandidatas.isEmpty()) {
    CelulaCandidata celulaCandidata = getRandomCandidata(celulaCandidatas);
    //Caso a célula candidata for uma célula final de tráfego
    if (celulaCandidata.getCelulaDraw() instanceof CelulaFimDraw) {
        celulasDraws[coluna][linha] = copiaCelula((celulasDraws[coluna][linha].getCelulaDrawOriginal()));
        quantidadeVeiculos--;
    } else {
        CelulaDraw celulaDrawAux = copiaCelula(celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()]);
        celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()].setDirecao(celulasDraws[coluna][linha].getDirecao());
        celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()] = new CelulaCarroDraw();
        celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()].setFoiAlterada(true);
        celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()].setColunaAnterior(coluna);
        celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()].setLinhaAnterior(linha);
        celulasDraws[celulaCandidata.getColuna()][celulaCandidata.getLinha()].setCelulaDrawOriginal(copiaCelula(celulaDrawAux));
        celulasDraws[coluna][linha] = copiaCelula(celulasDraws[coluna][linha].getCelulaDrawOriginal());
    }
}

```

Fonte: Do autor.

Na segunda etapa são avaliadas as regras com relação à transição de estados do semáforo de semáforo vermelho para semáforo verde, ou vice versa. Nesta etapa deixa-se de considerar a célula atual como o estado veículo, e passa a considerá-la nos estados que correspondem ao semáforo, exceto no caso quando a célula estiver no estado veículo, mas originalmente a mesma estava no estado semáforo. Neste caso é analisada a célula original armazenada na célula atual, pois apenas o estado veículo armazena a célula original. Uma das características desta etapa é o fato de não ser necessário para a transição de estados considerar a vizinhança nas regras de transição, sendo este um modelo muito mais simples, comparado à primeira etapa. Sendo assim, tem-se a seguinte regra:

- a) **contador de iterações**: caso o contador de iterações for menor que cinco, o estado do semáforo não será alterado, caso for igual a cinco, o estado deverá ser alterado.

Caso a regra acima, permita a transição de estados, então o sistema irá alterar o estado do semáforo invertendo o estado de verde para vermelho, ou vice-versa, e após isso irá reiniciar o contador de iterações para zero.

A terceira etapa das regras de transições é similar à segunda, mas nesta etapa ao invés de serem considerados os estados relacionados aos semáforos serão considerados os estados relacionados às faixas de pedestres. Então, tem-se para esta etapa a seguinte regra de transição:

- a) **transição de pedestres:** é avaliado de forma aleatória, com uma chance de um para quinze, se irá ocorrer a passagem de pedestres na célula atual.

A validação aleatória é utilizada como uma forma de simular uma possível passagem de pedestres. Caso o estado da célula atual for faixa de pedestre ocupada, e a variável aleatória indicar que não haverá mais pedestres, a célula atual passará para o estado de faixa de pedestre livre. O mesmo acontece caso o estado da célula for faixa de pedestre e a variável indicar que haverá trânsito de pedestres, assim a célula atual passará para o estado de faixa de pedestre ocupada.

A última etapa existe para inserir novos veículos na grade, como pode ser visualizado na figura 16. As regras nesta etapa são aplicadas após todas as regras das etapas anteriores serem executadas. A opção por separar estas regras da iteração original ocorreu, pois quando uma célula do tipo início do tráfego é inicialmente alterada para o estado veículo, a mesma não poderá mais ser alterada durante a sequência da iteração, garantindo assim, que uma mesma célula não seja alterada mais de uma vez em uma mesma iteração. Nesta etapa só são consideradas as células no estado início do tráfego que se encontram na grade, possuindo a seguintes regras:

- a) **permite inserção de veículos:** verifica se densidade máxima de veículos já foi alcançada;
- b) **existe células no estado início do tráfego:** antes de iniciado, o sistema avalia a grade e busca uma lista de todas as células existentes

no estado início do tráfego, e após executa esta regra avaliando se a lista criada não está vazia.

Após a execução das regras acima, caso a densidade de veículos não tenha atingido o limite máximo e caso ainda existam estados de início do tráfego, o sistema insere um novo veículo na grade, similar ao que é feito na primeira etapa onde uma célula candidata é alterada para o estado de veículo. Como pode ser analisado no código demonstrado na figura 16 a cada iteração o sistema preenche todas as células do estado início do tráfego para o estado de veículo, caso as regras permitam isso.

Figura 16 - Inserção de novos veículos

```
List<CelulaCandidata> celulaCandidatasIniciais = getPontosIniciais();
while (!celulaCandidatasIniciais.isEmpty()
    && quantidadeVeiculos < quantidadeVeiculosMaximo) {
    //Inserir um novo veículo
    insereVeiculoNaGrade(celulaCandidatasIniciais);
    quantidadeVeiculos++;
    celulaCandidatasIniciais = getPontosIniciais();
}
```

Fonte: Do autor.

Quando o TRAMSIM é iniciado, o desenho do mapa e suas características iniciais são realizados através do carregamento de todas as 400 células na matriz, cada uma possuindo um estado e configurações únicas destes estados iniciados. A simulação não termina, e sempre que células no estado veículo desaparecem, outras são repostas, para que o fluxo do tráfego seja mantido.

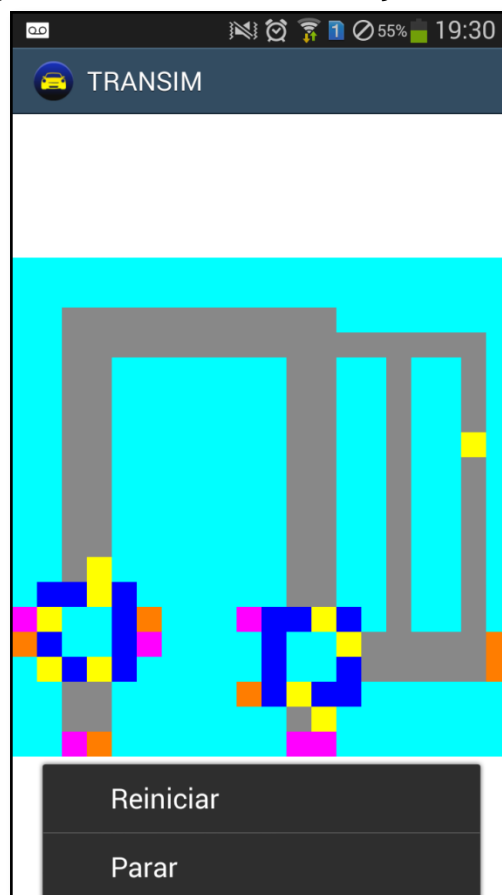
A simulação é executada dentro de uma *thread* configurada para ser executada a cada meio segundo, sendo que a cada execução, são aplicadas todas as regras de transições apresentadas anteriormente. Como pode ser visto nas figuras 17 e 18 é possível parar, continuar, ou reinicializar a execução da simulação.

O TRAMSIM permite alterações nas vias no entorno da UNESC, como a inserção de semáforos, lombadas, faixas de pedestres e alteração da densidade de veículos, e como visto na figura 11. O circuito não possui inicialmente estas

características e a densidade inicial de veículos é igual a dez. Para que essas características possam ser inseridas dinamicamente pelos usuários do protótipo, foram criadas opções para que o mesmo possa alterar a estrutura do circuito, como pode ser visto na figura 18.

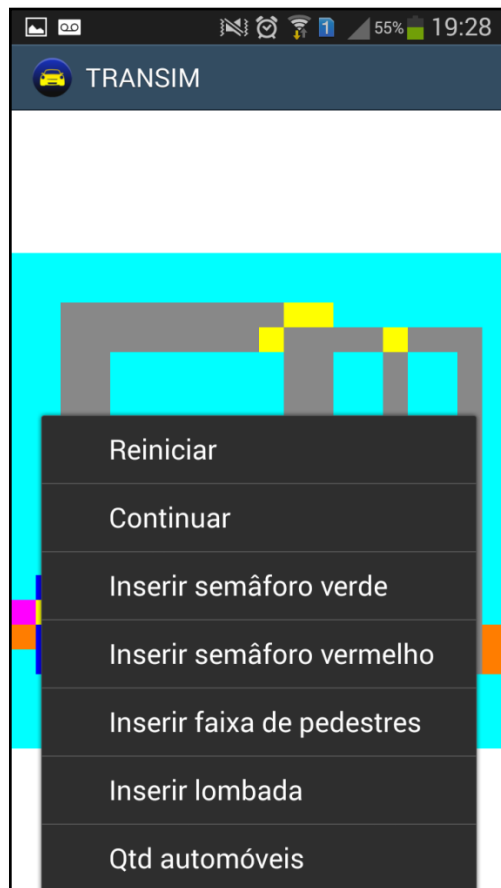
Para garantir a segurança e o funcionamento correto da simulação, as opções de configuração do circuito só podem ser executadas quando a simulação estiver parada, caso contrário os itens do menu permanecem ocultos.

Figura 17 - Menu com simulação executando



Fonte: Do autor.

Figura 18 – Menu com simulação interrompida



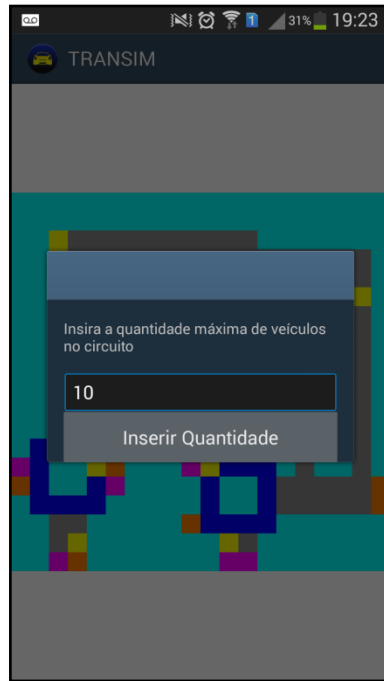
Fonte: Do autor.

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

- a) **Reiniciar**: este botão permanece sempre ativo, e é utilizado para retornar todas as variáveis ao seu estado original, além de recarregar a grade ao seu padrão inicial;
- b) **Parar**: para a simulação permitindo que seja alterado as características da grade. E a opção só aparece no menu, quando a simulação esta em execução;
- c) **Continuar**: reinicia a simulação do ponto onde ela foi paralisada, este botão só aparece caso a simulação tenha sido parada;

- d) **Inserir semáforo verde:** esta opção quando selecionada permite que o usuário altere manualmente o estado da grade através do toque. Quando tocado em uma posição da grade que corresponde a uma célula o estado desta célula será alterado para semáforo verde. O único estado que pode ser alterado desta forma é o estado via. Este botão só aparece se a simulação estiver interrompida;
- e) **Inserir semáforo vermelho:** esta opção quando selecionada permite que o usuário altere manualmente o estado da grade através do toque. Quando tocado em uma posição da grade que corresponde a uma célula o estado desta célula será alterado para semáforo vermelho. O único estado que pode ser alterado desta forma é o estado via. Este botão só aparece se a simulação estiver parada;
- f) **Inserir faixa de pedestres:** esta opção quando selecionada, permite que o usuário altere manualmente o estado da grade através do toque. Quando tocado em uma posição da grade que corresponde a uma célula o estado desta célula será alterado para faixa de pedestre livre. O único estado que pode ser alterado desta forma é o estado via. Este botão só aparece se a simulação estiver parada;
- g) **Inserir lombadas:** esta opção quando selecionada, permite que o usuário altere manualmente o estado da grade através do toque. Quando tocado em uma posição da grade que corresponde a uma célula o estado desta célula será alterado lombada. O único estado que pode ser alterado desta forma é o estado via. Este botão só aparece se a simulação estiver parada;
- h) **Densidade de veículos:** esta opção permite que a quantidade de veículos na via seja aumentada ou reduzida, tendo como limite máximo oitenta células com o estado veículo e mínimo zero. O valor padrão é dez veículos. A figura 19 demonstra como este menu funciona, e assim como as opções de inserção, esta opção só aparece se a simulação estiver parada.

Figura 19 - Alteração de densidade de veículos



Fonte: Do autor.

O fluxo de veículos é validado de célula para célula, pois a simulação depende da célula atual que está sendo analisada e de suas vizinhas mais próximas de acordo com a vizinhança de *Von Newman*, permitindo que o estado da própria célula e de suas vizinhas seja alterado. Com isso é possível visualizar de uma forma global a evolução da simulação, com alterações na densidade de veículos e estrutura das células nas grades. Nesta simulação não é possível alterar as vias em si. Também são desconsideradas a velocidade e aceleração dos veículos.

## 7.2 RESULTADOS OBTIDOS

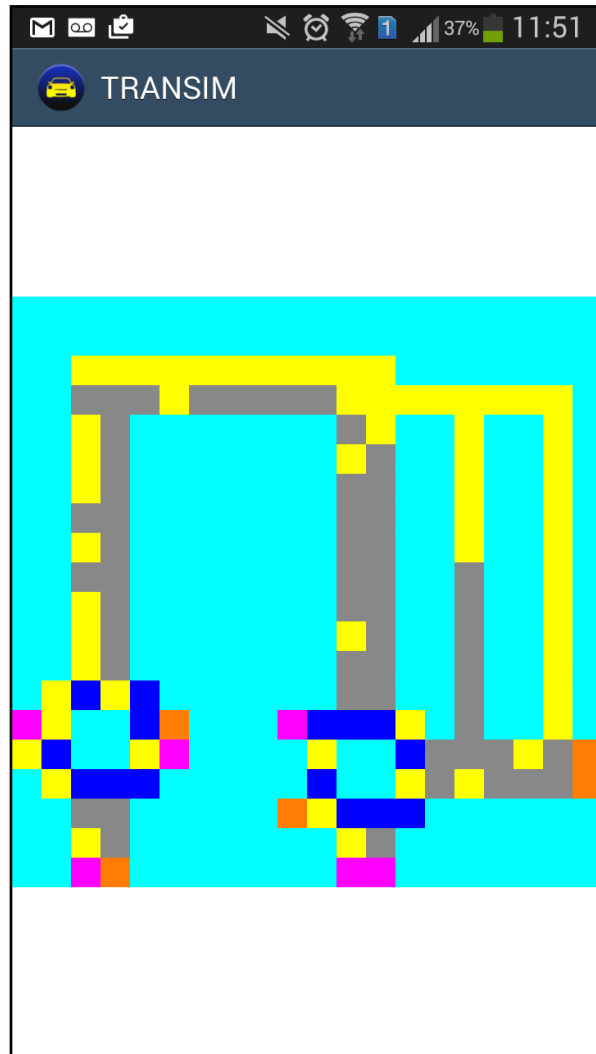
Após o desenvolvimento do protótipo TRAMSIM verificou-se que a simulação utilizando AC é um método eficaz de simulação de fluxo de tráfego.

Durante a execução pôde-se constatar que quando se tem até sessenta veículos a simulação ocorre com êxito, simulando corretamente os circuitos definidos

pelos veículos, quando a densidade de veículos alcança um valor acima de sessenta pode-se perceber que em determinados trechos do circuito ocorre um engarrafamento como mostrado na figura 20. Isto se deve a dois motivos:

- a) a decisão de qual via deve ser tomada pelo veículo é realizada de forma aleatória, isso significa que o veículo não irá selecionar a via com menor tráfego para seguir, assim, permitindo que determinados trechos do circuito sofram de engarrafamento;
- b) outro fator que agrava a situação de engarrafamentos é o fato de que a simulação ocorre analisando primeiramente as células dispostas no início da matriz, para depois analisar as células que estão nas últimas posições da matriz. Com isso as mesmas células são executadas antes das outras, fazendo com que as células no fim da matriz não se movimentem, devido ao fato de que a execução das células iniciais pode trancar a passagem das outras células.

Figura 20 - Engarrafamento iniciado nas vias mais à direita



Fonte: Do autor.

Um ponto de destaque do TRAMSIM é o fato de que este permite alterações nas vias. Estas alterações servem para demonstrar como o circuito funcionaria caso o mesmo fosse alterado realmente. Um exemplo seria o caso de colocar uma lombada em trechos de maior velocidade, isso permite que os agentes de trânsito visualizem o funcionamento das vias com estas alterações. O protótipo atualmente permite que os usuários insiram lombadas, faixas de pedestres e semáforos.

Como pôde ser visto nos levantamentos bibliográficos existem vários modelos de TCA, cada um com suas características e aplicações. Os motivos de não terem sido utilizados nenhum destes modelos para o desenvolvimento do protótipo, foram os seguintes:

- a) os modelos abordados na bibliografia, não estavam completamente alinhados com os objetivos do projeto, pois estes não consideravam estruturas viárias diferentes como rotatórias, lombadas e semáforos;
- b) estes TCA consideram a aceleração e velocidade média dos veículos. Estas informações para o objetivo do protótipo não são de suma importância ao desenvolvimento, assim foram abstraídos estes conceitos do protótipo;
- c) para um maior aproveitamento do conteúdo abordado, foi decidido na implementação de um modelo com seus próprios estados e regras de transição.

Durante o levantamento bibliográfico, uma das coisas que foi possível observar é que no Brasil, principalmente na região sul, não existe uma variedade de pesquisas relacionadas às simulações de fluxo de tráfego utilizando AC.

Com o protótipo desenvolvido, é possível visualizar que caso sejam seguidas as regras e a alocação dos estados corretamente, poder-se-ia recriar todo o circuito, com inícios e fim de tráfegos, rotatórias e vias completamente modificadas. As regras aplicadas não são específicas para o circuito criado. Isto é uma característica da teoria dos AC, onde dependendo dos estados das células e as regras de transição o sistema irá se desenvolver e a simulação irá fluir.

Durante a elaboração dos estados e regras do autômato, foi constatada uma grande dificuldade na definição dos mesmos, pois quando se definia modelos de estados sem nenhuma configuração adicional a simulação não funcionava corretamente, algumas células que recebiam o veículo não deveriam recebê-lo naquele momento, pois criaria uma colisão com outro veículo visto que esta célula seria de circulação inversa. Assim, foram criadas dezenas de estados adicionais para determinados estados, que foram chamados de configurações de estados, para

que houvesse uma diferenciação entre os mesmo, estas configurações podem ser vistas como estados das células. Com esta alteração, foi possível criar regras de transições que representassem de uma forma aceitável a movimentação de veículos nas vias.

Outra constatação é o fato do protótipo possuir situações que necessitam de decisões aleatórias. Essas decisões aleatórias, em determinadas ocasiões, não representam uma movimentação lógica de um veículo. Como prova disso temos a rotatória, onde com as regras criadas pode-se observar que é possível que um veículo fique preso na rotária girando em círculos por algum tempo antes de sair. Mesmo ele encontrando uma célula que permite a saída da rotatória, a próxima célula representando uma rotatória, de acordo com as regras criadas, também é válida, assim, ficando a cargo da aleatoriedade decidir qual caminho o veículo deverá tomar. Esta não é uma situação onde a movimentação do veículo não é permitida, mas é uma situação atípica, pois veículos não ficam circulando em rotatórias.

Além deste, existe mais um caso onde podemos analisar o movimento aleatório do veículo, seria na situação de existir pedestres atravessando a via ou não. Foi constatado que uma função de aleatoriedade com uma chance de estar passando pedestres de dois para um seria muito alta, pois isso iria interromper o fluxo de veículos, além de não condizer com a realidade. Para amenizar este problema, a medida tomada foi diminuir as chances da travessia de pedestres pela via para um em quinze. Essa alteração fez com que quando inserido faixas de pedestres no circuito, as mesmas não interrompessem o fluxo com uma grande frequência.

Uma das decisões tomadas durante a elaboração do projeto foi à abstração de determinadas vias no mapa criado. Ele não recria com total fidelidade as vias da região do entorno da UNESC. As mesmas foram adaptadas para uma melhor visualização das regras criadas e do funcionamento do protótipo.

Com o protótipo criado constatou-se que os dispositivos móveis permitem que sejam executadas simulações deste tipo, e permitem uma fácil manipulação das

estruturas das vias Basta selecionar determinadas opções e clicar na grade para alterar o circuito e as vias contidas, não sendo necessário selecionar a coluna e linha manualmente na grade. A principal limitação destes dispositivos é a tela, que necessita que as células tenham um tamanho maior permitindo que o usuário clique nas células, isso ocasiona uma redução considerável no tamanho que um circuito poderia.

## 8 CONCLUSÃO

Através desta pesquisa, foi possível perceber a importância dos Autômatos Celulares (AC) e como essa teoria consegue se alinhar às diversas áreas do conhecimento, juntando a área computacional com as ideias de evolução, permitindo que a partir dessa união possam ser criadas simulações de comportamentos similares ao comportamento da vida real.

A teoria dos AC simula comportamentos artificiais e naturais com a auto reprodução de suas células, que com o passar do tempo vão criando estruturas cada vez mais complexas, permitindo ao ser humano prever, antecipar e alterar essas estruturas na vida real, evitando assim problemas maiores.

Para desenvolver o protótipo apresentado neste trabalho foram utilizados os conhecimentos da teoria de AC e também da simulação do fluxo de tráfego de veículo.

Após o desenvolvimento do protótipo, foi verificado que todos os objetivos desta pesquisa foram alcançados, além de constatar que é possível executar este modelo de simulação em dispositivos móveis.

O TRAMSIM é um protótipo que simula o fluxo de trânsito no entorno da Universidade do Extremo Sul de Santa Catarina (UNESC), que na hora de pico tem suas vias de tráfego com muitos congestionamentos devido à alta densidade de veículos e pedestres no local.

O protótipo pode ser utilizado por agentes de trânsito e engenheiros de tráfego, para que estes possam simular alterações na estrutura das vias, como por exemplo a inserção de lombadas, semáforos ou faixas de pedestres antes que estas alterações sejam colocadas em prática.

Para o desenvolvimento do TRAMSIM, foi realizado um estudo aprofundado de ACs, aplicações para dispositivos móveis com foco em *Android*, engenharia de trânsito e fluxo de tráfego de veículos e modelos de AC que simulam este tráfego. Este estudo foi primordial para o desenvolvimento do protótipo, pois cada tema teve sua relevância durante as etapas do desenvolvimento. O

conhecimento de ACs contribuiu no funcionamento do protótipo, definindo a estrutura interna do mesmo. O estudo sobre *Android* e dispositivos móveis permitiu que o protótipo fosse desenvolvido para estes dispositivos. O conhecimento sobre engenharia de fluxo de tráfego de veículos foi essencial para a estruturação do circuito e permitiu que fossem criados os estados e regras do AC. Os modelos de ACs aplicados em simulação de tráfego deram uma visão geral para a criação do AC desenvolvido para o protótipo.

A Universidade em si possui uma bibliografia com uma quantidade mínima de títulos, o que fez com que o levantamento bibliográfico desta área fosse baseado em artigos científicos nacionais e internacionais. O mesmo também ocorreu com o levantamento bibliográfico sobre engenharia de trânsito e fluxo de tráfego.

Uma dificuldade encontrada foi implementar as regras de uma forma que permitissem que o sistema funcionasse de uma forma coesa. Mesmo que a estrutura de um AC em si seja simples, definir regras que funcionem de uma forma eficaz é um grande desafio, pois as variáveis que são lidadas na transição de estados são diferentes de estado para estado. Um exemplo disto é a diferença de controles que devem ser feitos comparando as regras de transição de um estado rotatória para o estado veículo, e as regras de um estado via para o estado veículo. Outra dificuldade encontrada foi aplicar os modelos de TCA encontrados, devido às suas complexidades, e também por não estarem alinhados aos objetivos do projeto. Os TCA levantados na pesquisa abordavam a aceleração e velocidade do veículo e a probabilidade de frenagem, que não foram utilizados, pois o objetivo do protótipo era realizar a simulação focando na alteração dos estados da via. Além disso, o protótipo possui vários estados que não são abordados nestes modelos, como rotatórias, semáforos e faixas de pedestres, entre outros, que eram primordiais para o projeto.

Proponho como trabalhos futuros o desenvolvimento de outras formas de simulação para outras áreas de conhecimento, como criptografia de imagens, simulação de padrões de crimes, evolução de epidemias, ou qualquer outro modelo de simulação que se tenha interesse. Pode-se também dar continuidade a este

protótipo, alterando-o para que seja possível a criação de qualquer circuito, apenas baseando-se nas regras já existentes, além de criar outros estados, como o de ponto de ônibus, por exemplo, que não foram abordados no presente trabalho por não serem objetivos deste estudo.

Além destes trabalhos, outro trabalho proposto seria estudar métodos de análise probabilística, e aplicar um destes métodos no protótipo TRANSIM, pois o método de simulação criado para ele não avalia exceções, ou seja, todas as regras são respeitadas em todas as situações, este método probabilístico teria como objetivo fazer com que alguns veículos não respeitem as regras criadas, como por exemplo, passando por semáforos vermelhos, não reduzir em lombadas, entrar na contramão em determinadas vias, dentre outras situações, isso fará com que a simulação se torne cada vez mais real.

## REFERÊNCIAS

ANDROID. The Android Source Code. Tradução nossa. Disponível em: <<http://source.android.com/source/index.html#governance-philosophy>>. Acesso em: 13 mai. 2015.

Autarquia de Segurança, Trânsito e Transportes de Criciúma. AGENTE DE AUTORIDADE DE TRÂNSITO E TRANSPORTE [Internet]. Criciúma; 2011. [acesso em 2014 mai 12]. Disponível em: <<http://www.astc.sc.gov.br/web/princ.php?pg=conteudo&id=10>>. Acesso em: 14 setembro 2014.

BARLOVIC, R. et al. Meta stable states in cellular automata for traffic flow. **Eur. Phys. J.B.**, v. 5, n. 3, p. 793–800, 1998. Disponível em: <http://link.springer.com/article/10.1007/s100510050504>>. Acesso em: 07 nov. 2014.

BUSINESSWEEK. **Google Buys Android for Its Mobile Arsenal**. 2005. Tradução nossa. Disponível em: <<http://www.businessweek.com/stories/2005-08-16/google-buys-android-for-its-mobile-arsenal>>. Acesso em: 10 mai. 2015.

CARDOSO, Juliana; SALVARO et al. Acidente de Transito com Trauma: Os Desafios da Violência Urbana.. In: Encontro Nacional de Ensino De Ciências da Saúde e de Ambiente, 3., 2012, Niterói. Artigo. Niterói: Campus da Praia Vermelha/uff, 2012. p. 1 - 11. Disponível em: <<http://www.ensinosaudeambiente.com.br/eneciencias/anaisiiieneciencias/trabalhos/T27.pdf>>. Acesso em: 14 setembro 2014.

CASTRO, Marcia Luciana Aguená; CASTRO, Reinaldo de Oliveira. Autômatos celulares: implementações de Von Neumann, Conway e Wolfram. Revista de ciências exatas e tecnologia: Ananguera educacional S.A.. São Paulo, 2008.

Código de Trânsito Brasileiro – CTB – LEI Nº 9.583, DE 23 DE SETEMBRO DE 1997.

EMMERICH, H; RANK, E. An improved cellular automaton model for traffic flow simulation, **Physica A**. v. 234, n. 3-4, p. 676-686, jan. 1997. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037843719600310X>>. Acesso em 17 nov. 2014.

FUKUI, Minoru; ISHIBASHI, Yoshihiro. **Traffic flow in 1D cellular automaton model including cars moving with high speed**, v.65, n.6, p. 1868-1870 1996. Disponível em: < <http://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.65.1868> >. Acesso em: 16 nov. 2014.

GARGENTA, Marko. **Learning Android: Building Applications for Android Market**. Sebastopol: O'reilly, 2011. 268 p.

GOOGLE. **Android: History**. 2014. Tradução nossa. Disponível em: <<http://www.android.com/history/>>. Acesso em: 10 mai. 2015.

GREMONINI, Lucas; VICENTINI, Eduardo. **Autômatos Celulares: Revisão Bibliográfica e Exemplos de Implementações**. UNICENTRO. 2008.

HASHIMI, Sayed Y.; KOMATINENI, Satya. **Pro Android**. Apress. 2009.

HALL, Fred L.. Traffic Stream Characteristics. In: COMMITTEE ON TRAFFIC FLOW THEORY AND CHARACTERISTICS. (Org.). Traffic Flow Theory: A State-of-the-Art Report, 2001. p. 2-1- 2-31.

JENKINS, H. **Cultura da convergência: a colisão entre velhos e novos meios de comunicação**. 2ª Ed. São Paulo. Aleph, 2009.

LIMA, Edgar Barbosa. **Modelos microscópicos para simulação do tráfego**

**baseados em autômatos celulares.** 2007. 129 f. Dissertação (Mestrado em Computação) – Universidade Federal Fluminense, Niterói.

LI, Wentian; PACKARD, Norman. The structure of the elementary cellular automata rule space. **COMPLEX SYSTEMS.** v.4, p 281-297, 1990. Disponível em: <<http://www.complex-systems.com/pdf/04-3-3.pdf> >. Acesso em: 16 nov. 2014.

LOPES, Mauricio Antonio Ribeiro. **Código de trânsito brasileiro anotado.** São Paulo: Revista dos Tribunais, 1998.

MORAIS, Lincoln Luiz de. **CONTRAM:** Middleware voltado a Interoperabilidade entre sistemas de Tráfego Urbano e Redes de Controladores Semafóricos sob os Paradigmas de Sistemas de Transportes Inteligentes. 2001. 130 f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Computação) – UFRGS, Porto Alegre.

MAERIVOET, Sven; MOOR, Bart De. Cellular automata models of road traffic. **Physics Reports.** v. 419, n. 1, p. 1-64, nov. 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157305003315> > . Acesso em: 10 nov. 2014.

NAGEL, Kai; H.J. Herrmann. Deterministic models for traffic jams. **Physica A.** v. 199, n. 2, p. 254-269, 1993. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037843719390006P> >. Acesso em: 16 nov. 2014.

NAGEL, Kai; PACZUSKI, Maya, Emergent traffic jams, **Phys. Rev. E.** v. 51, n. 4, p. 2909–2918, 1995. Disponível em: <<http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.51.2909> >. Acesso em: 10 nov. 2014.

NAGEL, Kai. Particle hopping models and traffic flow theory. **Phys. Rev. E.** v. 53, n. 5, p. 4655-4672, mai. 2008. Disponível em:  
<<http://journals.aps.org/pre/abstract/10.1103/PhysRevE.53.4655> > . Acesso em: 15 nov. 2014.

NICOL, Dirk. **Mobile Strategy: How Your Company Can Win by Embracing Mobile Technologies.** IBM Press. 2013. 273p.

NUNES, Leandro de Castro. **Nature-Inspired Computing Design, Development, and Applications.** IGI Global, 2009.

ROWLES, Daniel. **Mobile Marketing: How Mobile Technology is Revolutionising Marketing, Communications and Advertising.** Kogan Page. 2014. 281p.

SCARPATO, Christine Vieira et al. **Curso de Tecnologia em Segurança no Trânsito.** Criciúma: UNESC, 2013.

SILVA, Paulo Cesar Marques da. **Teoria do Fluxo De Tráfego.** Brasília, jul. 2007.

SILVA, Rosana Correa da. **Teoria de Autômatos Celulares: Análise e suas Aplicações Computacionais.** 2009. 89 f. TCC (Bacharelado em Ciência da Computação) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

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

TAKAYASU, Misako; TAKAYASU, Hideki. 1/f noise in a traffic model. **Fractals** v.1, n.4, p. 860–866, 1993. Disponível em:  
<<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218348X93000885?src=recsys&journalCode=fractals> >. Acesso em: 01 nov. 2014.

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.

WOLFRAM, Stephen. American Physical Society. **Statistical mechanics of cellular automata.** v. 55, n. 3, p. 601-644, jul. 1983. Disponível em:  
<<http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.55.601>>. Acesso em: 17 out. 2014.

**APÊNDICE(S)**

## APÊNDICE A – ARTIGO

# TRANSIM: SIMULAÇÃO DE TRÁFEGO URBANO PARA DISPOSITIVOS MÓVEIS, BASEADO EM AUTÔMATOS CELULARES

Filipe de Betio Pizzolo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ciência da Computação – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC)  
Criciúma – SC – Brasil

Filipe.pizzolo@gmail.com

**Abstract.** *Cellular automata have been used for the simulation of various problems, such as physical behaviors, biological, chemical, or any existing nature, and one of the possible areas of application would be the area of the theory of traffic flow. This paper presents a study on the traffic flow theories and cellular automata, showing a prototype developed for mobile devices which simulates the traffic flow in the area. The idea is that this application prototype may be used by professionals like traffic police and traffic engineers as tool that allows them to view and modify characteristics within the featured map before applying these changes.*

**Resumo.** *Autômatos celulares vêm sendo usado para a simulação de diversos problemas existentes, tais como comportamentos físicos, biológicos, químicos, ou de qualquer natureza, sendo que uma das áreas de aplicação possível seria a área da teoria do fluxo de tráfego. O presente trabalho traz um estudo sobre as teorias de fluxo de tráfego e autômatos celulares, e mostra um protótipo desenvolvido para dispositivos móveis, que simula o fluxo de tráfego nesta região. A ideia é que este protótipo de aplicativo possa ser utilizado por profissionais como os agentes de trânsito e os engenheiros de trânsito, como uma ferramenta que permita aos mesmos visualizarem e alterarem características dentro do mapa levantado antes de aplicarem estas alterações.*

## 1. INTRODUÇÃO

Em 2010 o Brasil registrou, segundo o Ministério da Justiça, 42.844 mortes no trânsito para uma frota de 64.817.974 veículos, perfazendo um total de 661 mortes para cada 1 milhão de veículos. Ficando, assim, atrás dos EUA com 134,2 mortes por milhão de veículo, da Europa com 113,7 mortes por milhão de veículos e do Japão com 64,5 mortes por milhão de veículos (SCARPATO et al, 2013).

E no município de não é diferente, de acordo com Cardoso et al (2012) a cidade de Criciúma é cortada de um extremo a outro por uma longa avenida denominada Avenida Centenário. Esta tem sido palco de inúmeros acidentes de trânsito, atropelamentos, entre outros. Os locais com maior concentração de pessoas e de veículos automotivos são propensos a ter um maior risco de acidentes, como as vias próximas a escolas e universidades.

Diante destes fatos, percebe-se a necessidade de pensar uma nova forma de estruturar o trânsito nestas regiões.

Existe uma base de estudos chamada teoria do fluxo de tráfego que de acordo com Silva (2007), consiste da aplicação de leis da matemática, da teoria da probabilidade e da física à descrição do comportamento do tráfego veicular rodoviário.

Autômatos Celulares de acordo com Gremonini e Vicentini (2008) são modelos matemáticos propostos inicialmente para simular a evolução da vida (Game of life). Por expressar, em sua evolução, comportamentos característicos dos sistemas naturais, os Autômatos Celulares difundiram-se e sua formalização e implementação computacional. Vários sistemas biológicos, físicos e sociais servem de estímulo para as simulações, utilizando as técnicas dos Autômatos Celulares. A evolução de um Autômato Celular mostra semelhança com padrões encontrados na natureza. Os modelos implementados são delimitados por uma malha contendo células de mesmo tamanho e forma e que são identificadas por estados. Os estados evoluem através de regras de interação locais e com evolução temporal discreta.

Tendo em vista a necessidade de simular o fluxo de tráfego para a melhoria do trânsito, esta pesquisa deu origem a um aplicativo capaz de simular o fluxo de tráfego urbano podendo ser utilizado em dispositivos móveis. Este protótipo de aplicativo utiliza como base a teoria de autômato celular, pois, de acordo com as características citadas no parágrafo anterior, o uso de autômatos celulares se tornou uma solução plausível para a simulação de comportamentos característicos dos sistemas naturais.

## **2. JUSTIFICATIVA**

Assim como visto por Tavares (2010), entre os recursos importantes para a vida econômica e social de um país, o Sistema de Transporte possui grande destaque. Este, por sua, vem sofrendo grande impacto, haja vista o efeito da urbanização e o crescente volume no número de veículos. Diante destes fatos, pesquisas devem ser realizadas a fim de minimizar os efeitos dos congestionamentos, entre eles o desenho das vias, número de veículos maior do que a capacidade suportada, reparos e acidentes.

Como objeto de estudo para a elaboração de um simulador de tráfego urbano, resolveu-se utilizar o conceito de autômatos celulares. Autômatos celulares foram originalmente introduzidos por John von Neumann e Stan Ulam como uma possível idealização de sistemas biológicos com um propósito específico de modelagem biológica, auto reprodução conforme define Nunes (2009) apud Wolfram (1994). Esta abordagem tem sido usada desde então para estudar uma grande variedade de outros sistemas naturais complexos, físicos, químicos e biológicos conforme identifica Nunes (2009, tradução nossa).

De acordo com Nunes (2009, tradução nossa), o uso de autômatos celulares em modelagem de vários sistemas, incluindo os biológicos tem vantagens significativas.

Segundo Nunes (2009, tradução nossa), podem-se listar algumas delas:

- a) autômatos celulares são suficientemente simples para permitir a análise matemática detalhada, mas complexos o suficiente para expor uma grande variedade de fenômenos complexos;

- b) autômatos celulares fornecem uma técnica computacionalmente eficiente para analisar as propriedades coletivas de uma rede de células interligadas;
- c) os modelos baseados em autômatos celulares fornecem uma abordagem alternativa envolvendo coordenadas discretas e variáveis para representar o sistema dinâmico complexo;
- d) o modelo de comportamento está completamente especificado por um mecanismo de funcionamento simples em termos de relações locais, que podem ser suficientes para sustentar toda uma hierarquia de estruturas e fenômenos.

Outra importante decisão foi definir para qual plataforma será desenvolvido o aplicativo. A escolha da plataforma Android se deu ao fato de sua portabilidade, seu crescimento e capacidade de computação, como exemplificado conforme Hashimi e Komatineni (2009, tradução nossa). A computação pessoal continua a se tornar mais "pessoal", em que os computadores estão se tornando cada vez mais acessíveis a qualquer hora, em qualquer lugar. Na base deste avanço estão os dispositivos portáteis que vem se transformando em plataformas de computação. Os telefones celulares já não são apenas para conversar, eles têm sido capazes de transportar dados e vídeo. Os dispositivos móveis estão se tornando tão capazes de cálculos e processamentos que podem se tornar o novo computador pessoal. Prevê-se também que um número de fabricantes como ASUS, HP, Dell e estará produzindo netbooks baseados no sistema operacional Android.

Com o desenvolvimento deste protótipo para dispositivos móveis, será possível visualizar a evolução destes dispositivos, e sua capacidade matemática e de processamento. Além disto, outro ponto que de destaque para o desenvolvimento do TRAMSIM para dispositivos móveis, se deve ao fato do mesmo poder ser utilizado pelos agentes de trânsito e engenheiros de tráfego em qualquer lugar onde eles estejam, pois isso garantiria que aos mesmos estarem no ponto de análise para assim, desenvolver a simulação, avaliando o tráfego real junto à simulação.

O protótipo foi desenvolvido para simular o fluxo de tráfego na cidade de Criciúma-SC, e a princípio, o foco é a região próxima a Universidade do Extremo Sul Catarinense UNESC. A ideia surgiu, pois no horário de pico o fluxo de veículos que chegam e saem desta região possui um nível considerado, devido também às instituições de ensino que existem ao redor deste local, como o Centro de Educação Profissional - CEDUP "ABÍLIO PAULO" e a Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina (SATC).

Os agentes de trânsito bem como os engenheiros poderão simular as possíveis consequências do fluxo do trânsito nestas intermediações caso haja alguma alteração nas vias de acesso e saída. Sendo exemplos destas alterações, a inserção de sinalizadas, lombadas eletrônicas, aumento do fluxo de carros, entre outras alterações que possam ocorrer.

### **3. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO**

O TRAMSIM foi desenvolvido utilizando como ambiente o *Java JDK 7 Update 55*, com a IDE *Android Studio 1.1.0*. O modelo do aparelho móvel utilizado como base de testes foi o *Samsung SM-G7102t* com a versão do *Android 4.3*. A máquina onde foi desenvolvido o

protótipo possui, *4Gb RAM, 500 Gb HD*, processador *Intel Core i3-2350M 2.3 Ghz x4* com sistema operacional *Ubuntu 13.10*.

O trabalho desenvolvido tem como objetivo desenvolver um simulador de tráfego urbano baseado em autômatos celulares para dispositivos móveis, criando para isso, um modelo de simulação, que permita que determinadas estruturas das vias possam ser alteradas.

Foi criado um modelo de simulação de fluxo de tráfego de veículos baseado em AC, seguindo os padrões de simulação de veículos:

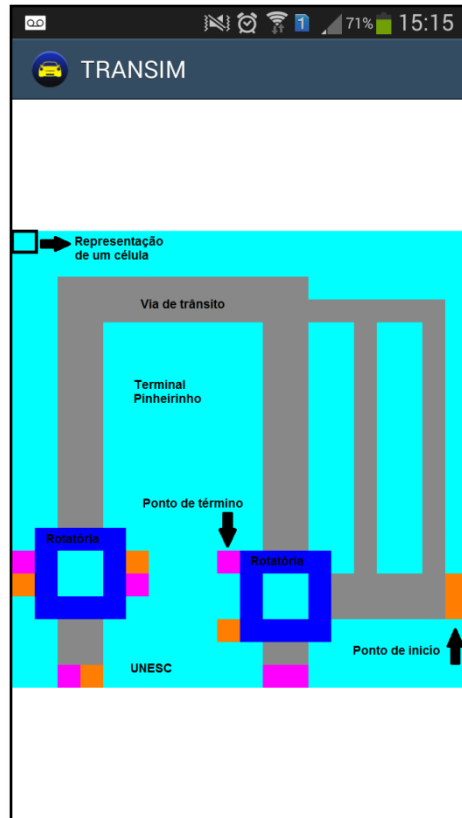
- a) **macroscópica**: o fluxo do tráfego será avaliado como um todo, tendo como preocupação a evolução do tráfego como um todo;
- b) **estocásticas**: pois irá possuir em determinadas ocasiões, a necessidade de regras randômicas, como por exemplo, na decisão por qual direção o veículo deverá seguir;
- c) **dinâmicas**: a maioria das aplicações do TRAMSIM refere-se ao estudo de um sistema ao longo do tempo, caracterizando assim uma simulação dinâmica;
- d) **discretas**: a evolução do autômato é feita pela avaliação dos veículos. Esta avaliação gera um evento que pode alterar os estados da grade, assim, a evolução não será contínua, e sim em etapas;
- e) **células simples**: pois é um modelo mais simples, onde um veículo é representado por uma célula na grade.

Sobre as características do AC, o TRAMSIM baseou-se nas seguintes:

- a) **forma geométrica da célula**: quadrangular;
- b) **dimensão do AC**: bidimensional;
- c) **vizinhança**: Von Neumann;
- d) **tamanho da vizinhança**: raio igual a 1, sendo as células adjacentes a célula central;
- e) **transição de estado**: depende do estado da célula atual, ou seja, a célula que se encontra no centro e dos estados das células vizinhas.

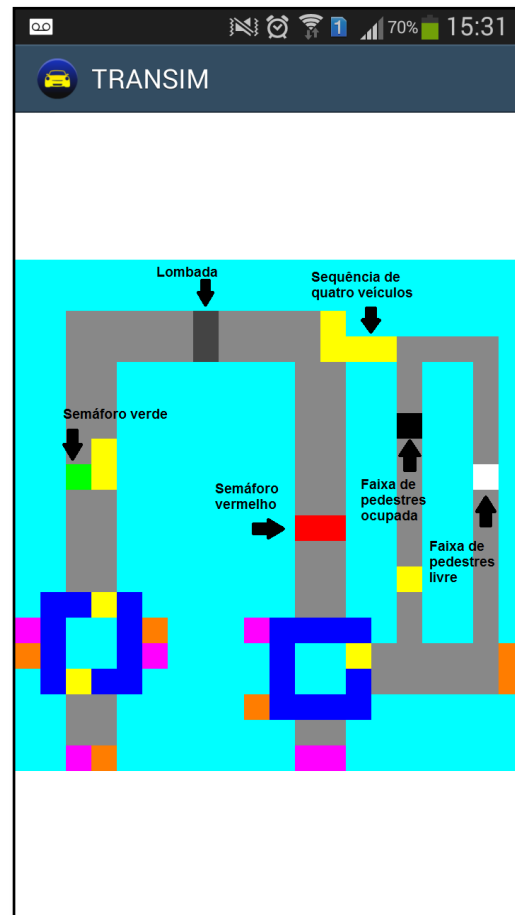
Para demonstrar a evolução do fluxo do tráfego na simulação, foi criado um mapa simples, abordando o entorno da UNESC. Este mapa que representa a grade do AC possui um tamanho de 20 colunas, por 20 linhas. A figura ‘Grade ao iniciar simulação modelo’ representa a configuração inicial do autômato enfatizando o significado de cada célula, além de demonstrar uma representação do que é uma célula dentro da grade, além de demonstrar a disposição das células na grade com os estados iniciais e a figura ‘Grade contendo células com todos os estados’ representa uma demonstração do autômato em execução, podendo assim, serem visualizadas todas as células com todos os estados possíveis. Vemos então que cada item desta matriz de 20 por 20 representa uma célula que, por conseguinte são representados pelos seus respectivos estados.

## Grade ao iniciar simulação modelo



Fonte: Do autor.

Grade contendo células com todos os estados



Fonte: Do autor.

Quase todos os estados criados, possuem internamente configurações que determinam suas características e auxiliam no funcionamento correto da simulação. Essas configurações foram criadas com o intuito de permitir que os estados dos autômatos sejam gerenciados, garantindo que não existam inconsistências durante a simulação. Isso significa que um estado pode ter vários estados internos que será chamado daqui em diante de configurações, um exemplo destas configurações existe no estado rotatória, onde, para a mesma foi criada uma configuração que dá um peso a célula que possui este estado, este peso auxilia nas regras de transição de veículo na rotatórias.

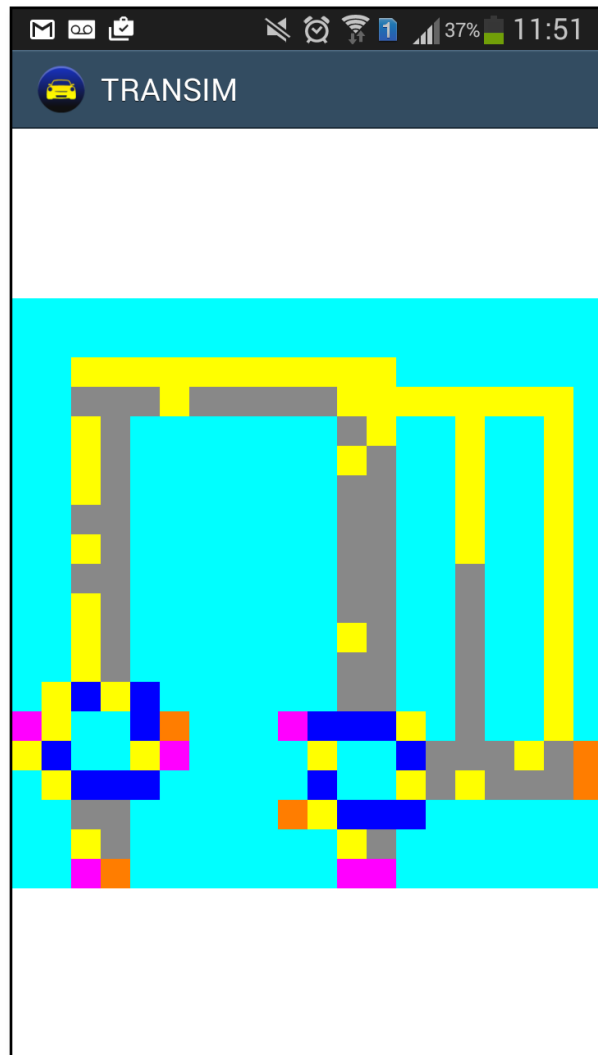
#### 4. RESULTADOS OBTIDOS

Após o desenvolvimento do protótipo TRAMSIM verificou-se que a simulação utilizando AC é um método eficaz de simulação de fluxo de tráfego.

Durante a execução pôde-se constatar que quando se tem até sessenta veículos a simulação ocorre com êxito, simulando corretamente os circuitos definidos pelos veículos, quando a densidade de veículos alcança um valor acima de sessenta pode-se perceber que em determinados trechos do circuito ocorre um engarrafamento como mostrado na figura ‘Engarrafamento iniciado nas vias mais à direita’. Isto se deve a dois motivos:

- a) a decisão de qual via deve ser tomada pelo veículo é realizada de forma aleatória, isso significa que o veículo não irá selecionar a via com menor tráfego para seguir, assim, permitindo que determinados trechos do circuito sofram de engarrafamento;
- b) outro fator que agrava a situação de engarrafamentos é o fato de que a simulação ocorre analisando primeiramente as células dispostas no início da matriz, para depois analisar as células que estão nas últimas posições da matriz. Com isso as mesmas células são executadas antes das outras, fazendo com que as células no fim da matriz não se movimentem, devido ao fato de que a execução das células iniciais pode trancar a passagem das outras células.

Engarrafamento iniciado nas vias mais à direita



Fonte: Do autor.

Um ponto de destaque do TRANSIM é o fato de que este permite alterações nas vias. Estas alterações servem para demonstrar como o circuito funcionaria caso o mesmo fosse alterado realmente. Um exemplo seria o caso de colocar uma lombada em trechos de maior velocidade, isso permite que os agentes de trânsito visualizem o funcionamento das vias com estas alterações. O protótipo atualmente permite que os usuários insiram lombadas, faixas de pedestres e semáforos.

Com o protótipo desenvolvido, é possível visualizar que caso sejam seguidas as regras e a alocação dos estados corretamente, poder-se-ia recriar todo o circuito, com inícios e fim de tráfegos, rotatórias e vias completamente modificadas. As regras aplicadas não são específicas

para o circuito criado. Isto é uma característica da teoria dos AC, onde dependendo dos estados das células e as regras de transição o sistema irá se desenvolver e a simulação irá fluir.

Durante a elaboração dos estados e regras do autômato, foi constatada uma grande dificuldade na definição dos mesmos, pois quando se definia modelos de estados sem nenhuma configuração adicional a simulação não funcionava corretamente, algumas células que recebiam o veículo não deveriam recebê-lo naquele momento, pois criaria uma colisão com outro veículo visto que esta célula seria de circulação inversa. Assim, foram criadas dezenas de estados adicionais para determinados estados, que foram chamados de configurações de estados, para que houvesse uma diferenciação entre os mesmo, estas configurações podem ser vistas como estados das células. Com esta alteração, foi possível criar regras de transições que representassem de uma forma aceitável a movimentação de veículos nas vias.

Outra constatação é o fato do protótipo possuir situações que necessitam de decisões aleatórias. Essas decisões aleatórias, em determinadas ocasiões, não representam uma movimentação lógica de um veículo. Como prova disso temos a rotatória, onde com as regras criadas pode-se observar que é possível que um veículo fique preso na rotária girando em círculos por algum tempo antes de sair. Mesmo ele encontrando uma célula que permite a saída da rotatória, a próxima célula representando uma rotatória, de acordo com as regras criadas, também é válida, assim, ficando a cargo da aleatoriedade decidir qual caminho o veículo deverá tomar. Esta não é uma situação onde a movimentação do veículo não é permitida, mas é uma situação atípica, pois veículos não ficam circulando em rotatórias.

Além deste, existe mais um caso onde podemos analisar o movimento aleatório do veículo, seria na situação de existir pedestres atravessando a via ou não. Foi constatado que uma função de aleatoriedade com uma chance de estar passando pedestres de dois para um seria muito alta, pois isso iria interromper o fluxo de veículos, além de não condizer com a realidade. Para amenizar este problema, a medida tomada foi diminuir as chances da travessia de pedestres pela via para um em quinze. Essa alteração fez com que quando inserido faixas de pedestres no circuito, as mesmas não interrompessem o fluxo com uma grande frequência.

Uma das decisões tomadas durante a elaboração do projeto foi à abstração de determinadas vias no mapa criado. Ele não recria com total fidelidade as vias da região do entorno da UNESC. As mesmas foram adaptadas para uma melhor visualização das regras criadas e do funcionamento do protótipo.

Com o protótipo criado constatou-se que os dispositivos móveis permitem que sejam executadas simulações deste tipo, e permitem uma fácil manipulação das estruturas das vias. Basta selecionar determinadas opções e clicar na grade para alterar o circuito e as vias contidas, não sendo necessário selecionar a coluna e linha manualmente na grade. A principal limitação destes dispositivos é a tela, que necessita que as células tenham um tamanho maior permitindo que o usuário clique nas células, isso ocasiona uma redução considerável no tamanho que um circuito poderia.

## **5. CONCLUSÃO**

Através desta pesquisa, foi possível perceber a importância dos Autômatos Celulares (AC) e como essa teoria consegue se alinhar às diversas áreas do conhecimento, juntando a área

computacional com as ideias de evolução, permitindo que a partir dessa união possam ser criadas simulações de comportamentos similares ao comportamento da vida real.

A teoria dos AC simula comportamentos artificiais e naturais com a auto reprodução de suas células, que com o passar do tempo vão criando estruturas cada vez mais complexas, permitindo ao ser humano prever, antecipar e alterar essas estruturas na vida real, evitando assim problemas maiores.

Para desenvolver o protótipo apresentado neste trabalho foram utilizados os conhecimentos da teoria de AC e também da simulação do fluxo de tráfego de veículo.

Após o desenvolvimento do protótipo, foi verificado que todos os objetivos desta pesquisa foram alcançados, além de constatar que é possível executar este modelo de simulação em dispositivos móveis.

O TRAMSIM é um protótipo que simula o fluxo de trânsito no entorno da Universidade do Extremo Sul de Santa Catarina (UNESC), que na hora de pico tem suas vias de tráfego com muitos congestionamentos devido à alta densidade de veículos e pedestres no local.

O protótipo pode ser utilizado por agentes de trânsitos e engenheiros de tráfego, para que estes possam simular alterações na estrutura das vias, como por exemplo a inserção de lombadas, semáforos ou faixas de pedestres antes que estas alterações sejam colocadas em prática.

Para o desenvolvimento do TRAMSIM, foi realizado um estudo aprofundado de ACs, aplicações para dispositivos móveis com foco em Android, engenharia de trânsito e fluxo de tráfego de veículos e modelos de AC que simulam este tráfego. Este estudo foi primordial para o desenvolvimento do protótipo, pois cada tema teve sua relevância durante as etapas do desenvolvimento. O conhecimento de ACs contribuiu no funcionamento do protótipo, definindo a estrutura interna do mesmo. O estudo sobre Android e dispositivos móveis permitiu que o protótipo fosse desenvolvido para estes dispositivos. O conhecimento sobre engenharia de fluxo de tráfego de veículos foi essencial para a estruturação do circuito e permitiu que fossem criados os estados e regras do AC. Os modelos de ACs aplicados em simulação de tráfego deram uma visão geral para a criação do AC desenvolvido para o protótipo.

A Universidade em si possui uma bibliografia com uma quantidade mínima de títulos, o que fez com que o levantamento bibliográfico desta área fosse baseado em artigos científicos nacionais e internacionais. O mesmo também ocorreu com o levantamento bibliográfico sobre engenharia de trânsito e fluxo de tráfego.

Uma dificuldade encontrada foi implementar as regras de uma forma que permitissem que o sistema funcionasse de uma forma coesa. Mesmo que a estrutura de um AC em si seja simples, definir regras que funcionem de uma forma eficaz é um grande desafio, pois as variáveis que são lidadas na transição de estados são diferentes de estado para estado. Um exemplo disto é a diferença de controles que devem ser feitos comparando as regras de transição de um estado rotatória para o estado veículo, e as regras de um estado via para o estado veículo. Outra dificuldade encontrada foi aplicar os modelos de TCA encontrados, devido às suas complexidades, e também por não estarem alinhados aos objetivos do projeto.

Os TCA levantados na pesquisa abordavam a aceleração e velocidade do veículo e a probabilidade de frenagem, que não foram utilizados, pois o objetivo do protótipo era realizar a simulação focando na alteração dos estados da via. Além disso, o protótipo possui vários estados que não são abordados nestes modelos, como rotatórias, semáforos e faixas de pedestres, entre outros, que eram primordiais para o projeto.

## REFERÊNCIAS

CARDOSO, Juliana; SALVARO et al. Acidente de Transito com Trauma: Os Desafios da Violência Urbana.. In: Encontro Nacional de Ensino De Ciências da Saúde e de Ambiente, 3., 2012, Niterói. Artigo. Niterói: Campus da Praia Vermelha/uff, 2012. p. 1 - 11. Disponível em: <<http://www.ensinosaudeambiente.com.br/eneciencias/anaisiiieneciencias/trabalhos/T27.pdf>> . Acesso em: 14 setembro 2014.

GREMONINI, Lucas; VICENTINI, Eduardo. **Autômatos Celulares: Revisão Bibliográfica e Exemplos de Implementações**. UNICENTRO. 2008.

HASHIMI, Sayed Y.; KOMATINENI, Satya. **Pro Android**. Apress. 2009.

NUNES, Leandro de Castro. **Nature-Inspired Computing Design, Development, and Applications**. IGI Global, 2009.

SCARPATO, Christine Vieira et al. **Curso de Tecnologia em Segurança no Trânsito**. Criciúma: UNESC, 2013.

SILVA, Paulo Cesar Marques da. **Teoria do Fluxo De Tráfego**. Brasília, jul. 2007.

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.

WOLFRAM, Stephen. American Physical Society. **Statistical mechanics of cellular automata**. v. 55, n. 3, p. 601-644, jul. 1983. Disponível em: <<http://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.55.601>>. Acesso em: 17 out. 2014.

**ANEXO(S)**