

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ – CAMPUS CURITIBA
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETRÔNICA – DAELN
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM TELEINFORMÁTICA E REDES DE
COMPUTADORES

**Sistemas Inteligentes de Transporte Aplicados ao Controle
de Tráfego**

CURITIBA
2013

BRUNO JOSE DE SOUZA

Sistemas Inteligentes de Transporte Aplicados ao Controle de Tráfego

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Teleinformática e Redes de Computadores da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR.

Orientador: Prof. Dr. Walter Godoy Jr.

CURITIBA
2013



TERMO DE APROVAÇÃO

Sistemas Inteligentes de Transporte Aplicados ao Controle de Tráfego

por

Bruno Jose de Souza

Esta monografia foi apresentada às 18:00h do dia 26 de SETEMBRO de 2013 como requisito parcial para a obtenção do título de ESPECIALISTA EM TELEINFORMÁTICA E REDES DE COMPUTADORES, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi argüido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado com a nota DEZ INTEIROS (10,0)

Prof. Dr. Walter Godoy Junior
(UTFPR)

Prof. Dr. Kleber Kendy Horikawa Nabas
(UTFPR)

Visto da Coordenação

Prof. Dr. Walter Godoy Júnior
Coordenador do Curso

Dedicado ao meu avô, Agenor Garbosa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pois é o único infalível. Agradeço a Ele por estar presente durante as horas dedicadas nesse trabalho.

A Raquel, minha noiva. Obrigado pelo apoio e compreensão. Essa monografia foi concluída devido a sua motivação, energia e incentivo.

Ao Professor Dr. Waler Godoy Junior pela excelente orientação na monografia, principalmente na reta final.

RESUMO

SOUZA, Bruno J. **Sistemas Inteligentes de Transporte Aplicados ao Controle de Tráfego**. 2013. 69 f. Monografia de Especialização – XXII Curso de Especialização em Redes de Computadores e Teleinformática, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

Considerando as fragilidades tocantes ao gerenciamento de tráfego apresentadas nas grandes cidades, está sendo proposto um Sistema Inteligente de Transporte capaz de reduzir o índice de congestionamento. Foi estudado um modelo de infraestrutura baseado em uma rede mesh, onde existem dispositivos de rádio frequência e veículos interagindo. São discutidos também os métodos utilizados para realizar a comunicação entre dispositivos, utilizando-se de mecanismos como o Zigbee e outros exclusivos para a aplicação em transportes (VANET e WAVE), apresentando uma solução que inclui sistemas avançados de gerenciamento (ATMS), mecanismos de comunicação (ATIS) e artefatos de cobrança (ERP) que auxiliam no controle de tráfego. Como resultado da pesquisa realizada, foi elaborado um estudo de caso para a cidade de Curitiba onde o congestionamento é reduzido através do escalonamento de semáforos e de vias bem como pela cobrança baseada em deslocamento.

Palavras chaves: SIT; Sistemas Inteligentes de Transporte; WAVE; VANET; ATIS; ERP; RFID; algoritmo genético; mobilidade; mesh; WiMAX; Redução de Congestionamento;

LISTA DE SIGLAS

SIT	Sistema Inteligente de Transporte
LOS	Line of Sight
NLOS	Non Line of Sight
AES	Advanced Encryption Standard
OFDM	Orthogonal frequency-division multiplexing
VOIP	Voice over IP
MMDS	Multichannel Multipoint Distribution Service
WMN	Wireless mesh network
BSM	Business service management
V2V	Vehicle to Vehicle
V2I	Vehicle to Infrastructure
VANET	Vehicular ad hoc network
MANET	Mobile ad hoc network
GEO	Geo estacionario
RSU	Roadside unit
OBU	On Board Unit
BFS	Breadth-first search
DTA	Dynamic Traffic Assignment
AG	Algoritmo Genético
ACO	Ant Colony Optimization
ERP	Electronic Road Pricing

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	MÉTODOS DE INTERCOMUNICAÇÃO E INFRAESTRUTURA	14
2.1	Redes WiMAX.....	14
2.2	Redes mesh.....	17
2.2.1	Arquitetura da rede	17
2.2.2	Características da rede	19
2.3	Zigbee.....	21
2.4	Dispositivos RFID.....	21
2.4.1	RTLS	23
2.4.2	Dados de operação do RFID.....	23
2.5	Dedicated Short-Range communication – DSRC	25
2.6	Acesso Sem Fio em Ambientes Veiculares.....	27
2.7	Rede Veicular Ad-hoc	28
2.8	Sistemas de Posicionamento Global - GPS.....	31
3	ALGORITMOS.....	33
3.1	Algoritmo de Bellman-Ford	33
3.2	Algoritmo Genético.....	36
3.3	Algoritmo de Otimização da Colônia de Formigas.....	38
3.4	Sistemas Multiagentes.....	40
4	CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO.....	41
4.1	Otimização de Semáforos.....	41
4.2	Utilização de vias coletoras e locais.....	43
5	MÉTODOS DE TARIFICAÇÃO	44
5.1	Tarificação por deslocamento	44
5.2	Tarificação por pedágios urbanos	45
6	SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO (ATIS).....	46

7	SEGURANÇA E PRIVACIDADE	48
8	DESENVOLVIMENTO	51
8.1	Contexto da cidade	51
8.2	Infraestrutura	52
8.3	Inteligência	53
8.4	Componentes	54
8.5	Métodos Práticos Para Redução de Congestionamento	55
8.5.1	Escalonamento de semáforos.....	55
8.5.2	Utilização de pedágios urbanos	58
8.5.3	Desvio para vias coletoras e locais	59
8.6	Custos	61
8.7	Riscos	62
8.8	Resultados	63
9	PESQUISAS FUTURAS	64
10	CONCLUSÃO	65
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Rede mesh sem fio. As linhas pontilhadas representam conexões sem fio.....	18
Figura 2- Rede mesh com backhaul eficiente e veículos com dispositivos mesh móveis.	20
Figura 3 - Exemplo de sistema RFID.....	22
Figura 4 - Exemplo de tags passivas (a esquerda) e ativas (lado direito).	22
Figura 5- Espectro do protocolo DSRC.	26
Figura 6- Protocolos de Roteamento VANET.	30
Figura 7- GPS.....	31
Figura 8 – Representação de um grafo análogo à uma infraestrutura viária.....	34
Figura 9- Exemplo de algoritmo.	35
Figura 10- Exemplo de ACO.	40
Figura 11- Exemplos de painéis utilizados em um ATIS.	46
Figura 12- Condição do Tráfego no Centro de Curitiba	57
Figura 13 - Principais vias congestionadas e caminhos alternativos	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Dados característicos da rede WiMAX no Brasil.	16
Tabela 2- RFID Sumário.....	24
Tabela 3- Características das DSRCs em 5Ghz.....	25
Tabela 4- GPS Comparativo.	32
Tabela 6- Custos do Projeto.	62
Tabela 5- Categoria e relacionamento de ameaças à segurança.	48

1 INTRODUÇÃO

Segundo as diretivas publicadas no jornal oficial do parlamento da (UNIÃO EUROPEIA, 2010), Sistemas Inteligentes de Transporte (SITs) são aplicações avançadas que providenciam serviços inovadores referentes a diferentes modos de controle de tráfego. Ainda segundo essas diretivas, um SIT integra telecomunicações, eletrônica e tecnologias da informação com engenharia de tráfego com o objetivo de planejar, projetar, operar, manter e gerenciar sistemas de transporte que resultam em maior conforto para o usuário e melhor desempenho para as entidades que administram as vias de transporte.

As aplicações desse tipo de sistema podem abranger diferentes áreas cada qual com sua utilidade na engenharia de tráfego. As principais disciplinas de conhecimento dos Sistemas Inteligentes de Transporte que este trabalho irá abordar são:

- *Advanced Traffic Management Systems (ATMS)* – informações do Instituto de Pesquisa em Transporte da Universidade de Michigan¹ revelam que os ATMS buscam reduzir - ou ao menos conter - congestionamentos em ambientes urbanos, melhorando a eficiência da utilização de estruturas existentes. Estes sistemas buscam soluções através do reconhecimento de padrões ou através da resposta a incidentes não previsíveis. Usualmente utilizam informação gerada por sensores distribuídos ao longo de uma via ou ainda mensagens recebidas de dispositivos conectados à rede (BOOZ ALLEN & HAMILTON, 1998).
- *Advanced Traveler Information Systems (ATIS)* – destinados a suprir a necessidade de usuários receberem informações que auxiliem na decisão de rotas de maneira ágil para

¹ <http://www.umtri.umich.edu/expertiseSub.php?esID=119>

que atinjam seus destinos de maneira rápida e segura (BOOZ ALLEN & HAMILTON, 1998).

- *Electronic Road Pricing System* (ERPS) – utilizados no gerenciamento de congestionamentos baseando-se no princípio de *pay-as-you-use* (pague conforme o uso) onde motoristas são tarifados conforme as vias e os horários de utilização de um veículo. Um ERPS pode variar conforme as condições de tráfego, incentivando motoristas a mudar seus hábitos de transporte (LTA, 2013).

Diversas iniciativas referentes ao estabelecimento ou aprimoramento de SITs já estão sendo estudadas e implantadas ao redor do mundo. Em países como Cingapura, Japão, Estados Unidos e na União Europeia já existem conselhos governamentais exclusivos para o tema. Todavia no Brasil os estudos e a implantação de SITs estão em ritmo muito lento apesar da notável necessidade melhores resultados no gerenciamento de tráfego em grandes centros urbanos. As iniciativas adotadas até o momento estão relacionadas principalmente ao urbanismo, incluindo como exemplo a construção de novas estradas, a implantação de binários, a construção de pontes, implantação de rodízio de veículos, vias exclusivas para ônibus e sinalizações pouco eficazes. Ainda no Brasil, são poucas as pesquisas direcionadas ao uso da telemática na engenharia de tráfego, resultando numa razoável desvantagem tecnológica frente aos outros países.

Estatísticas do DENATRAN mostram que o número de automóveis das metrópoles brasileiras cresceu, em média, 77,8% entre 2001 e 2011, sendo adicionados cerca de 890 mil veículos ao ano. Como exemplo, em Curitiba a frota cresceu 91,7% em dez anos, terminando o ano de 2011 com mais de 1,5 milhão de veículos. Em fato correlacionado, a mesma fonte indica que aumentaram também os acidentes e o tempo que veículos permanecem em congestionamentos (RODRIGUES, 2012)

O Conselho Permanente de Transporte e Infraestrutura australiano (SCOTI, 2012) cita que os custos com acidentes chegam a AU\$ 27 bilhões (R\$ 55 bilhões²) anualmente e os custos com congestionamento irão ultrapassar AU\$ 20 bilhões (R\$ 40 bilhões) em 2020.

Dados do Sistema de Informação sobre Mortalidade (SIM, 2013) indicam que no Brasil entre 2001 e 2011 o número de mortes em acidentes de trânsito com motos aumentou 263,5% e o número de acidentes de trânsito em geral, que envolve carros, caminhões, ônibus e pedestres teve alta de 39%. Também referente a estes empecilhos, segundo a Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, em junho de 2012 a cidade registrou a maior lentidão de sua história, chegando a 295 km de congestionamento (CET-SP, 2012).

Dependendo da complexidade da malha viária, pode-se combinar uma ou várias tecnologias dentro do escopo dos SITs dentre as quais estão sistemas de escalonamento de semáforos, sistemas de mensagens, priorização para veículos públicos e métodos de tarifação, utilizando-se de infraestruturas complexas, como as redes WiMAX (IEEE 802.16d ou 802.16e), ou financeiramente menos agressivas como redes mesh (IEEE 802.11s - em breve³) ou ainda a tecnologia de RFID.

² Baseado na cotação média do dólar em maio de 2013.

³ O IEEE definirá o padrão 802.11s apenas quando todos os protocolos deste padrão estiverem definidos: http://www.ieee802.org/11/Reports/tgs_update.htm

2 MÉTODOS DE INTERCOMUNICAÇÃO E INFRAESTRUTURA

Para que um SIT funcione, é necessário que se cumpram alguns requisitos para operacionalizar a rede de dispositivos que compõem o sistema. Pesquisas recentes demonstram que o conceito de SITs está sendo repensado, evidenciando que sistemas de alto nível que permitem interações entre veículos, infraestrutura viária, motoristas e controladores de tráfego estão próximos da realidade. Nessa nova geração de SITs, telecomunicações estão sendo consideradas meras portadoras de informação fiável (DRILO et al, 2009).

2.1 Redes WiMAX

WiMAX é uma solução sem fio de banda larga que oferece um rico conjunto de recursos com muita flexibilidade em termos de entrega e oferta de serviços (ANDREWS; GHOSH; MUHAMED, 2008). Segundo os autores, os seguintes recursos do WiMAX devem ser destacados:

- Camada física baseada em OFDM que oferece boa resistência em múltiplos caminhos e permite o WiMAX operar em condições de NLOS⁴.
- Capacidade para suportar altíssimas taxas de pico de dados, ultrapassando 74mbps quando opera usando um espectro de 20MHz².
- Banda e taxa de dados escalável, permitindo adaptação conforme a disponibilidade do canal. Essa escalabilidade pode ser feita dinamicamente para

⁴ Near-Line-of-Sight (NLOS) ou Sem-Linha-de-Visada é uma transmissão de rádio que está ligeiramente obstruída, comumente por um objeto físico como árvores e prédios, na zona de Fresnel (área em que um sinal ocupa após deixar a antena).

suportar roaming entre diferentes redes que venham a possuir diferentes alocações de banda.

- Codificação e modulação adaptativa que permite o esquema de rede ser mudado numa base por usuário e por frame baseando-se nas condições do canal. Excelente para maximizar a taxa de transferência em um canal variando com o tempo.
- Suporte a requisições automáticas de retransmissão na camada de link.
- Os padrões IEEE 802.16e-2004 e 802.16e-2005 do WiMAX são capazes de trabalhar tanto em TDD quanto em FDD, permitindo razoável adaptabilidade quanto à complexidade e custos.
- Uso de múltiplas técnicas de antena como beamforming, codificação space-time e multiplexação espacial.
- Devido a arquitetura orientada à conexão em sua camada MAC, é possível trabalhar com uma variedade de aplicações, incluindo serviços de voz e multimídia.
- WiMAX suporta criptografia robusta que usa o padrão AES, oferecendo também privacidade e protocolos de gerenciamento de chaves.
- A variante móvel do WiMAX possui mecanismos para suportar aplicações que devem ser tolerantes ao delay, como o VoIP. Este sistema também possui embutido um mecanismo de economia de energia que prolonga a vida útil da bateria de dispositivos dependentes.
- WiMAX possui uma arquitetura baseada em IP, permitindo convergência com outras redes, explorando o rico eco sistema de soluções que também utilizam esse protocolo.

Considerando esses fatores há conforto razoável sobre o funcionamento do WiMAX para sistemas complexos que envolvem a dependência de diversos usuários enviando e recebendo dados em tempo real. Além disso, o WiMAX aproveita as construções de uma cidade, para refletir a onda até o seu destino através do OFDM (TELECO, 2013).

Uma infraestrutura repleta de antenas WiMAX pode oferecer uma excelente cobertura de sinal, conforme a tabela 1.

Faixa de Frequência	Características
2,5 GHz	Frequência licenciada. Hoje em poder das empresas de MMDS.
	Alcance com Linha de Visada (LOS) = 18 – 20 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 9 – 10 km
3,5 GHz	Frequência licenciada. Esta é a frequência disponível para WiMAX no Brasil, utilizada pelas operadoras e prestadoras de serviço de telecomunicações.
	Alcance com Linha de Visada (LOS) = 12 – 14 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 6 – 7 km
5,8 GHz	Frequência não-licenciada. Esta é a frequência livre e disponível para WiMAX no Brasil, podendo ser utilizada por qualquer empresa prestadora de serviços. Por ser não licenciada, existe a possibilidade de interferências e congestionamento de frequências em áreas de grande densidade. É importante, pois não exige gastos com a aquisição de licenças, o que pode viabilizar o plano de negócio para um Sistema Inteligente de Transporte.
	Alcance com Linha de Visada (LOS) = 7 – 8 km Alcance sem Linha de Visada (NLOS) = 3 – 4 km
10,5 GHz	Frequência licenciada. Não existem ainda equipamentos de WiMAX para cobertura desta Frequência. O principal motivo é a necessidade de micro células, pois o poder de cobertura em grandes distâncias nesta frequência é baixo. Futuramente poderá se tornar uma alternativa, quando houver um esgotamento de banda em frequências mais baixas e uma proliferação do conceito de WiMAX.

Tabela 1- Dados característicos da rede WiMAX no Brasil.

Fonte: TELECO, 2013 (adaptado)

2.2 Redes mesh

Segundo o estudo publicado no 25º simpósio brasileiro de redes de computadores e sistemas distribuídos, uma rede mesh sem fio (WMN, siga em inglês para “Wireless Mesh Network”) pode ser uma variante tanto do padrão IEEE 802.11 como também do IEEE 802.16. Diferencia-se das redes Wi-Fi comuns por permitir que recursos sejam compartilhados através de vários nós que se comportam como uma única rede de topologia dinâmica e variável, possuindo malha sem fio autoconfigurável de crescimento orgânico.

Ainda considerando o estudo realizado, as redes mesh estão sendo cogitadas como uma alternativa de infraestrutura de baixo custo para a construção de redes de acesso comunitárias e de cidades digitais (ABELÉM et al, 2007).

Redes mesh podem ainda aprender e manter configurações de roteamento de forma dinâmica. Dispositivos sem fio em uma rede mesh trafegam dados entre si em um espectro livre de licença que engloba 2.4 ou 5 GHz, com velocidades de até 54mps (INTEL, 2004).

2.2.1 Arquitetura da rede

As WMNs consistem de dois tipos de nodes: os roteadores mesh e clientes mesh. Os roteadores são construídos com a mesma plataforma dos tradicionais, sendo ajustados para prover a mesma cobertura com menos energia necessária para transmissão através da comunicação multi-hop. Os clientes podem atuar também como roteadores (excluindo-se as funções de gateway e bridge) tendo em vista que são construídos para atender aos requisitos da rede mesh. Entre os clientes mesh podem estar dispositivos portáteis (smartphones, tablets, telefone, etc.) ou ainda dispositivos de RFID (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).

A figura 1 representa uma rede mesh onde os roteadores com gateway se conectam à internet e a diversos outros roteadores na rede. Adicionalmente percebe-se que a rede mesh pode ter interface com uma estrutura pertencente aos padrões IEEE 802.11, 802.16 bem como dispositivos RFID.

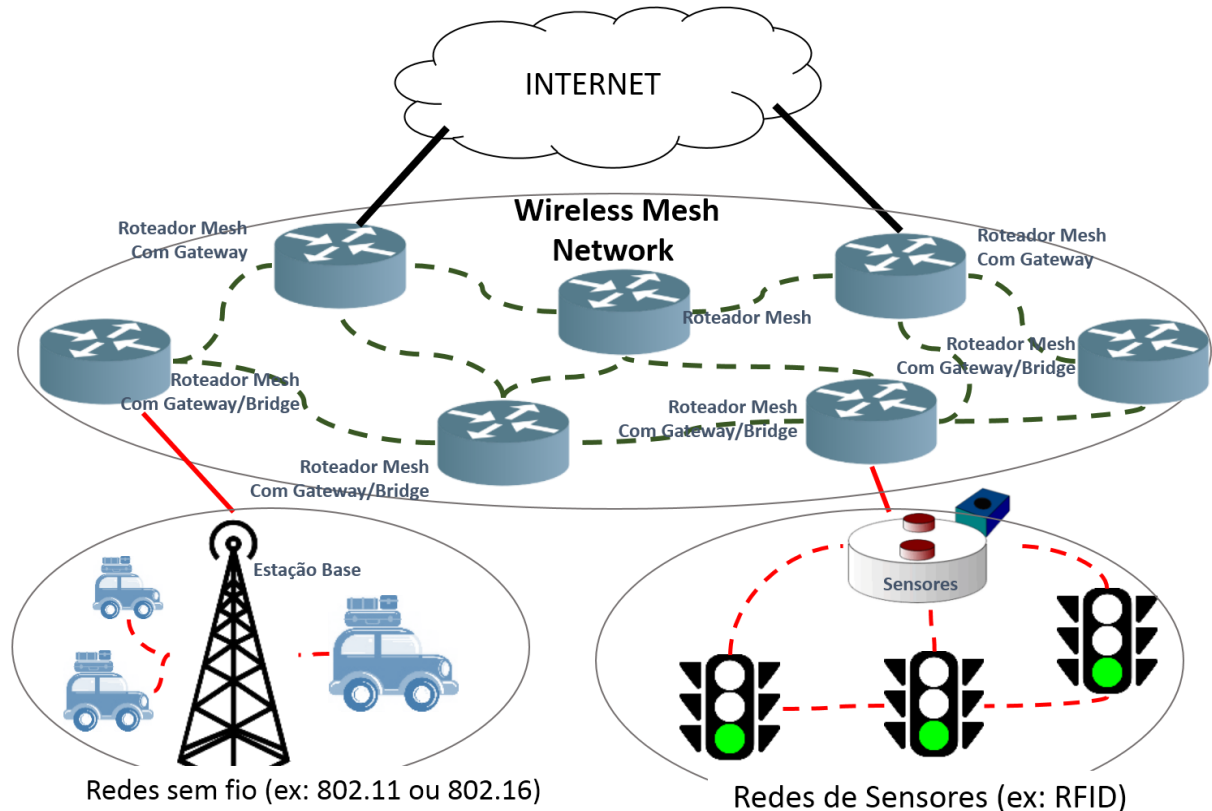


Figura 1- Rede mesh sem fio. As linhas pontilhadas representam conexões sem fio.

Fonte: ABELÉM et al, 2007 (Adaptado)

Diversas outras topologias podem ser adotadas, mas a representada na Figura 1 é a mais adequada para elucidar um SIT. Para aprimorar a eficácia da rede representada pela Figura 1, sugere-se o uso de antenas para aumentar a densidade do espectro⁵ tanto nas redes Wi-Fi (802.11) quanto na WiMAX (802.16) (INTEL, 2004).

⁵ Isto é, o número de bits que podem ser transmitidos em um determinado canal em um determinado momento.

2.2.2 Características da rede

Dentre as principais características de uma rede mesh está a capacidade de estender a área de cobertura sem sacrificar a capacidade do canal. Essa característica é encontrada em redes multi-hop que oferece também conectividade em NLOS para usuários que não dispõem de LOS. Para atender a estes requisitos a rede deve ser indispensavelmente multi-hop (KRISHNAMURTHY; CONNER; YARVIS; CHHABRA; ELLISON; BRABENAC; TSUI; 2002).

Devido a sua flexibilidade, a rede pode ser facilmente aprimorada em termos de desempenho. Além disso, WMNs podem ser facilmente implantadas e configuradas com tolerância a falhas e também por isso é que essas redes podem crescer gradualmente, apresentando alta relação custo-benefício. (AKYILDIZ; WANG; WANG, 2005).

Segundo os mesmos autores, redes mesh são compatíveis e podem operar com outras redes existentes. Como exemplo, uma rede baseada no IEEE 802.11 pode operar com uma rede WiMAX, ZigBee e redes de celular.

Considerando esses fatores, é evidente que a rede mesh pode ser aplicada em diversos tipos de cenários, incluindo redes domésticas, empresariais, metropolitanas nas mais diversas funções: sistemas de vigilância, de repositório de arquivos, de sistemas médicos, etc. No caso de um SIT, duas técnicas são necessárias: uma backhaul eficiente e de alta velocidade dos veículos para a internet e redes mesh móveis dentro do veículo como visto na figura 2 (AKYILDIZ et al, 2005).

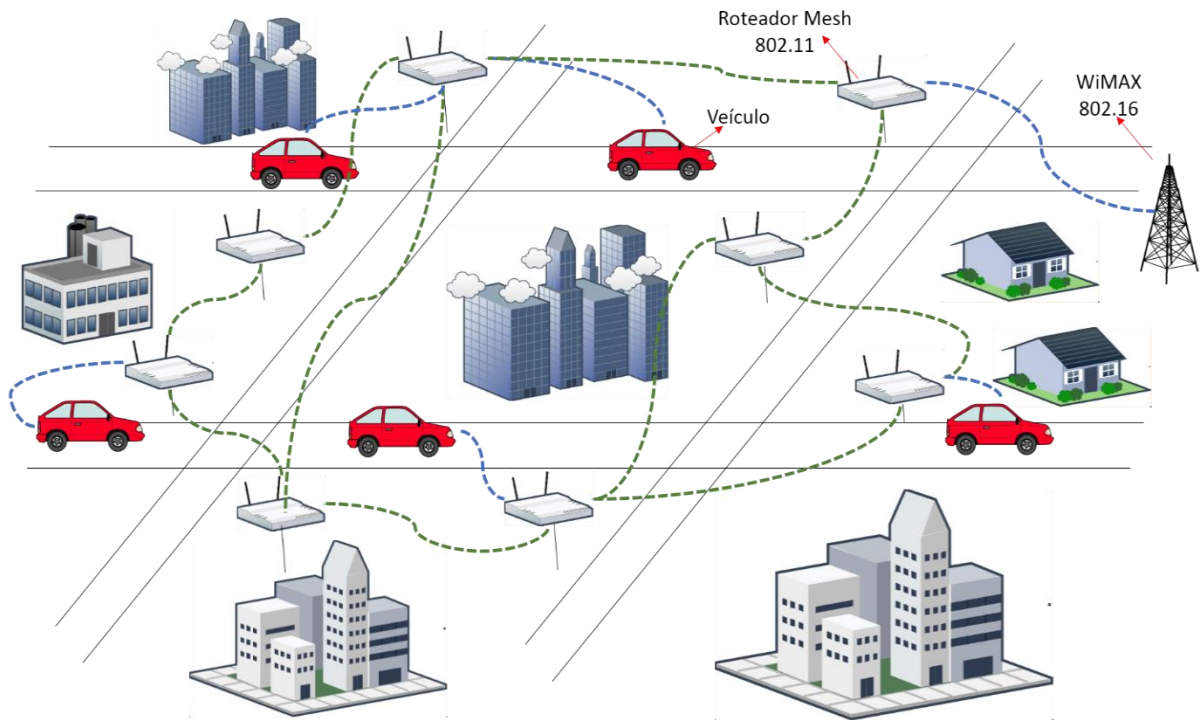


Figura 2- Rede mesh com backhaul eficiente e veículos com dispositivos mesh móveis.

Fonte: AKYILDIZ et al, 2005(adaptado)

Através da análise das redes mesh e considerando sua arquitetura e características de adaptação e dinamismo, percebe-se que tais redes podem proliferar o acesso sem fio obrigando arquiteturas ainda mais robustas como o WiMAX a evoluir para oferecer uma arquitetura acessível do ponto de vista econômico com soluções de backhaul e última milha ainda mais eficientes. Além disso, considerando as possíveis integrações de uma rede mesh, pode-se dizer que sua topologia pode ser agregada com o WiMAX, pois as redes mesh oferecem mobilidade ao passo que as redes WiMAX permitem operações de longa distância (INTEL, 2004). Para o nosso SIT a melhor solução é uma integração entre os dois tipos de rede.

2.3 Zigbee

O Padrão IEEE 802.15.4 que define o Zigbee é um conjunto de protocolos que especificam os padrões para uma WPAN, providenciando melhor suporte para redes mesh de baixo custo e baixo consumo de energia, fornecendo maior duração da bateria, porém menor taxa de transmissão. O principal objetivo de utilizarmos esse mecanismo é a facilidade de instalação, transferência confiável de dados, operações de curto alcance, maior vida da bateria e um protocolo simples e flexível (NIGAM; JAIN; BANDOPADHAYA, 2010). Todavia, esse padrão não pode ser considerado para as operações de longa distância, pois possui um alcance entre 10 e 100m.

2.4 Dispositivos RFID

Dispositivos RFID são baseados no armazenamento e recuperação remota de informação ou dados entre uma tag⁶ e um leitor. Além disso, um sistema remoto de RFID deve contar com um banco de dados em seu back-end (SCHWIEREN; VOSSEN, 2009).

O funcionamento básico de um sistema RFID consiste na comunicação entre seus componentes sendo que esse processo é gerenciado por diversos protocolos⁷ que trabalham em frequências de banda específicas (560 – 915 MHz para UHF ou 13.56 MHz para HF). Se o leitor estiver ligado e uma tag entrar em seu campo de leitura, então automaticamente o leitor é ativado e decodifica o sinal emitido pela tag. Todas as tags dentro da área do leitor devem responder ao mesmo tempo, cabendo ao leitor gerenciar colisões. (AHSAN; SHAH; KINGSTON, 2010).

⁶ Ou etiqueta

⁷ Principalmente ISO 15693 e ISO 18000-3 para HF ou ISO 18000-6 e EPC para UHF

Uma aplicação típica de um sistema RFID em um SIT é mostrada na figura 3, onde um sistema de radar realiza a leitura dos dados de um veículo.

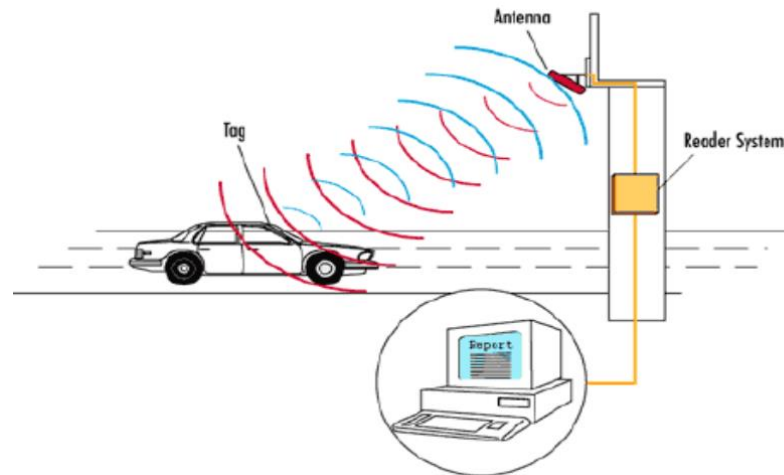


Figura 3 - Exemplo de sistema RFID.

Fonte: AHSAN; SHAH; KINGSTON, 2010

As tags de um sistema RFID podem operar em diferentes frequências dependendo de sua aplicação sendo que cada tag pode funcionar em uma frequência distinta. As tags passivas, dependem da energia do leitor para funcionar ao passo que as tags ativas podem ser configuradas para transmitir mensagens sob demanda ou constantemente, sendo essa alternativa a melhor para trabalhar com um range maior devido a sua fonte de energia interna. Todavia, esse tipo de tag costuma a ser financeiramente menos atrativa. (MOEN, 2007).

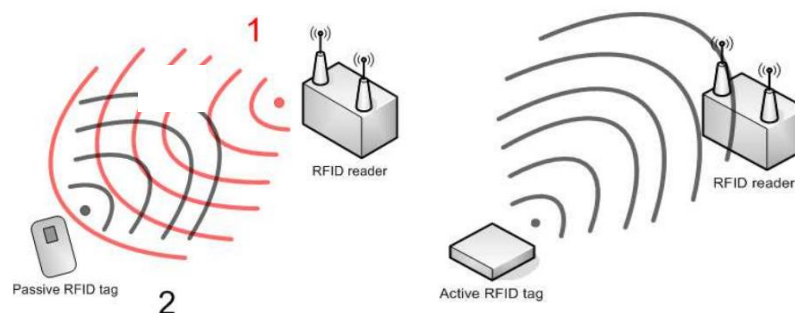


Figura 4 - Exemplo de tags passivas (a esquerda) e ativas (lado direito).

Fonte: AHSAN; SHAH; KINGSTON, 2010

Já os leitores de RFID funcionam basicamente como um aparato que recebe e produz sinais de rádio através de uma antena que podem operar através de Wi-Fi sendo conhecidos como leitores de rede (SANDIP; 2005).

Dentro do universo dos SITs os sistemas RFID já estão sendo aplicados para tarifação e melhoria de fluxo de tráfego. Por exemplo, podem ser usados com intuito de capturar padrões através de mineração de dados para auxiliar a administração de um município a tomar decisões sobre as condições do trânsito ou para criar novas políticas (SHEPARD, 2005).

2.4.1 RTLS

Segundo um estudo realizado pela (CISCO, 2008), utilizando uma infraestrutura existentes de tecnologia Wi-Fi é possível monitorar os dispositivos RFID dentro da área de cobertura, sendo utilizados diversos métodos para determinar a localidade de uma tag. De acordo com os autores, os principais métodos para a construção de um sistema de localização RFID são através da triangulação de sinal e medida por tempo de resposta.

Um RTLS é composto principalmente por tags RFID ativas, uma rede inteligente de roteadores – sendo, nesse caso, as redes mesh as mais apropriadas – e um sistema de software capaz de apresentar informações em tempo real (NIGAM; JAIN; BANDOPADHAYA, 2010).

2.4.2 Dados de operação do RFID

A tabela foi elaborada pelo Departamento de Segurança Interna⁸ dos Estados Unidos e sumariza as principais frequências RFID, padrões, aplicações e critérios de decisão.

⁸ Department of Homeland Security: www.dhs.gov

Faixa de Frequência	Velocidade / Qtde. Dados	Range de Leitura	Aplicação Comum	Pontos fortes / Desafios
Low Frequency (LF): 125 – 134 KHz	Baixa Pequena	Alguns centímetros	Inventário	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo; • Baixo range de leitura; • Pequena quantidade de dados; • Baixa velocidade de Transferência.
High Frequency (HF): 13.553 – 13.567 MHz	Média Média	30 a 90cm	Smart Cards	<ul style="list-style-type: none"> • Padrões definidos; • Menos suscetível a interferência,
Ultra High Frequency (UHF) 433 MHz	Satisfatória Média-alta	15 a 90m	Rastreamento de objetos	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade e cobertura; • Custo; • Potencial de interferência com certos dispositivos.
Ultra High Frequency (UHF): 900-950 MHz	Rápida Pequena-Grande	60cm a 3m	Registro de Pallets	<ul style="list-style-type: none"> • Velocidade • Alto custo • Maior Cobertura
Microwave Frequency 2.45 GHz	Alta Média	90cm a 6m	Serviços de Pedágio	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura • Velocidade de transferência • Alto custo
Microwave Frequency 5.8 GHz	Ultra rápida Alta	15 a 90m	Serviços de Pedágio	<ul style="list-style-type: none"> • Cobertura • Velocidade de transferência • Alto custo • Substituição de bateria

Tabela 2- RFID Sumário.

Fonte: Adaptado do Depto. De Segurança Interna dos EUA. (2013)

2.5 Dedicated Short-Range communication – DSRC

DSRCs são comunicações sem fio projetadas especificamente para o uso automotivo (MILLER; SHAW, 2001) que usa o padrão IEEE 802.11p na banda de 5.9Ghz⁹, suportando operações envolvendo comunicações entre veículos (V2V) ou entre veículos e infraestrutura (V2I). Além disso, a operação na banda de 5Ghz permite que a rede fique dentro do range livre para uso, evitando interferências e oferecendo maior confiabilidade da rede (RITA, 2013). Algumas das principais características desse tipo de operação podem ser vistas na tabela 3.

Parâmetros	Características da banda de 5Ghz
Espectro utilizado	75 MHz
Taxa de dados	6 Mbps - 27 Mbps
Cobertura	Sobreposição de áreas de comunicação necessárias e permitidas
Status da alocação	Estado Primário (alta proteção)
Potencial de interferência	Radares militares, Uplinks Satélite
Alcance máximo	1km
Capacidade do Canal	7 canais
Energia (Downlink)	Nominalmente, a menos de 33 dBm (2 W) ¹⁰
Energia (Uplink)	Nominalmente, a menos de 33 dBm (2 W) ⁹

Tabela 3- Características das DSRCs em 5Ghz.

Fonte: Adaptado de RITA – Research and Innovative Technology Administration do Departamento de Transporte Americano (2013)

Segundo informações do Centro de Tecnologia da Toyota (KENNEY, 2013), um esquema V2V funciona através do broadcast das informações de cada veículo em uma BSM enviada num padrão de 360° utilizando o IEEE 802.11p numa frequência de 10 vezes por segundo. Uma vez recebida a BSM, o veículo é capaz de construir um modelo de trajetória para cada veículo a sua volta, podendo evitar riscos, alertar o motorista sobre possíveis ameaças ou tomar o controle do veículo em casos extremos.

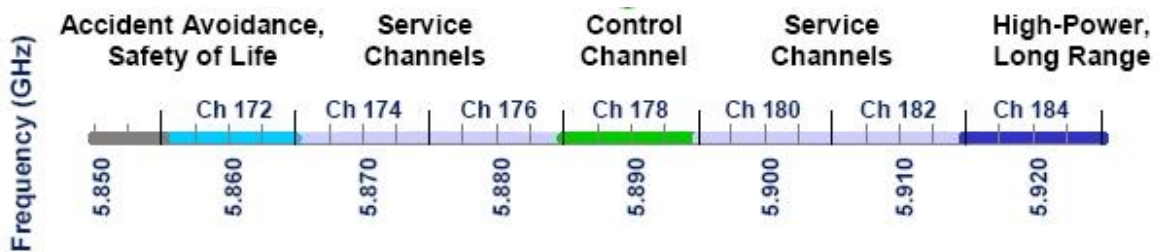
⁹ Nos Estados Unidos e na Europa

¹⁰ Nos E.U.A, um caso especial operando em 44.77dBm (30 W) pode ser usado para aplicações de segurança pública

Ainda levando em consideração a mesma fonte, um esquema V2I permite a interseção de veículos com a infraestrutura ao longo da via. Dentre as aplicações desta categoria de comunicação destaca-se a priorização dos sinais de tráfego que serão estudados na seção 4. Ainda quanto ao uso do V2I, o DSRC é a única alternativa sem fio de curto alcance a permitir segurança de dados, interoperabilidade, baixa latência e rápida aquisição da rede (RITA, 2013).

Muito semelhante ao padrão IEEE 802.11^a, DSRCs se diferenciam a partir de banda de frequência, apontada para operar em um espectro licenciado de 75MHz diferentemente do IEEE 802.11^a que opera em porções não licenciadas da banda de frequência. Além disso, DSRCs foram feitas para veículos que atingem até 120km/h ao passo que o padrão contraposto foi projetado para a velocidade de pessoas caminhando. Por último, as DRCS priorizam aplicações de segurança, o que não ocorre no IEEE 802.11a (RITA, 2013).

A figura 5 representa o espectro das DSRCs que é dividido em 7 canais de 10MHz, sendo o canal 178 um canal de controle utilizado apenas para comunicações de segurança. Os canais 172 e 184 são reservados para futuras aplicações que evitem colisões entre veículos e demais usos relacionados à segurança geral.



Fonte: RITA, 2013

Figura 5- Espectro do protocolo DSRC.

DSRCs juntos podem oferecer aplicações *smart* como a sociedade ainda nunca experimentou. Começando com simples aplicações como pedágios automáticos, infraestrutura inteligente para redução de congestionamentos, acidentes até sistemas automáticos de direção (YUNXIN, 2010).

2.6 Acesso Sem Fio em Ambientes Veiculares

O padrão WAVE é um adicional ao IEEE 802.11, também conhecido como IEEE 802.11p¹¹, é necessário para dar suporte às aplicações de SIT em comunicações de curto alcance. Comunicações V2V e V2I são suportadas pela banda de 5.9GHz (5.85-5.925 GHz) e o padrão 802.11p trabalha com metade da banda do padrão 802.11a (KUKOLEV, 2013). Além disso, segundo o mesmo autor, esse protocolo possui a capacidade de trabalhar com OFDM, prevenindo a influência negativa de interferência.

Com equipamentos próprios instalados no veículo e na infraestrutura urbana, as redes WAVE podem fornecer informações em tempo real sobre informações do tráfego, podendo melhorar a segurança e reduzir congestionamentos (BO Li et al, 2012).

Segundo (HU et al, 2009), o predecessor do protocolo WAVE é o DSRC, mas se compararmos as especificações verifica-se que são duas arquiteturas completamente diferentes. Os dispositivos de uma WAVE são categorizados como RSUs, geralmente adotando o papel semelhante a um ponto de acesso, usualmente fixo ao longo das vias através de conexões sem fio com acesso à internet, e OBUs que são os equipamentos acoplados nos carros. Esses dois

¹¹ Também definido pelo IEEE 1609

componentes foram uma WBSS pertence a uma MANET. Esses dispositivos comunicam-se entre si através da WAVE.

Ainda segundo os mesmos autores, existem desafios a serem vencidos para que o protocolo se torne altamente eficaz, sendo hoje foco de muitas pesquisas. Dentre os principais desafios destacam-se:

- Diminuição do *delay* em comunicações de alta velocidade em tempo real
- Implementação de um QoS eficaz¹²
- *Overload* de rede devido às condições de tráfego
- Níveis de segurança duvidosos especialmente em VANETs
- Integração de múltiplos dispositivos
- Nova tecnologia ainda não disseminada: veículos ainda não estão aptos a operar com a tecnologia.

2.7 Rede Veicular Ad-hoc

Uma VANET é um tipo de MANET que é usada para providenciar comunicação entre veículos próximos e infraestrutura fixa ao longo das vias. Apesar de uma VANET ser um tipo de MANET os protocolos de roteamento não são compatíveis entre as duas, não podendo assim oferecer a melhor taxa de transferência para uma VANET em constante mudança (RANJAN; AHIRWAR, 2011). Devido à rápida mudança tecnológica e frequentes desconexões, torna-se difícil estabelecer e desenhar um protocolo de roteamento eficiente para transmissão de dados entre veículos (PAUL et al, 2011).

¹² Pode existir a combinação com o 802.11e (WLAN) para lidar com o problema

A principal diferença entre as duas está no fato de que em uma VANET os nodes estão se movendo ao longo de vias pré-definidas e suas rotas não são complicadas. É nesse ponto que a importância do protocolo de roteamento se faz importante para mudanças (RANJAN; AHIRWAR, 2011). Atualmente os protocolos de roteamento baseados em VANET não são eficientes e adequados para todos os cenários de tráfego (PAUL et al, 2011).

Alguns benefícios que uma VANET pode oferecer estão principalmente relacionados à segurança e fluência de um sistema de transporte. Dentre esses benefícios estão:

- Aviso para prevenção de colisões
- Aviso para distância segura
- Assistência ao motorista
- Direção cooperativa
- Disseminação de informações da via
- Acesso à internet
- Mapas dinâmicos
- Estacionamento automático
- Veículos sem necessidade de motoristas

Deve-se portanto considerar o uso de uma VANET para assistir às operações tangentes ao nosso SIT que constitui de uma topologia dinâmica devido ao movimento dos carros. Essa topologia é suportada por uma VANET. Além disso, a posição e o movimento dos veículos podem ser facilmente localizadas por sensores *onboard* como os dispositivos de GPS, ajudando em uma comunicação efetiva e decisões de rota (PAUL et al, 2011).

Devido à sua característica altamente dinâmica, a topologia pode ser configurada em dois tipos: baseada em posicionamento ou baseada em roteamento como demonstrado na figura 6.

Protocolos de Roteamento VANET	Baseado por Topologia	Proativo	FSR		
		Reativo	AODV TORA DSR		
	Baseado por Posicionamento	Não DTN	Sinalizado	Sem sobreposição	GPSR GPSR+AGF PBR-DV GRANT
				Com Sobreposição	GPCR GPSRJ + CAR GyTAR GSR A-STAR STBR LOUVRE
			Não Sinalizado	CBF	
		Híbrido	TO-GO		
		DTN	VADD GeOpps		
		Híbrido	GeoDTN + Nav		

Figura 6- Protocolos de Roteamento VANET.

Fonte: PAUL et al, 2011

O objetivo desse trabalho não é especificar cada um dos protocolos de roteamento de uma VANET, mas o modelo baseado por topologia utiliza informação de links dentro da rede para enviar pacotes de dados de uma fonte a um destino. Esse modelo pode ser proativo ou não, podendo operar sob demanda ou automaticamente. Já nos protocolos baseados por posicionamento, cada veículo sabe sua localidade e a de seus vizinhos através de dispositivos de GPS, não mantendo nenhuma tabela de roteamento ou troca de links entre os veículos (PAUL et al, 2011).

2.8 Sistemas de Posicionamento Global - GPS

Segundo informações da (GARMIN, 2000), Sistemas de Posicionamento Global são uma rede de satélites que estão continuamente transmitindo informações codificadas que torna possível identificar localizações na Terra de forma muito precisa através da mensuração da distância entre os satélites.

O Sistema NAVSTAR, também referido puramente como GPS, pertence ao Governo Americano (USG da sigla em inglês) e é controlado pela Força Área Americana (USAF) (USDD, 2008). Consiste de um segmento de espaço que engloba 24 satélites (21 ativos e 3 de backup) localizados a quase 20 mil quilômetros da superfície da Terra, permitindo uma maior cobertura (Figura 7). Esses satélites viajam a 11 mil quilômetros por hora, realizando um trânsito completo ao redor da Terra em apenas 12 horas (USDD, 2008).

Cada satélite transmite sinais de rádio em diversas frequências, sendo que os dispositivos GPS recebem esse sinal de banda UHF de 1575MHz (sinal L1) operando com a codificação CDMA. Além deste, há um segmento de controle (as estações em terra) e um segmento de usuário (um dispositivo receptor de GPS) (USDD, 2008).



Figura 7- GPS.

Fonte: USDD, 2008

Em um SIT, os GPSs são aplicados para providenciar localização em tempo real de veículos, geralmente auxiliando no alívio de vias congestionadas através do planejamento de rotas alternativas (CHEN, 2011).

Cabe ressaltar que existem ainda outros sistemas semelhantes ao GPS: o GLONASS pertencente a Rússia, o Galileo da União Européia, o indiano IRNSS e o Compass pertencente à China. Apenas o GPS está completamente operacional. A tabela 4 faz um comparativo entre os sistemas.

Sistema	GPS Estados Unidos	GLONASS Federação Russa	COMPASS China	GALILEO União Europeia	IRNSS Índia
Codificação	CDMA	FDMA/CDMA	CDMA	CDMA	CDMA
Altura Orbital	20,180 km	19,130 km	21,150 km	23,220 km	36,000 km
Period	11.97 hours (11 h 58 m)	11.26 hours (11 h 16 m)	12.63 hours (12 h 38 m)	14.08 hours (14 h 5 m)	N/A
Evolução por dia sideral	2	17/8	17/10	17/10	N/A (geoestacionário)
Número de Satélites	24	31	5 GEO 30 MEO	4 em teste 22 operacionais controlados	7 GEO
Frequency	1.57542 GHz (Sinal L1) 1.2276 GHz (Sinal L2)	1.602 GHz 1.246 GHz	1.561098 GHz (B1) 1.589742 GHz (B1-2) 1.20714 GHz (B2) 1.26852 GHz (B3)	1.164–1.215 GHz (E5a and E5b) 1.260–1.300 GHz (E6) 1.559–1.592 GHz (E2- L1-E11)	N/A

Tabela 4- GPS Comparativo.

Fonte: USDD, 2008

3 ALGORITMOS

A inteligência de um SIT está diretamente relacionada à performance dos algoritmos que compõe as OBUs e RSUs bem como toda a infraestrutura viária como sinais de trânsito, placas, sistemas de mensagens entre outros. Alguns dos principais recursos inteligentes que podem ser explorados para um SIT são os algoritmos capazes de realizar decisões sobre rotas (Bellman-Ford), algoritmos capazes de identificar padrões de comportamento (Genético) e algoritmos capazes de aprender “sozinhos” (Multiagentes).

3.1 Algoritmo de Bellman-Ford

O algoritmo de Dijkstra é um clássico algoritmo computacional onde, dado um grafo¹³, calcula-se o caminho mínimo entre um vértice específico e todos os demais vértices que formam o grafo (SARAIVA; SOUSA; ASADA, 2011).

Segundo informações do Departamento de Ciência da Computação da Universidade de Cornell¹⁴, o algoritmo de Dijkstra é uma generalização do algoritmo de BFS, significando que este algoritmo é um mecanismo de busca em grafo. Um algoritmo de busca pode ser imaginado a partir de um vértice fonte no grafo que vai através dos outros pontos, marcando seus vértices. Esses algoritmos não fazem uso do fato que nós pode-se conhecer de antemão a estrutura

¹³ Tipicamente, um grafo é representado como um conjunto de pontos (vértices) ligados por retas (as arestas).

¹⁴ Disponível em: http://www.cs.cornell.edu/~wdtseng/icpc/notes/graph_part2.pdf (acesso em 27/08/2013)

completa do grafo. Isso explica o motivo de o algoritmo de Dijkstra não suportar pesos negativos, procurando apenas fatos conhecidos, não realizando assim novas descobertas.

Ainda segundo os autores, o algoritmo de Bellman-Ford é um algoritmo de programação dinâmica que resolve o problema do caminho mais curto. Este algoritmo conhece a estrutura do grafo e de forma iterativa gera soluções melhores baseando-se em um grafo anterior até achar uma solução. Bellman-Ford pode lidar com pesos negativos, pois utiliza de um grafo inteiro para melhorar uma solução. A figura 8 é uma representação de grafo que se assemelha à infraestrutura de uma cidade.

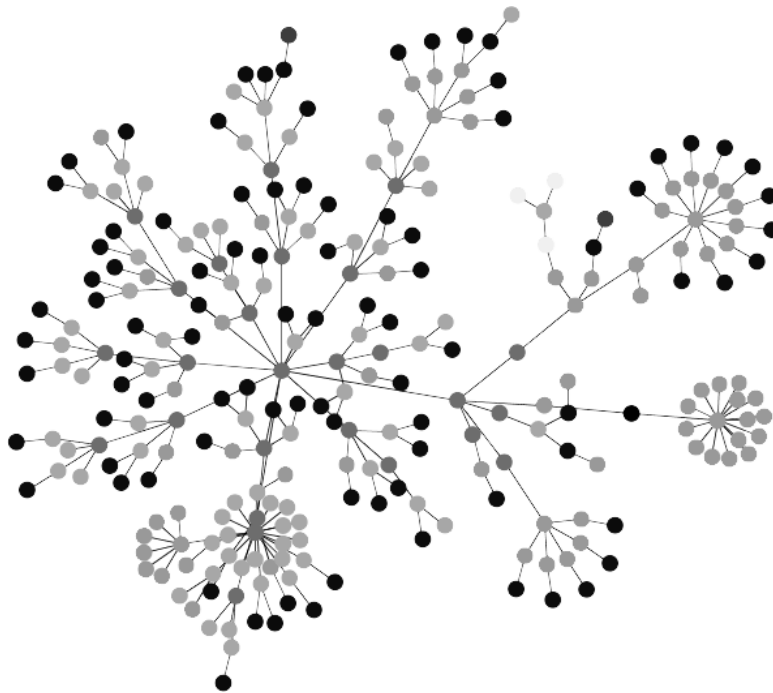


Figura 8 – Representação de um grafo análogo à uma infraestrutura viária.

Fonte: Google Images. Acesso em 02/09/2013

Para melhor entendimento, inicia-se com uma base S_0 , um set contendo as menores distâncias de s para todos os vértices. Nessa base, $d[s] = 0$ e $d[v] = \infty$ para todos os outros

vértices v . Então nós prosseguimos para relaxar cada ponto uma vez, construindo o set S_1 , sendo esse uma melhoria sobre o S_0 , pois contém todas as menores distâncias usando um ponto. Sendo assim nós repete-se o processo onde S_2 terá melhorias quanto a S_1 , e S_3 sobre S_2 e assim por diante...Cada set S_k contém todas as menores distâncias de s usando k pontos. Como exemplo, pode-se dizer que $d[v]$ é mínimo em S_k se o menor caminho de s para v usa no máximo k pontos.

```
vector < pair < int, int > > EdgeList; // uma lista de pontos direcionados (u,v)
int graph[128][128]; // da o peso
int n, dist[128];
void bellman•ford(int s) {
    // inicializa nossa solução
    for (int i = 0; i < n; i++)
        dist[i] = INT_MAX;
    dist[s] = 0;
    for (int k = 0; k < n•1; k++) { // interações
        // Constrói uma solução melhor Sk+1 para Sk
        for (int j = 0; j < EdgeList.size(); j++) { // Tenta para todos os pontos
            int u = EdgeList[j].first, v = EdgeList[j].second;
            if (dist[u] < INT_MAX && dist[v] > dist[u] + graph[u][v]) // relaxa
                dist[v] = dist[u] + graph[u][v];
        }
    }
    // ... teremos a melhor solução depois n1 interações
}
```

Figura 9- Exemplo de algoritmo.

Fonte: Leurent, 2005 (adaptado)

O algoritmo acima basicamente implementa esta ideia. Nós começamos com a base S_0 e repetidamente relaxamos cada ponto para gerar S_{k+1} de S_k . Este algoritmo é mais lento que de Dijkstra, mas com essa funcionalidade adicional de ponderar pesos negativos e detectar ciclos negativos, pode ser mais útil em alguns casos. Particularmente, utiliza-se o algoritmo de Bellman-Ford para encontrar o caminho mais longo de s para qualquer vértice v por simplesmente alterar todos os pontos positivos para negativos e vice-versa.

Dentro do escopo de um SIT, deve-se aplicar esse algoritmo para aprimorar o mecanismo de inteligência capaz de aprender os padrões de tráfego. Uma vez encontrados os menores e os maiores caminhos, fica fácil estabelecer quais rotas são mais adequadas considerando quantidade de veículos, distâncias, padrões de deslocamento, etc.... Nesse contexto, o problema

de um DTA pode ser dito como segue: dado um set de viajantes, todos com origem, destino e horário de partida conhecidos, deve-se encontrar a rota mais eficiente para cada viajante (LEURENT, 2005).

3.2 Algoritmo Genético

Usualmente o caminho mais curto providenciado pelos guias de rota, muitos deles puramente baseados em algoritmos como o de Belman-Ford, não necessariamente é o caminho ideal considerando que é computado principalmente baseando-se na menor distância (menor peso) e não em outras variáveis como por exemplo congestionamentos e limites de velocidade que podem ter efeitos significantes. Por isso deve-se considerar estas variáveis também. O custo computacional para se considerar diversas variáveis de tráfego pode consumir muito tempo e recursos dos dispositivos (OBUs e RSUs) envolvidos no SIT que usualmente possuem memória e processamento limitado. Um método para resolver esse problema é realizar todas as computações em um servidor, mas uma vez que a comunicação entre os dispositivos é disruptiva, também seria a aplicação de rota. O método alternativo é usar algoritmos que podem providenciar respostas aproximadas com menor poder computacional. Algoritmos genéticos. (CHU-HSING et al, 2009)

Um algoritmo genético é uma técnica para encontrar soluções exatas ou aproximadas (XU; BEAN, 2007). Originou-se da teoria da evolução na natureza, quando, em 1975, John Holland trabalhou no livro sobre algoritmos genéticos intitulado “Adaptação em Sistemas

Natuais e Artificiais”¹⁵. Esse algoritmo possui diversas aplicações em diversas áreas da economia, biologia, sistemas, etc. Os critérios de seleção de um algoritmo genético são:

- Inicialização da população
- Escolha da função de aptidão e avaliação de cada indivíduo na população
- Seleção dos melhores para reprodução
- Criação de uma nova geração através da mutação ou nascimento
- Substituição da parcela da população pior classificada pela nova geração
- Repetição do processo até que a condição de término seja atingida.

O uso de algoritmos genéticos para resolução do problema do menor caminho foi proposto em 2002 (CHU-HSING et al, 2009) e o problema descrito foi o seguinte: a rede multi-hop pode ser definida como um grafo direcionado $G = (N, A)$, onde N denota o set de n nós (ou vértices) e A denota o set de arestas. A matriz de custo é denotada como $C=[C_{ij}]$, onde C_{ij} associa o custo do node i para o node j . A origem é S e o destino é D . O indicador de ligação, I_{ij} , indica se uma rota existe entre o node i e o node j . Se há uma rota, então $I_{ij} = 1$, senão $I_{ij} = 0$.

Os autores mostram que usando o algoritmo genético, depois de nove processos geracionais, a solução ótima é encontrada para uma rede de 20 nodes.

O algoritmo genético possui rápida convergência, precisando de apenas alguns processos geracionais para encontrar a melhor solução e é importante ressaltar que na medida que o número de nodes cresce, o algoritmo genético se mostra mais eficaz do que o algoritmo de Dijkstra (ou o de Bellman-Ford), sendo mais vantajoso utilizar a primeira opção em cenários reais com milhares de nodes.

¹⁵ Tradução livre. Título original: “Adaptation in Natural and Artificial Systems”.

3.3 Algoritmo de Otimização da Colônia de Formigas

Considerando aplicações da vida real que são dinâmicas, de comportamento complexo e aleatórias, os algoritmos genéticos demonstram sérias fraquezas. A ideia fundamental de um algoritmo baseado em ACO é um processo iterativo em que a população de simples agentes repetidamente constroem possíveis soluções. Esse processo de construção é probabilisticamente guiado por informação heurística na instância do problema bem pelo compartilhamento da memória contendo a experiência ajuntada em momentos anteriores de indivíduos da população (SALAMI, 2009).

A inspiração do ACO é a trilha de feromônio e o comportamento de formigas reais que usam esses feromonios como um meio de comunicação. Em analogia ao exemplo biológico, ACO é baseado na comunicação indireta de uma colônia de agentes simples mediados por uma trilha artificial de feromonios. O feromonio no caso do ACO são informações distribuídas e numéricas que as formigas utilizam para construir soluções probabilísticas as quais as formigas irão se adaptar durante a execução (DORIGO; STÜTZLE, 2000).

Segundo os autores, considerando um problema de exemplo (S, f, Ω) , onde S é o set de soluções possíveis, f é a função objetivo que determina cada solução $s \in S$, um valor da função objetivo (custo) $f(s, t)$ ¹⁶, e Ω é uma série de regras. O objetivo é encontrar a solução ótima

¹⁶ O parâmetro t indica que a função objetivo pode ser independente do tempo, como neste caso, por exemplo, em aplicações de problemas dinâmicos.

global $S_{opt} \in S$, ou seja, uma solução de custo mínimo que satisfaça as regras Ω . A representação do problema combinatório (S, f, Ω) pode ser entendida como segue:

- Um set finito $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ de componentes é dado
- Os estados do problema são definidos em termos de sequências $x = \langle c_i, c_j, \dots, c_k \rangle$ sobre os elementos de C . O set de todas as sequências possíveis é denotado por X . O comprimento de uma sequência c , isto é, o número de componentes na sequência é expressado por $|x|$
- O set finito de regras Ω define o set de estados viável X' , com $X' \subseteq X$.
- Um set S^* de soluções viáveis é dado, com $S^* \subseteq X'$ e $S^* \subseteq S$
- Um custo $f(s, t)$ é associado a cada possível solução $s \in S$
- Em alguns casos o custo, ou o custo estimado, $J(x_i, t)$ pode ser associado para estados ao invés de outras soluções. Se x_j pode ser obtido adicionando componentes de solução a um estado x_i , então $(x_i, t) < J(x_k, t)$. Note que $J(s, t) \equiv f(s, t)$.

Dada essa representação, as formigas artificiais constroem solução movendo no grafo $G=(C,L)$, onde os vértices são os componentes C e o set L conecta completamente os componentes C . As regras Ω do problema são implementadas na política seguida de formigas artificiais. Cada formiga dentro deste grafo irá procurar por soluções viáveis de custo mínimo. A figura 9 representa o processo de construção do caminho ideal entre pontos no mapa. Após avaliar todas as possibilidades, o algoritmo é capaz de decidir quais são as melhores opções (DORIGO; STÜTZLE, 2000).

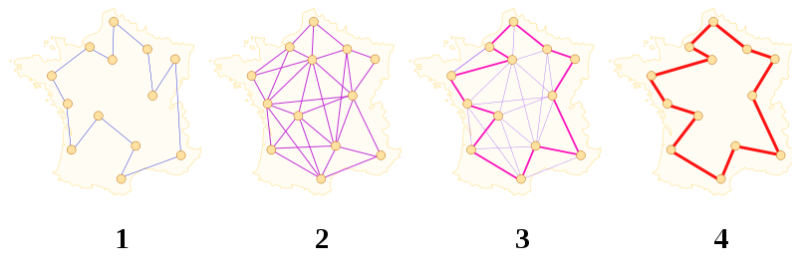


Figura 10- Exemplo de ACO.

Fonte: DORIGO, 2000 (adaptado)

Em nosso SIT, deve-se aplicar esse mesmo algoritmo para que os carros encontrem a melhor rota através do ferormonio artificial por eles deixados, isto é, pode-se aplicar uma regra em que quanto maior a quantidade de veículos em uma determinada via, pior ela é para seguir caminho. Assim sendo, os semáforos são integrados a outros RSVs para encontrar a solução ideal. Esse assunto é melhor detalhado no capítulo 7.

3.4 Sistemas Multiagentes

Sistemas multiagentes são um ramo de estudos relacionados com a inteligência artificial distribuída que, diferentemente da inteligência artificial “clássica”, alicerça suas pesquisas na possibilidade de aprendizado e resolução de problemas a partir de um fenômeno social (WOOLDRIDGE, 2009). Desta forma, esses sistemas podem ser de grande utilidade quando estamos analisando a engenharia de tráfego de um determinado local, pois as iterações dos usuários com a infraestrutura podem conter informações que aprimorem nosso SIT.

Cabe ressaltar que a capacidade de aprendizado dos sistemas multiagentes podem servir de inputs para outros módulos do nosso sistema como a rede de comunicação ou os algoritmos anteriormente analisados.

4 CONTROLE DE CONGESTIONAMENTO

Congestionamento é uma situação que ocorre quando um alto número de veículos está em uma via, levando à redução de velocidade e maior tempo para realizar uma viagem; Congestionamentos podem ser classificados como recorrentes ou não recorrentes. A primeira situação ocorre associada a eventos previsíveis, resultantes de um grande número de veículos ao mesmo tempo (durante o horário de pico, por exemplo) e no mesmo lugar (em um cruzamento). Os congestionamentos não recorrentes ocorrem associados aos atrasos não previsíveis, como aqueles causados por acidentes. (TAHILYANI; SHUKLA, 2012). A seguir são demonstrados métodos que podem auxiliar no controle de congestionamento.

4.1 Otimização de Semáforos

Segundo o estudo publicado no “International Journal of Recent Trends in Engineering”, a otimização de semáforos é um recurso utilizado para sincronização de um determinado número de semáforos em uma área com o objetivo de reduzir paradas e melhorar o fluxo das vias (SINGH et al, 2009).

Experimentos para otimização dos semáforos já foram realizados utilizando tanto processamento de imagem como dispositivos RFID, todavia a solução envolvendo imagens possui requisitos proibitivos e é bastante limitada, envolvendo problemas muito comuns como o False Acceptance Rate (FAR) e o False Rejection Rate (FRR), resultando em análises computacionais falhas. Em contrapartida, o sistema de controle de semáforos baseado em sensores requer dispositivos capazes de operar em LOS, podendo demonstrar dificuldades para

detectar veículos que passam em um ponto cego da cobertura do sinal. A tecnologia FRID oferece um avançado mecanismo para reconhecimento de objetivos que pode suportar o algoritmo de tráfego dinâmico (AL-KHATEEB, JOHARI, 2008).

A infraestrutura para suportar esse tipo de controle consiste de quatro partes principais: as tags RFID, um ponto de acesso, um servidor e uma rede mesh. O primeiro simula o movimento dos veículos, o segundo detecta as tags RFID, o terceiro age como um software e o quarto simula o ambiente ubíquo. Além disso, o servidor age como um micro controlador dos semáforos, coletando a localização e o horário de marcação da tag do leitor RFID. Essa informação então é enviada ao sistema gerenciador através da internet. Esse sistema irá utilizar algoritmos inteligentes para enviar instruções viáveis ao controle de tráfego.

Para tanto, precisamos que o controle desses dispositivos seja eficaz a ponto de balancear o tráfego, analisando-o como um todo e decidindo qual procedimento controlar os sinaleiros. Além disso, o sistema deve ser capaz de detectar exceções (como acidentes de trânsito) e ainda assim operar de modo a reduzir o congestionamento. Para isso foi proposto um algoritmo capaz de processar os dados dos veículos em movimentos que foram marcados com uma tag RFID.

O processo de decisão para o controle de semáforos inteligente depende na informação em tempo real originária do sistema de RFID. Um número de leitores é instalado para detectar e contar a quantidade de veículos em cada cruzamento. O leitor captura o registro do horário de cada veículo em seu range. Então o local e a informação do horário de cada veículo é salva em uma tabela de referência como demonstrado na equação $ID: \langle Localização(l_n) \rangle : \langle Tempo(t_n) \rangle$.

Então o algoritmo realiza análises estatísticas para determinar em qual cruzamento está havendo o maior volume de veículos e, baseando-se nas análises computacionais, pode determinar o tempo ideal para que cada cor do semáforo opere, levando sempre em consideração a velocidade média dos veículos (exemplo: o sistema pode deduzir que o sinal amarelo em uma

região altamente congestionada pode aparecer por apenas 2 segundos, sendo suficiente para que os veículos parem). Utilizando bases de algoritmo genético e multiagentes, o sistema então é capaz de aprender com seus inputs e melhorar sua performance a cada iteração.

4.2 Utilização de vias coletoras e locais

Um outro método que vem se demonstrando bastante eficaz é a realocação do volume de veículos para as vias coletoras e locais. A tabela 4 apresenta a diferença entre estas vias segundo a definição do Código de Trânsito Brasileiro.

Tipo de via	Limite de velocidade	Descrição
Trânsito rápido	80km/h	Aquela caracterizada por acessos especiais com trânsito livre, sem interseções em nível, sem acessibilidade direta aos lotes lindeiros e sem travessia de PEDESTRES em nível
Arterial	60km/h	Caracterizada por interseções em nível, geralmente controlada por semáforo, com acessibilidade aos lotes lindeiros e às vias secundárias e locais, possibilitando o trânsito entre as regiões da cidade
Coletora	40km/h	Destinada a coletar e distribuir o trânsito que tenha necessidade de entrar ou sair das vias de trânsito rápido ou arteriais, possibilitando o trânsito dentro das regiões da cidade
Local	30km/h	Caracterizada por interseções em nível não semaforizadas, destinada apenas ao acesso local ou a áreas restritas

Tabela 5- Diferenças entre as vias brasileiras.

Fonte: Código de Trânsito Brasileiro

Durante os horários de pico as vias menores podem ser utilizadas para superar situações em que há congestionamento em vias arteriais ou de trânsito rápido (TAHILYANI; SHUKLA, 2012).

5 MÉTODOS DE TARIFICAÇÃO

Diversas alternativas relacionadas à tarifação de veículos estão sendo adotadas ao redor do mundo. Seja para evitar congestionamentos, incentivar o uso de transporte público ou apenas para arrecadar fundos, já existem alternativas bastante eficazes para tal fim, fazendo uso da tecnologia para implementar métodos de cobranças.

5.1 Tarifação por deslocamento

Singapura foi a primeira cidade no mundo a implementar um sistema de ERP em setembro de 1998. Diferentemente dos clássicos sistemas de pedágio em operação em outros países, este sistema implementado em Singapura cobra os veículos através do uso de vias de acordo com o congestionamento que eles estão causando. Também referido como “Preço de Congestionamento”, na prática, os motoristas são cobrados para utilizar rodovias, estradas, pontes e túneis durante os períodos de pico. O propósito deste sistema de cobrança é reduzir o uso de automóveis, facilitando o tráfego e encorajando os cidadãos a caminharem, utilizarem bicicletas ou utilizar o transporte público como alternativa (MENON; GUTTIKUNDA, 2010).

Para que um sistema semelhante seja implementado, os veículos necessitam de um dispositivo instalado no painel frontal do carro. Além disso, sensores serão espalhados em locais estratégicos (como pontes, cruzamentos, ou túneis). A infraestrutura necessária é bastante simples e os dispositivos, equipamentos e protocolos descritos no capítulo 2 são suficientes para implementar um sistema semelhante.

5.2 Tarifação por pedágios urbanos

Outro método utilizado para diminuir a demanda de veículos em um determinado local é a implantação de pedágios urbanos onde os motoristas são cobrados para acessar uma zona em específico (usualmente os centros comerciais das cidades onde a concentração de veículos é maior). Métodos assim já são muito praticados em diversas cidades ao redor do mundo.

Considerando a nossa infraestrutura de um SIT, para implementar um sistema de tarifação baseado em pedágios sem impactar no aumento dos congestionamentos, devem-se considerar dispositivos RFID instalados em semáforos, onde o motorista será automaticamente cobrado.

Outra maneira de realizar esse tipo de operação seria através da utilização de dispositivos de posicionamento via satélite. Todavia, para que esse método seja viável, seriam necessárias diversas adaptações nos veículos para que possuíssem um dispositivo proprietário e um sistema robusto para processar bilhões de dados. Outro empecilho é a complexidade de o sistema identificar cada veículo de maneira separada e associar à base de cidadãos para que a cobrança seja realizada. Além disso, questões regulatórias e de privacidade ainda são um problema para que métodos avançados sejam utilizados.

6 SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO (ATIS)

Segundo relatório elaborado pela Booz Allen & Hamilton para o departamento de transporte norte americano (ATIS, 1998), sistemas avançados de comunicação para os viajantes inclui informações estáticas ou em tempo real sobre as condições de tráfego.

Se tratando de um SIT, as informações são disponibilizadas através de telas espalhadas pelas vias ou pelo computador de bordo dos veículos, considerando um sistema compatível com a rede disponível na cidade. Para tal, pode ser necessária a adaptação dos veículos para que sejam compatíveis com a nossa proposta de SIT, conforme será descrito no capítulo 7.

Um ATIS pode ser extremamente útil para que todos os métodos de planejamento de rota, redução de congestionamentos e tarifação sejam eficazes, pois é importante informar de maneira precisa e eficaz os usuários de um SIT. A figura 10 mostra um exemplo de painel integrado à rede de um SIT.



Figura 11- Exemplos de painéis utilizados em um ATIS.

Fonte: Google Images. Acesso em 10/09/2013

De maneira geral, esse tipo de mecanismo pode ser alimentado através da rede com a integração do sistema central de processamento responsável pelo SIT. Esse sistema também pode utilizar multiagentes para que mensagens sejam atualizadas automaticamente para os usuários da via. De uma forma geral um ATIS pode ser alimentado com inputs oriundos da rede em tempo real ou de informações legadas na base de dados do sistema.

Segundo o estudo apresentado no Terceiro Congresso Mundial de Sistemas Inteligentes de Transporte, uma rede urbana utilizando ATIS pode gerar ganhos a partir de 10% na lentidão das vias urbanas. Além disso, o autor do estudo estima que a demora para usuários que dispõem dos equipamentos adequados pode ser reduzida em 72% quando há obras na pista, 45% em dias de chuva e 49% quando existem acidentes. No geral, a lentidão no SIT pode ser reduzida para 18%, 12% e 6% respectivamente (WUNDERLICH, 1996).

7 SEGURANÇA E PRIVACIDADE

Um SIT utiliza uma rede de sensores para monitorar veículos e também pode obter dados dos usuários do sistema para processar dados. À medida em que mais dispositivos e mecanismos de controle ficam mais avançados, avançam as preocupações com os dados confidenciais dos usuários e sua privacidade. Portanto, se faz necessária a incorporação de mecanismos que providenciam ao usuário o controle sobre sua privacidade (KOST et al, 2012).

Existem, portanto, diversas categorias de ameaças que o SIT deve estar pronto para lidar e a tabela 5, pertencente ao departamento de transporter do governo dos Estados Unidos (BIESEKER et al, 1997), representa a relação entre as possíveis ameaças no escopo de um SIT e sua relação serviços de segurança que podem ser utilizados para prevenir, mitigar ou eliminar o risco das ameaças.

Security Services Security Threats	Authentication	Confidentiality	Integrity	Non-Repudiation	Access Control	Auditing	Availability	System Security Management
Denial of Service					X		X	X
Disclosure		X			X			X
Manipulation			X		X	X		X
Masquerading	X							
Replay	X							
Repudiation				X				

Tabela 5- Categoria e relacionamento de ameaças à segurança.

Fonte: BIESEKER et al (1997)

A infraestrutura de um SIT deve estar suportada por normas internacionais de segurança como a ISAE-3204 e SSAE 16. Desta forma, é garantida razoável segurança de que o sistema não será acessado indevidamente e que os riscos de manipulação ou acesso indevido dos dados serão controlados.

Infelizmente ainda hoje não há uma maneira eficaz de coletar dados dos usuários (como posicionamento e dados confidenciais) de forma anônima. Primeiramente porque é conflitante com a necessidade de dados dos usuários do SIT, segundo porque, mesmo operando de forma anônima, os usuários poderiam ser identificados através de técnicas envolvendo mineração de dados (*inference attacks*) (HOH et al, 2006).

Existem diversos documentos específicos para normatizar a questão de segurança para um SIT. Dentre estes documentos, destacam-se:

- ETSI TS 102 731: "Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Security Services and Architecture".
- ETSI EN 302 665: "Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture".
- ETSI TS 102 867: "Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Stage 3 mapping for IEEE 1609.2".
- ETSI TS 102 942: "Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Access control".
- ETSI TS 102 940: "Intelligent Transport Systems (ITS); Security; ITS communications security architecture and security management".
- ISO/IEC 8824-1:2008: "Information technology -- Abstract Syntax Notation One (ASN.1): Specification of basic notation".

- ISO/IEC 8825-2:2008: "Information technology -- ASN.1 encoding rules: Specification of Packed Encoding Rules (PER)".
- IEEE P1609.2/D12 (January 2012): "IEEE Draft Standard for Wireless Access in Vehicular Environments - Security Services for Applications and Management Messages".
- ETSI TS 102 943: "Intelligent Transport Systems (ITS); Security; Confidentiality services".

Além das questões inerentes ao SIT, cabe ressaltar que há ainda uma outra camada de segurança que deve ser pensada no tocante à utilização dos Softwares e bases de dados. Por isso a importância de estar em conformidade com as normas internacionais de segurança através de certificados emitidos por empresas de auditoria.

8 DESENVOLVIMENTO

A seguir será estudado como a implantação de um SIT pode ocorrer na prática através de uma hipótese onde foi escolhida a cidade de Curitiba no estado do Paraná (sul do Brasil) para estudo. Dessa forma, é analisada a estrutura da rede, sua inteligência e os componentes gerais que formam um SIT capaz de reduzir o nível de congestionamento da cidade de Curitiba e de qualquer outra cidade que se aplique este SIT.

8.1 Contexto da cidade

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2013), Curitiba é uma cidade cuja região metropolitana engloba aproximadamente 3 milhões de indivíduos e 2 milhões de veículos, incluindo automóveis, utilitários, caminhões, ônibus, motocicletas, etc.

Ainda segundo a mesma fonte, possui uma área total de aproximadamente 440km² e 4 mil habitantes por quilômetro quadrado. Dessa forma, por possuir uma considerável densidade demográfica e uma área razoável, Curitiba é uma cidade ideal para a análise de implantação hipotética de um SIT. Além disso, a cidade já demonstra sinais de trânsito caótico e, considerando que Curitiba é uma das cidades melhor planejadas do Brasil, ainda há possibilidades de implantar um SIT sem grande esforço. Segundo dados do MapLink (MAPLINK, 2013), Curitiba possui uma média de congestionamento de 150 km às 18h.

8.2 Infraestrutura

Considerando as dimensões apresentadas da cidade de Curitiba e a proposta de SIT que será apresentada, é necessário considerar a implantação de três principais dispositivos de rede:

- Roteadores mesh
- Antena WiMAX
- Dispositivos RFID

Esses dispositivos, por sua vez, devem operar cada um com seu protocolo de comunicação, sendo que a comunicação entre as peças deve ocorrer através da integração do roteador mesh habilitado para os padrões 802.11, da antena WiMAX que opera no padrão 802.16 e dos dispositivos RFID que operam no padrão 802.15.

Para que estes dispositivos operem sem interferência, se fazem necessárias medidas de coexistência que já estão sendo trabalhadas pelo IEEE Wireless Coexistence Working Group¹⁷. Uma vez que utilizamos diversas especificações de comunicação entre os dispositivos, como o Zigbee e WAVE, esse mecanismo de coexistência é extremamente necessário. Algumas medidas eficientes para evitar a interferência de sinal é a utilização de roteadores capazes de selecionar a frequência dinamicamente (CISCO, 2008) com utilização das técnicas de múltiplo acesso por divisão de frequência (FDMA) e Acesso múltiplo com verificação de portadora com anulação/prevenção de colisão/detecção de colisão (CSMA/CA/CD). Além disso, o Zigbee já vem com recursos adicionais para a realização de tal façanha (YANG et al, 2011).

Em resumo, considerando que um roteador mesh é suficiente para cobrir uma área de 2 km², se fazem necessários 220 roteadores espalhados de forma equidistante através do município

¹⁷ IEEE Wireless Coexistence Working Group: <http://www.ieee802.org/19/>

de Curitiba. Para um benefício adicional na região central da cidade, será implantado também uma antena WiMAX devido a capacidade de atingir distâncias maiores. Deve-se considerar o aluguel de postes para a alocação dos roteadores mesh e a implantação de uma torre para a antena WiMAX em um edifício na região central de Curitiba.

8.3 Inteligência

Suportando as operações da infraestrutura sugerida e realizando a integração entre as RSUs e OBUs, deve-se considerar a implantação de um sistema centralizado de inteligência, onde será disponibilizado pelo Instituto Curitiba de Informática (ICI) servidores capazes de processar, armazenar e tratar as informações que irão trafegar pela rede, dados de cada componente instalado no SIT e ainda capaz de processar informações de todas as RSUs e OBUs de forma individual. Nesse servidor de alta capacidade será instalado um software que, analisando em tempo real as informações de tráfego, será capaz de processar os algoritmos de Bellman-Ford, genético e colônia de formigas gerando informações capazes de melhorar o tráfego.

Esses algoritmos funcionam de modo dinâmico e são capazes de reconhecer padrões no tráfego a fim de utilizar o ATIS para informar as RSUs e OBUs sobre as condições do trânsito ou utilizando o ATMS para realizar automaticamente o escalonamento de semáforos.

A utilização de mecanismos multiagentes será realizada nesse nível de processamento para que, segundo o histórico comportamental da malha viária e considerando as variáveis informadas em tempo real, o sistema seja capaz de fornecer a melhor solução para o momento em questão.

Espera-se que a distribuição dessas informações ocorra da melhor forma possível para os 220 roteadores mesh e dispositivos RFID espalhados pela cidade. Para que a eficiência desse mecanismo seja garantida, utilizam-se roteadores dinâmicos capazes de decidir a melhor rota, recurso já disponível nos roteadores mesh.

8.4 Componentes

Além da infraestrutura e da inteligência desses SITs, é adotada a premissa que todos os veículos já são habilitados com OBUs capazes de receber e transmitir informações. Essas OBUs devem ser habilitadas para trabalhar com todos os padrões utilizados na rede (802.11, 802.15 e 802.16). Devido a essa exigência, o SIT proposto ainda está distante da realidade e se faz necessária a elaboração de um plano de longo prazo para transformação dos veículos.

Ainda considerando este cenário, os veículos podem realizar a troca de informações segundo a utilização de uma VANET e, utilizando o protocolo WAVE com o recurso DSRC ativo, podem realizar a troca de informações com os roteadores mesh. Outro recurso necessário é uma tag ativa de RFID para que os semáforos possam realizar a leitura e inscrição de dados na OBU.

É considerada a premissa de que todos estes semáforos também já possuem tags RFID embutidas para a comunicação entre RSUs e OBUs. As tags dos semáforos são suportadas pelo mecanismo RTLS, assim o sistema central de inteligência também pode ser capaz de um tratamento dedicado a cada uma das tags, caso necessário.

É considerada a implantação de tags ativas também em pontos estratégicos da cidade, onde através da utilização do recurso ERP os veículos sejam cobrados pelo uso de determinadas

vias. Segundo pesquisa realizada por um jornal local curitibano (Gazeta do Povo¹⁸, edição de 13 de maio de 2013), as vias mais congestionadas de Curitiba são as seguintes:

- Avenida Visconde de Guarapuava
- Avenida Comendador Franco (Av. Das Torres)
- Avenida Presidente Arthur Bernardes
- Avenida Cândido Hartmann
- Rua Eduardo Sprada

8.5 Métodos Práticos Para Redução de Congestionamento

Considerando a cidade de Curitiba, foram elaborados 3 métodos para redução de congestionamento baseando-se nas premissas supracitadas.

8.5.1 Escalonamento de semáforos

Para realização do escalonamento de semáforos são necessários os seguintes mecanismos:

- Tags RFID nos semáforos
- Tags RFID nos veículos
- Comunicação com o Sistema de Inteligência Central (tráfego através dos roteadores)

Os mecanismos de comunicação são fornecidos através da utilização de Zigbee entre os semáforos e os roteadores mesh e Rádio Frequência entre os veículos e os semáforos.

¹⁸ Disponível em: <http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1254037&tit=Curitiba-esta-cada-vez-mais-lenta>

O funcionamento básico dessa parte do SIT se dá através do seguinte método:

- A. O leitor RFID realiza a contagem de veículos passando em seu range.
- B. Os dados são transmitidos via Zigbee aos roteadores Mesh.
- C. Os roteadores mesh enviam os dados ao sistema de inteligência central.
- D. O sistema de inteligência central realiza a contagem de veículos no período determinado por s segundos.
 - a. O período s segundos é determinado pelo próprio sistema central
 - b. Conforme o fluxo de veículos diminui, o período s também diminui de forma dinâmica
- E. O mecanismo de RTLS será utilizado para determinar em uma localidade qual semáforo está obtendo maior fluxo de veículos.
- F. Conseqüentemente o método será aplicado e serão processados para os demais semáforos de uma mesma via, sendo identificado o caminho cujo número de veículos é maior.
- G. O sistema de inteligência central irá determinar o tempo de abertura do conjunto de semáforos com maior fluxo de veículos, priorizando estes.
- H. A variável segundos é determinada conforme a necessidade de abertura do semáforo: quanto maior o número de veículos passando naquela localidade, maior o tempo em que o semáforo deverá ficar na cor verde.

A figura 12 representa a condição do tráfego de veículos no centro de Curitiba no dia 23 de setembro de 2013. Foi identificado tráfego pesado na Rua XV de Novembro desde o cruzamento com a Rua Mariano Torres até a Rua Presidente Faria, incluindo os cruzamentos com as Ruas Tibagi, Conselheiro Laurindo e João Negrão. Seguindo o método acima, os semáforos nesses cruzamentos irão identificar o alto fluxo de veículos e irão priorizar a abertura do semáforo para a Rua XV de Novembro nos cruzamentos mencionados.

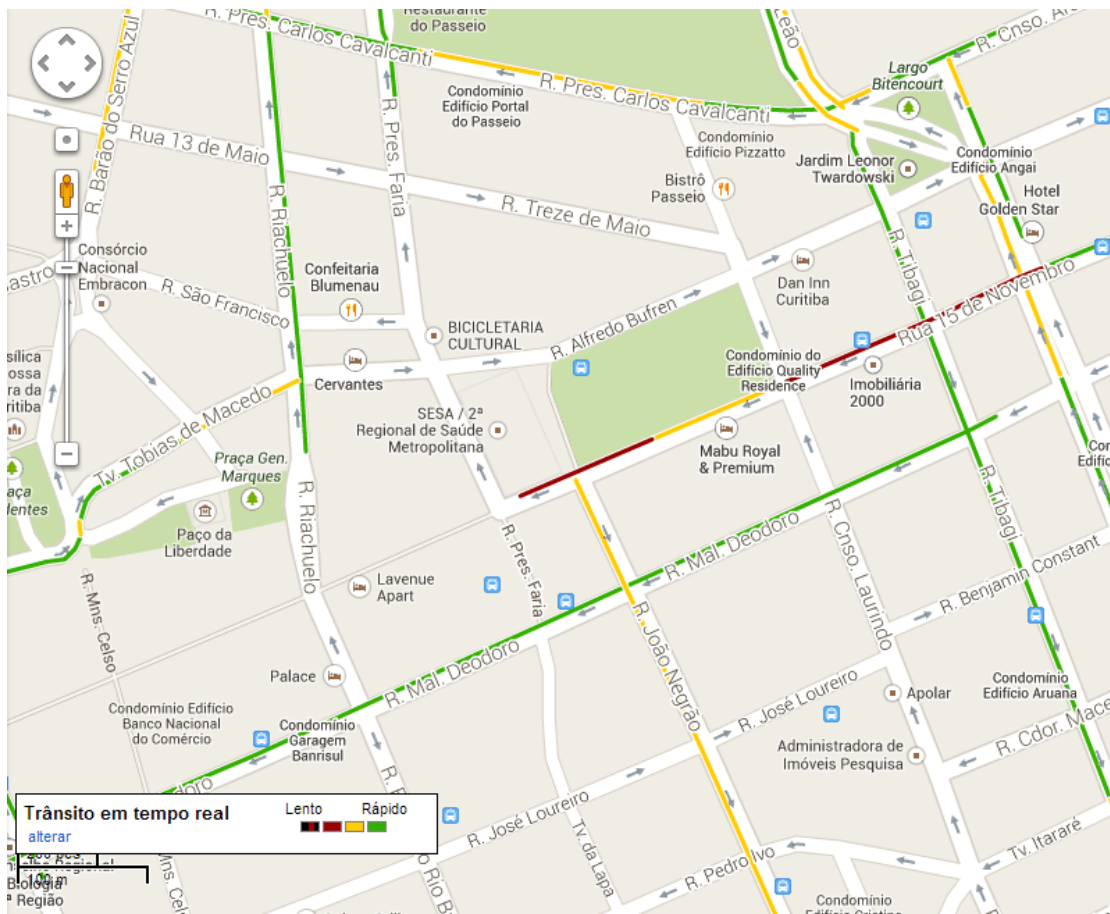


Figura 12- Condição do Tráfego no Centro de Curitiba

Fonte: Google Maps, 23/09/2013

Dessa forma, os demais cruzamentos ao redor da localidade irão possuir índice de priorização menor, fazendo com que o nível de congestionamento da Rua XV de Novembro seja reduzido até que se encontre em equilíbrio com as demais vias.

8.5.2 Utilização de pedágios urbanos

A utilização de pedágios urbanos de área pode ser adotada em Curitiba para acesso às regiões de maior fluxo de veículos, obrigando os motoristas a utilizarem o transporte público ou outras alternativas de acesso a essas localidades (bicicletas ou caminhada, por exemplo).

A construção de um pedágio urbano de área é simples e pode ser dada através dos seguintes componentes:

- Tags RFID em biombos instalados nos acessos às áreas restritas (como o centro da cidade).
- Tags RFID nos veículos.
- OBU habilitada para inserção de cartão *smart* para realizar a cobrança através de créditos.
- Comunicação com o sistema de inteligência central através da utilização do Zigbee.

Dessa forma, toda vez que um veículo entrar no range de leitura do RFID dos biombos, um ticket de cobrança será gerado. No SIT proposto, essa cobrança é realizada através de uma OBU habilitada com um cartão *smart* onde o motorista pode inserir créditos que serão descontados todas as vezes em que o veículo passar pelo range de um biombo de pedágio urbano.

A comunicação com o sistema central é necessária para que o preço do pedágio aumente conforme o número de veículos cresça na região.

Outra maneira interessante que vem sendo implantada em Singapura é a cobrança para a utilização de túneis, pontes ou localidades específicas¹⁹. Esse método é utilizado para que os veículos sejam tarifados todas as vezes que utilizarem uma determinada via. Considerando as 5 vias mais congestionadas de Curitiba, os veículos podem ser tarifados todas as vezes que forem realizar acesso a alguma delas.

8.5.3 Desvio para vias coletoras e locais

É fácil notar que em alguns momentos os métodos de escalonamento de semáforos e cobrança por pedágio urbano não serão capazes de reduzir o tráfego de veículos em determinadas vias. Pensando nisso, foi elaborado um terceiro método de redução de congestionamento utilizando a infraestrutura proposta.

Considerando as cinco vias mais congestionadas de Curitiba e outros pontos críticos (conforme a pesquisa realizada pelo jornal Gazeta do Povo), é necessário que os veículos sejam realocados em vias menos congestionadas, permitindo uma maior fluência do fluxo de carros. Para que esse mecanismo opere de maneira eficaz, são necessários os seguintes componentes:

- Roteadores mesh realizando comunicação com veículos através do protocolo WAVE
- Comunicação entre os veículos utilizando a VANET
- Roteadores mesh transmitindo mensagens para os painéis ATIS
- Sistema de inteligência central processando o volume de veículos nas vias (utilizando as informações das leitoras RFID implantada nos semáforos)

¹⁹ Informações disponíveis em: <http://www.techrepublic.com/blog/asian-technology/the-tech-behind-singapores-electronic-road-pricing-system/> (Acesso em 23/09/2013)

- As OBU's devem possuir GPS ligado e a rota origem-destino deve ser informada pelos motoristas
- Utilização do sistema de inteligência central para processamento das informações

Considerando as premissas acima, é possível, através de um método pré estabelecido, deslocar o fluxo de veículos para vias coletoras e locais que, apesar de possuírem um limite de velocidade menor, podem ser excelentes para reduzir o nível de congestionamento.

A figura 13 demonstra as principais vias congestionadas de Curitiba e estabelece rotas alternativas para tais vias.

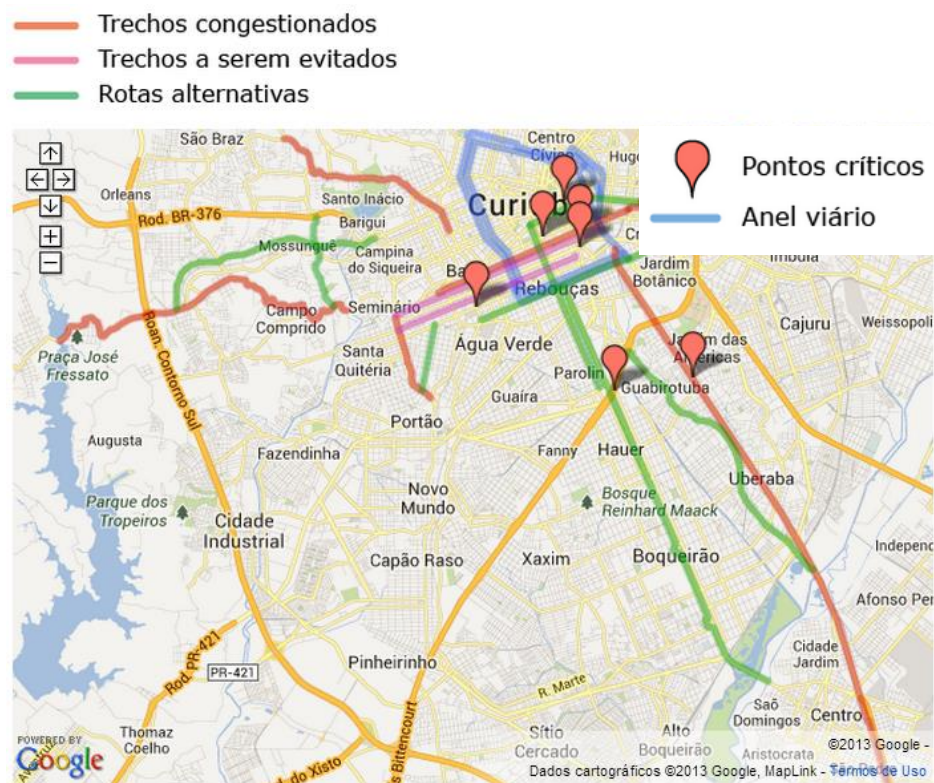


Figura 13 - Principais vias congestionadas e caminhos alternativos

Fonte: Jornal Gazeta do Povo, 13/05/2013

Neste SIT, essas rotas alternativas seriam fornecidas automaticamente e de forma dinâmica pelas OBU's e RSUs, O processo de decisão seria o seguinte:

- A. Os leitores RFID identificam a quantidade de veículos em uma determinada via
- B. Os veículos, com seus destinos parametrizados no GPS, utilizam a VANET para trocar informações entre si, enviando ao sistema de inteligência com conglomerado de informações sobre veículos partindo de uma origem semelhante com destino semelhante.
- C. Os roteadores mesh transmitem as informações coletadas pelo protocolo WAVE para o sistema de inteligência central que processará as informações utilizando os algoritmos genéticos e multiagentes
- D. Identificados padrões de deslocamento de veículos, os roteadores mesh transmitem informações aos painéis digitais ao longo das vias através do Zigbee.
- E. Os painéis mostram informações aos motoristas sobre rotas alternativas ao mesmo tempo que as OBU's os informam sobre qual a rota alternativa ser seguida. Exemplo: A OBU informa “Virar na rua Brasília Itiberê a 100m” e os painéis digitais (ATIS) demonstram os métodos de acesso à Rua Brasília Itiberê.
- F. O processo será repetido até que os veículos tenham atingido seu destino e o fluxo de veículos seja equilibrado.

Esse mecanismo possui uma complexidade elevada e necessita de severas alterações na infraestrutura da cidade bem como na experiência dos usuários da malha viária.

8.6 Custos

Foi realizada uma estimativa média dos custos envolvidos na implantação do SIT para a cidade de Curitiba. Foram adotados valores praticados no mercado e estimados com base no pior cenário de implantação (valores maiores que média do mercado). Para a cidade de Curitiba, considerando as soluções propostas nesse capítulo, o custo total do projeto é de aproximadamente R\$ 600 milhões, conforme visto na tabela 5 com valores aproximados.

Descrição	Qtde	Valor (USD)	Total (USD)	Observação
Roteadores mesh Tropos 7320	220	4.995	\$ 1.098.900	1 roteador a para cobrir raio de 2km ²
Anchor (model CS5118) Master Readers / Anchors	1.000	40	\$ 40.000	Tags acopladas aos semáforos
Adaptação veículos	2000000	120	\$ 240.000.000	Implantação de OBUs proprietárias nos veículos
Desenvolvimento de Software	1	3.500.000	\$ 3.500.000	Empresa terceirizada
Aluguel de postes	220	15	\$ 3.300	Empresa terceirizada
Painéis de mensagem	500	10.000	\$ 5.000.000	2 painéis para cada 2km ² em média
Antena WiMax	1	35.000 (média)	\$ 35.000	Incluindo torre
Recursos Humanos	200	7.500	\$ 1.500.000	Valor médio para operários, desenvolvedores, analistas, engenheiros, etc....

Tabela 6- Custos do Projeto.

8.7 Riscos

Para uma completa análise sobre a especificação de um SIT, devem ser ponderados também os principais riscos envolvidos na implantação do projeto. Os riscos são determinados 3 grandes temas de análise: tecnologia, usuários e projeto.

No primeiro grupo estão os riscos associados a tudo que envolve a configuração de servidores, de pontos de acesso, de antenas e de dispositivos. No segundo grupo estão as questões sociais do projeto como aceitação de usuários, adaptação dos veículos ou interface entre as OBUs e RSUs. No último grupo são colocados os riscos que envolvem a implantação do projeto, incluindo custos, falta de mão de obra especializada, entre outros.

Não há risco que possa inviabilizar a implantação do SIT nos quesitos tecnologia. Todavia os protocolos atuais não estão maduros o suficiente para operar com eficácia. A integração entre os componentes e coexistência dos padrões também são um fator de deficiência do SIT. Os riscos associados à tecnologia não são preocupantes, mas ações deverão ser tomadas no tocante à adaptação dos usuários.

8.8 Resultados

Os resultados da implantação desse SIT podem ser surpreendentes. Em Singapura, apenas a implantação do pedágio urbano resultou em redução de 10 a 15% no nível de congestionamento (KEONG, 2004).

Todavia, esse mecanismo como um todo ainda não foi implantado em nenhuma localidade. Foi considerada a informação do Departamento de Engenharia da Secretaria Municipal de Trânsito de Curitiba (SETRANINTE). Tal informação foi concedida em entrevista ao jornal Gazeta do Povo em fevereiro de 2013²⁰, onde um representante da entidade afirma que um trecho realizado atualmente em 40 minutos poderia ser reduzido para 15 minutos não fosse pela falta de fluidez no trânsito. Dessa forma, com a implantação do SIT proposto é esperada uma melhoria superior a 62% no índice de congestionamento da cidade.

²⁰ Informações disponíveis em:

<http://www.gazetadopovo.com.br/vidaecidadania/conteudo.phtml?id=1346218&tit=Curitiba-registra-134-km-de-lentidao-no-transito> . (Acesso em 23/09/2013)

9 PESQUISAS FUTURAS

Em pesquisas futuras recomenda-se estudo sobre soluções que não requeiram grande adaptação dos veículos ou que utilizem a tecnologia disponível no momento. O ponto principal é o desenvolvimento de um roteador capaz de trabalhar simultaneamente com interações de diversos padrões, aprimorando sua coexistência. Devido as inúmeras particularidades que compõem um SIT, seja na camada física dos componentes ou na inteligência computacional do sistema, deve-se criar um mecanismo unificado ainda mais eficiente e dedicado aos SITs capaz de capturar, transportar e processar dados de milhões de dispositivos.

10 CONCLUSÃO

Em um determinado SIT, podem existir diversos componentes capazes de suportar a operação de um mecanismo de controle de congestionamento. Atualmente a coexistência destes mecanismos com uma infraestrutura eficiente e livre de interferência entre os padrões está longe da realidade, pois a camada física dos componentes, os protocolos e algoritmos ainda não atingiram um patamar capaz de fazer a integração das partes. Além disso, os custos para implantação são muito altos.

Não há no mundo nenhuma solução de hardware e software centralizado que possa suportar a proposta de integração deste SIT que abrange três métodos de redução de congestionamento. Todavia, no estudo para a cidade de Curitiba, foi compreendido que a construção de uma infraestrutura de SIT interligada a um servidor de inteligência é plausível, mas, por razões tecnológicas, ainda não há métodos eficazes de gerenciamento da partes que integram o sistema.

Por fim, ao realizar esse estudo foi identificado que a combinação das soluções de ATMS, ATIS e ERP gera a possibilidade de redução de congestionamento que pode ultrapassar ganhos de 62% no ambiente tecnológico ideal que foi construído.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RODRIGUES, J. M. Crescimento da frota de automóveis e motocicletas nas metrópoles brasileiras 2001/2011. Rio de Janeiro, 2012.

AKYILDIZ, Ian F.; WANG, Xudong; WANG, Weilin; **Wireless mesh networks: a survey. Broadband and Wireless Networking (BWN) Lab, School of Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology**, Atlanta, GA 30332, USA, Kiyon, Inc., 4225 Executive Square, Suite 290, La Jolla, CA 92037, USA. 2005.

INTEL Inc. **Understanding Wi-Fi and Wi-Max as Metro-Access Solutions**. White Paper, 2004. Disponível em <<http://www.rclient.com/PDFs/IntelPaper.pdf>>. Acesso em 15 de Agosto de 2013.

L. Krishnamurthy, S. Conner, M. Yarvis, J. Chhabra, C. Ellison, C. Brabenac, E. Tsui, Meeting the demands of the digital home with high-speed multi-hop wireless networks, **Intel Technology Journal** 6. P. 57–68, 2002.

SIM. Sistema de Informação sobre Mortalidade. Disponível em <http://www.sim.saude.pr.gov.br/default.asp>. Acesso em 2 de junho de 2013.

J. SCHWIEREN, G. VOSSSEN. A Design and Development **Methodology for Mobile RFID Applications based on the ID-Services Middleware Architecture**, IEEE Computer Society, Tenth International Conference on Mobile Data Management: Systems, Service and Middleware. 2009.

ABELÉM, Antônio J.G.; ALBUQUERQUE, Célio V.N.; SAADE, Débora C.M.; AGUIAR, E.S.; DUARTE, Jairo L.; FONSECA, José E.M; MAGALHÃES, Luiz C.S. Redes mesh: mobilidade, qualidade de serviço e comunicação em grupo, cap. 2, 2007). Disponível em <<http://sbrc2007.ufpa.br/anais/2007/MC%20-%2002.pdf>>. Acesso em 3 de agosto de 2013.

DRILO, Boris; SARIC, Dink; FILJAR Renato. **The Role Of Telecommunications in development of New-Generation Intelligent Transport Systems – ICT for Government/Enterprise Segment – Ericson Nikola Tesla d.d – Zagreb, Croacia, 2009.**

UNIÃO EUROPEIA. **Directive 2010/40/EU of the European parliament and of the council of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Transport Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport.** 2010.

BOOZ ALLEN & HAMILTON. **U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration.** Setembro de 1998. Transpor

LTA. Land Transport Authority. **Singapore Government.** Disponível em <<http://www.lta.gov.sg/content/ltaweb/en/roads-and-motoring/managing-traffic-and-congestion/electronic-road-pricing-erp.html>>. Acesso em 12 de junho de 2013.

TRI. Transportation Research Institute. University of Michigan. Disponível em <http://www.umtri.umich.edu/expertiseSub.php?esID=119>. Acesso em 22 de junho de 2013.

SCOTI – **Standing Council on Transport and Infrastructure** - Policy Framework for Intelligent Transport Systems in Australia. 2012.

TELECO – Inteligência em Telecomunicação. Disponível em http://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialredeswimax/pagina_3.asp. Acesso em 3 de agosto de 2013.

SANDIP, L. RFID Sourcebook. IBM Press. 2005. USA. ISBN: 0-13-185137-3.

CISCO Systems Inc. Wi-fi location-based services - design and deployment considerations. 2008. White Paper. Disponível em <http://www.cisco.com> . Acesso em 17 de agosto de 2013.

AHSAN, Kamran; SHAH, Hanifa; KINGSTON, Paul. **RFID Applications: An Introductory and Exploratory Study**. IJCSI International Journal of Computer Science Issues, Vol. 7, Issue 1, No. 3. Janeiro de 2010

DHS – Department of Homeland Security. Smart Border Alliance. RFID Feasibility Study Final Report. Disponível em http://www.dhs.gov/xlibrary/assets/foia/US-VISIT_RFIDattachD.pdf. Acesso em 5 de agosto de 2013.

MOEN, Henrik L. A Study of Wi-Fi RFID Tags in Citywide Wireless Networks. Norwegian University of Science and Technology. Department of Telematics. 2007. Disponível em <<http://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/003/3621/masteroppgave.pdf>>. Acesso em 13 de agosto de 2013.

SHEPARD, S. RFID Radio Frequency Identification. 2005. USA. ISBN:0-07-144299-5.

NIGAM, Aakash; JAIN, Anubhav; BANDOPADHAYA, Somprakash. **RTLS based Intelligent Transport System for BRTS using RFID & IEEE802.15.4 modeled Wireless Mesh Networking**. Proceedings of Conference on Mobile and Pervasive Computing 2010. National Institute of Technology Durgapur, Indian Institute of Technology Bombay, Indian Institute of Management Calcutta. 2010.

KENNEY, John. **Dedicated Short Range Communication (DSRC) Applications Tutorial**. Toyota Info Technology Center. 2013.

MILLER, Harvey J.; SHAW, Shih-Lung. **Geographic Information Systems for Transportation**. Oxford University Press. ISBN 0-19-512394-8. 2001.

RITA – Research and Innovative Technology Administration. U.S. Department of Transportation. Disponível em http://www.its.dot.gov/DSRC/dsrc_faq.htm Acesso em 23 de abril de 2013.

YIN, J. et al - Performance Evaluation of Safety Applications over DSRC Vehicular Ad Hoc Networks. Proceedings of the 1st ACM international workshop on Vehicular ad hoc networks 2004, Philadelphia, PA, USA, P. 1 – 9. 2004.

MAHDIEH, Bo Li; MIRHASHEMI, Sadat; LAURENT, Xavier; GAO, Jinzi. *Wireless Access for Vehicular Environments*. 2012

YUNXIN, Li. An Overview of the DSRC/WAVE Technology. NICTA - Australia's Information Communications Technology (ICT) Research Centre of Excellence. Disponível em <http://www.nicta.com.au/pub?doc=4390>. Acesso em 28 de Agosto de 2013.

HU, Yangqing; ZHANG, Wei; LI, Yang; XIONG Peng. **The Research of WAVE Architecture Based Vehicles to Vehicles Communication Technology of Intelligent Transport System**. Second International Conference on Power Electronics and Intelligent Transportation System. 2009. Disponível em <ftp://ftp.cs.ntust.edu.tw/yhl/mobile12/vanet/wavegood-intro.pdf>. Acesso em 27 de Agosto de 2013.

RANJAN, Prabhakar; AHIRWAR, Kamal K. Comparative Study of VANET and MANET Routing Protocols. Proc. of the **International Conference on Advanced Computing and Communication Technologies** (2011). Department of Computer Science & Engineering, Amity University, Noida. Disponível em <http://rgconferences.com/proceed/acct11/pdf/053.pdf>. Acesso em 27 de Agosto de 2013.

PAUL, Bijan; IBRAGIM, Md; BIKA, Abu. VANET Routing Protocols: Pros and Cons. *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887). Volume 20– No.3, Abril de 2011. Disponível em <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.1201.pdf>. Acesso em 25 de Agosto de 2013.

USDD – United States Department of Defense. Global positioning system standard positioning service performance standard. 4th Edition. Setembro de 2008. Disponível em <http://www.gps.gov/technical/ps/2008-SPS-performance-standard.pdf>. Acesso em 29 de Agosto de 2013,

CHEN, Benny P.C. *The Applications of GPS on Intelligent Transportation Systems*. Institute of Transportation, MOTC, Chinese Taipei. Disponível em www.apecgit.org. Acesso em 30 de Agosto de 2013.

SARAIVA, Filipe O.; SOUSA, Aldir S.; NOBUHIRO, Eduardo. Implementação distribuída do algoritmo de dijkstra através de sistemas multiagentes. X SBAI – Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente. Setembro de 2011. São João del-Rei - MG – Brasil. Disponível em <http://fei.edu.br/sbai/SBAI2011/85907.pdf>. Acesso em 30 de Agosto de 2013.

CET-SP. Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. Disponível em < <http://www.cetsp.com.br/> >. Acesso em 03 de junho de 2013.

ANDREWS, Jeffrey G.; GHOSH, Arunabha; MUHAMED, Rias. **Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking**. 2008.

LEURENT, Fabien; AGUILÉRA, Vincent. An atomic dijkstra algorithm for dynamic shortest paths in traffic assignment. Disponível em <http://www.iasi.cnr.it/ewgt/16conference/ID109.pdf>. Acesso em 30 de Agosto de 2013.

CHU-HSING Lin; JUI-LING Yu; JUNG-CHUN Liu; WEI-SHEN Lai; CHIA-HAN Ho. **Genetic Algorithm for Shortest Driving Time in Intelligent Transportation Systems**. International Journal of Hybrid Information Technology Vol. 2, No. 1, Janeiro de 2009.

SINGH, Leena; TRIPATHI, Sudhanshu; ARORA, Himakshi. **Time Optimization for Traffic Signal Control Using Genetic Algorithm**. International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol 2, No. 2, Novembro de 2009.

TAHILYANI, Shailendra; DARBARI, Manuj; SHUKLA, Praveen K. **A New Genetic Algorithm Based Lane-By-Pass Approach for Smooth Traffic Flow on Road Networks**. (IJARAI) International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence, Vol. 1, No. 3, 2012.

S. XU; J. C. BEAN. **A Genetic Algorithm for Scheduling Parallel Non-identical Bath Processing Machines in Computational Intelligence in Scheduling**. P. 143-150. 2007.

DORIGO, Marco; STÜTZLE, Thomas. **The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances**. Technical Report IRIDIA-2000-32. Disponível em <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.123.9732&rep=rep1&type=pdf>. Acesso em 1 de setembro de 2013.

WOOLDRIDGE, M. **An Introduction to multiagent systems**, Wiley, England. 2009.

AL-KHATEEB, Khalid; JOHARI, Jaiz A. Y. **Intelligent Dynamic Traffic Light Sequence Using RFID**. Electrical and Computer Engineering Department, Faculty of Engineering. International Islamic University Malaysia, Kuala Lumpur, Malaysia. Disponível em http://irep.iium.edu.my/5732/1/Intelligent_Dynamic_Traffic_Light_Sequence_Using_RFID.pdf. Acesso em 1 de setembro de 2013.

MENON, Gopinath; GUTTIKUNDA, Sarath. **Electronic Road Pricing: Experience & Lessons from Singapore**. 2010. Disponível em <http://www.cleanairinstitute.org/cops/bd/file/gdt/65-TDM-SIM-33-2010-ERP-Singapore-Lessons.pdf>. Acesso em 1 de setembro de 2013.

BIESEKER, Keith; FOREMAN, Elizabeth; JONES, Kevin; STAPLES, Barbara. **INTELLIGENT TRANSPORTATION SYSTEMS**. Information Security Analysis. U.S. Department of Transportation. Federal Highway Administration. Novembro de 1997. Disponível em <http://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/jpo98009/itssecanalysis.pdf>. Acesso em 2 de setembro de 2013.

MAPLINK. Estatísticas do Trânsito em Curitiba. Disponível em: <http://www.maplink.com.br/PR/curitiba/Estatisticas> Acesso em 23 de setembro de 2013.

KOST, Martin; DZIKOWSKI, Raffael; FREYTAG, Johann-Christoph. **PeRA: Individual Privacy Control in Intelligent Transportation Systems**. Disponível em <http://www.btw-2013.de/proceedings/PeRA%20Individual%20Privacy%20Control%20in%20Intelligent%20Transportation%20Systems.pdf>. Acesso em 2 de setembro de 2013.

HOH, Baik; GRUTESER, Marco; XIONG, Hui; ALRABADY, Ansaf. Enhancing Security and Privacy in Traffic-Monitoring Systems. IEEE CS. IEEE ComSoc. 2006. Disponível em http://research.nokia.com/files/hoh_trafficmonitoring.pdf. Acesso em 3 de setembro de 2013.

GARMIN International Inc. GPS Guide for begginers. 2000. Disponível em http://www.mwri.gov.eg/PDF_files/GPS-for-Beginners.pdf. Acesso em 28 de Agosto de 2013.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Dados das Cidades. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/xtras/perfil.php?codmun=410690>. Acesso em 23 de setembro de 2013.

CISCO. Dynamic Frequency Selection. Cisco Systems Inc. 2008. Disponível em: <http://www.cisco.com/en/US/docs/routers/access/3200/software/wireless/RadioChannelDFS.pdf> Acesso em 23 de setembro de 2013.

YANG, Dong; XU, Youzhi; GIDLUND, Mikael. Wireless Coexistence between IEEE 802.11- and IEEE 802.15.4-Based Networks: A Survey. International Journal of Distributed Sensor Networks. Volume 2011 (2011), Article ID 912152. 2011. Disponível em: <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2011/912152/> Acesso em 23 de setembro de 2013.

KEONG, Chin k. Road Pricing Singapore’s Experience. Imprint-Europe. Implementing Reform in Transport Effective Use of Research on Pricing in Europe. An European Commission funded Thematic Network. 2004. Disponível em: http://www.imprint-eu.org/public/Papers/IMPRINT3_chin.pdf. Acesso em 23 de Setembro de 2013.

KUKOLEV, Pavel. Comparison of 802.11a and 802.11p over Fading Channels. VOL.4, NO.1, APRIL 2013. Faculty of Electrical Engineering and Communications, Brno University of Technology. 2013.

WUNDERLICH, K. E. “An Assessment of Pre-Trip and en route ATIS Benefits in a Simulated Regional Urban Network”, in the 3rd world Congress on Intelligent Transport Systems, Intelligent Transportation: Realizing the Future, Orlando, Florida, 1996.