



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA**

CLÁUDIO ROGÉRIO GOMES DA SILVA

**MECANISMO DISTRIBUÍDO PARA SELEÇÃO
DE CANAIS EM REDES VEICULARES
COGNITIVAS**

BELÉM-PA

Julho / 2014

CLÁUDIO ROGÉRIO GOMES DA SILVA

**MECANISMO DISTRIBUÍDO PARA SELEÇÃO DE CANAIS
EM REDES VEICULARES COGNITIVAS**

Dissertação submetida à banca julgadora na
Universidade Federal do Pará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Elétrica

Orientador: Dr. Eduardo Cerqueira

BELÉM-PA

Julho / 2014

CLÁUDIO ROGÉRIO GOMES DA SILVA

**MECANISMO DISTRIBUÍDO PARA SELEÇÃO
DE CANAIS EM REDES VEICULARES
COGNITIVAS**

Dissertação submetida à banca julgadora na
Universidade Federal do Pará como parte dos
requisitos para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Elétrica

Aprovada em: --/--/----

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eduardo Cerqueira
Universidade Federal do Pará
Orientador

Prof. Dr. Aldebaro Klautau
Universidade Federal do Pará

Profa. Dra. Michele Nogueira
Universidade Federal do Paraná

“O Homem age com maior impulso quando está disposto a alterar o seu modo de viver e pensar, a fim de melhor se adaptar à realização desejada.”

Alberto Montalvão

Agradecimentos

Em primeiro lugar a Deus por cada dia de vida e pela oportunidade de vivenciar a obtenção de novos conhecimentos e experiências durante o período da pós-graduação.

Ao meu pai, Clodomir José da Silva, pela palavra; minha mãe, Maria Conceição Sousa Gomes, pela força; meu irmão, Fabrício Gomes da Silva, pela vontade; minha irmã, Jocileide Sousa Gomes, pela coragem; minha tia Maria do Socorro Sousa Gomes pela sensibilidade e meu avô, Floriano Silva, pela humildade. Agradeço também aos demais familiares, que em algum momento de dificuldade deram total apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Eduardo Cerqueira, pela oportunidade de realizar esse trabalho, recursos disponibilizados, idéias, conversas, conselhos, apoio global e paciência. Além disso, a oportunidade de experiência acadêmica em Curitiba.

Ao Prof. Dr. Aldri Santos, pelo método, psicologia, filosofia de trabalho e pelo acolhimento durante minha estadia em Curitiba.

À Profa. Michele Nogueira, pelo profissionalismo, conselhos, franqueza e paciência durante esse trabalho.

Ao GERCOM (Grupo de Estudos em Redes de Computadores e Comunicação Multimídia), pela colaboração significativa ao amadurecimento acadêmico.

Aos grandes amigos e parceiros de trabalho dos laboratórios GERCOM e NR2 (Alisson P, Adalberto M, Carlos J, Christian V, Danilo F, Denis R, Douglas B, Fernando G, Leonardo M, Metuzalen, Ricardo M, Robson C, Rodrigo C, e demais contribuintes que não recordo os nomes), pela troca de experiência, conhecimento e descontração em momentos de desespero!

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo suporte financeiro.

E por fim, mas não menos importante agradeço também ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica PPGEE/UFPA, pela oportunidade do Mestrado.

Resumo

Resumo da Dissertação apresentada à UFPA como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Mecanismo Distribuído para Seleção de Canais em Redes Veiculares Cognitivas

Orientador: Dr. Eduardo Cerqueira

Palavras-chave: Redes Veiculares; Rádio Cognitivo; Seleção de canal

As aplicações de segurança, controle e entretenimento em redes veiculares demandam fortes compromissos de comunicação, incluindo a confiabilidade na entrega dos dados. Garantir a confiabilidade é um enorme desafio devido às variações nas condições da rede geradas pela alta mobilidade dos veículos. Propostas existentes para alcançar a confiabilidade em redes veiculares gerenciam a mobilidade, mensagens ou recursos. Porém, elas não tratam simultaneamente o problema de acesso ao meio. Com isso, este trabalho apresenta MOCA, um Mecanismo distribuído para seleção de Canais em redes veiculares cognitivas. O MOCA explora tecnologias de acesso dinâmico ao espectro e prevê melhorias na conectividade para aumentar a eficiência na entrega dos dados. Ele emprega informações representativas dos nós da rede e da mobilidade para classificar e selecionar os melhores canais de comunicação. Para avaliação, o MOCA é comparado por simulações com o *TCP Friendly Rate Control - Cognitive radio* (TFRC-CR) diante de cenários representativos de ambientes urbanos. Os resultados demonstram que o MOCA melhora em relação as métricas de tempo de conectividade, PDR e redução do *jitter*. No cenário, por exemplo, de avaliação da variação da complexidade dos UPs, o MOCA obteve 5% e 7% de melhorias médias em relação ao PDR e *jitter*, respectivamente. Em relação à conectividade, o MOCA conseguiu melhorar em média 20% o tempo total e resultados semelhantes para a quantidade de troca de canais.

Abstract

Abstract of Dissertation presented to UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Electrical Engineering.

Distributed Mechanism for Selecting Channels in Cognitive Vehicular Networks

Advisor: Dr. Eduardo Cerqueira

Key words: Vehicular Networks; Cognitive Radio; Channel Selection

Safety, control, and entertainment are applications in vehicular networks that present strong communication constraints, including reliability in data delivery. Ensuring reliability is a huge challenge due to variations in network conditions generated by the high mobility of vehicles. Existing proposals to achieve reliability in vehicular networks manage mobility, messages, and resources. However, they did not address simultaneously the medium access problem. Hence, this work presents MOCA, a distributed Mechanism for selecting channels in Cognitive vehiculAr networks. It explores dynamic spectrum access technologies and provides improvements in connectivity for more efficient data delivery. It employs representative information from network nodes and mobility to classify and select the best communication channels. For evaluation, MOCA is compared by simulations with TCP Friendly Rate Control - Cognitive radio (TFRC-CR) under representative scenarios of urban environments. Results demonstrate that MOCA improves around the throughput, connectivity time, and reduces jitter. In the evaluation of the variation of the complexity of UPs scenario, MOCA has average improvement 5% and 7% over the PDR and *jitter*, respectively. Regarding connectivity, MOCA has improved on average 20% of the total time and similar results for the amount of channel switching.

Sumário

RESUMO	p. v
ABSTRACT	p. vi
LISTA DE SIGLAS	p. x
LISTA DE SÍMBOLOS	p. xi
LISTA DE FIGURAS	p. xiii
LISTA DE TABELAS	p. xiv
1 Introdução	p. 1
1.1 Problema	p. 2
1.2 Objetivo Geral	p. 3
1.2.1 Objetivos específicos	p. 4
1.3 Estrutura da proposta.....	p. 4
2 Fundamentos	p. 5
2.1 Redes Veiculares	p. 5
2.1.1 Comunicação entre veículos com infraestrutura- V2I	p. 6
2.1.2 Comunicação entre veículos - V2V	p. 7
2.2 Redes de rádio cognitivo.....	p. 8

2.2.1	Modelo de gestão de acesso descentralizado ao espectro	p. 10
2.2.1.1	Sensoriamento do espectro	p. 11
2.2.1.2	Compartilhamento do espectro.....	p. 12
2.2.1.3	Mobilidade do espectro	p. 12
2.2.1.4	Seleção do espectro.....	p. 12
2.3	Resumo	p. 13
3	Trabalhos Relacionados.....	p. 14
3.1	Gestão do espectro de acordo com a atividade dos UPs	p. 14
3.2	Gestão do espectro de acordo com os requisitos dos USs	p. 17
3.3	Resumo	p. 19
4	MOCA.....	p. 20
4.1	Mecanismo distribuído para seleção de canais em redes veiculares cognitivas	p. 20
4.1.1	Classificação	p. 22
4.1.2	Seleção	p. 23
4.1.3	Predição.....	p. 23
4.1.4	Adaptação	p. 25
4.2	Resumo	p. 26
5	Avaliação.....	p. 27
5.1	Análise 2^k fatorial	p. 27
5.2	Validação.....	p. 29
5.3	Descrição de avaliação.....	p. 30
5.4	Resultados.....	p. 31
5.4.1	Avaliação da sensibilidade de seleção do canal	p. 31
5.4.2	Avaliação da complexidade dos UPs	p. 32
5.4.3	Avaliação da mobilidade dos USs	p. 33
5.4.4	Avaliação densidade dos USs	p. 34
5.5	Resumo	p. 35
6	Conclusões e Trabalhos Futuros.....	p. 36

6.1	Trabalhos futuros	p.37
6.2	Publicações relacionadas	p.37
6.3	Publicações correlacionadas	p.38
	Referências	p.39

Lista de Abreviaturas

V2V	Comunicação entre veículos
V2I	Comunicação entre veículos com infraestruturas
RC	Rádio cognitivo
VANETs	<i>Veicular ad-hoc networks</i>
QoS	Qualidade de Serviço
QoE	Qualidade de Experiência
RSS	<i>Residual strength signal</i>
BER	<i>Bit error rate</i>
MOCA	Mecanismo distribuído para seleção de canais em redes veiculares cognitivas
ITS	<i>Intelligent transport systems</i>
V2V	Comunicação entre veículos
V2I	Comunicação entre veículos com infraestruturas
SDR	<i>Software defined radios</i>
RF	Rádio frequência
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
DSA	<i>Dynamic spectrum access</i>
UP	Usuário primário
US	Usuário secundário
PCTC	<i>A distributed prediction-based cognitive topology control</i>
DoA	<i>Direction of Arrival</i>
TFRC-CR	<i>TCP Friendly Rate Control - Cognitive radio</i>
VANET QoS-OLSR	<i>QoS-based clustering protocol for Vehicular Ad hoc Networks</i>
SURF	<i>A distributed channel selection strategy for data dissemination in multi-hop cognitive radio networks</i>
PDR	<i>Packet Delivery Ratio</i>

Lista de Simbolos

α	Ponderação de mobilidade utilizado na Equação 4.1
β	Ponderação da característica do canal utilizado na Equação 4.1
γ	Ponderação de direção eficiente utilizado na Equação 4.1
ψ	Ponderação de velocidade utilizado na Equação 4.4
ϕ	Ponderação da distância utilizado na Equação 4.4

Lista de Figuras

Figura 1	Modelos de comunicação em VANETs	7
Figura 2	Estratégia de uso do espectro pelos USs	10
Figura 3	Modelo de gestão do espectro por RC [17]	10
Figura 4	Fundamentos de informações para prover qualidade de canal em VANETs	21
Figura 5	Funcionalidades do mecanismo distribuído de seleção de canais	22
Figura 6	Funcionalidade de adaptação	26
Figura 7	Avaliação de QoS pela validação	29
Figura 8	Avaliação de QoS pela variação da sensibilidade de seleção de canal ...	31
Figura 9	Avaliação de QoS pela variação da complexidade de uso por UPs	32
Figura 10	Avaliação da conectividade pela variação da complexidade de uso por UPs	33
Figura 11	Avaliação de QoS pela mobilidade dos nós	33

Figura 12	Avaliação da conectividade pela variação da mobilidade dos USs	34
Figura 13	Avaliação de QoS pela densidade de US	34
Figura 14	Avaliação da conectividade pela variação da densidade dos USs	35

Lista de Tabelas

Tabela 1	Resumo das características dos trabalhos relacionados	19
Tabela 2	Resultados obtidos das simulações da análise 2^k fatorial	28
Tabela 3	Parâmetros de Simulação para validação	29
Tabela 4	Parâmetros de Simulação	30

CAPÍTULO 1

Introdução

As aplicações inteligentes para sistemas de transportes tornam-se parte de nossas vidas [1, 2]. Essas aplicações alertam os condutores e passageiros sobre a existência de possibilidades de congestionamento do tráfego, protestos ou interdições em áreas urbanas ou rodovias próximas através da disseminação de áudios/vídeos ou dados escalares.

De modo geral, essas aplicações dão assistência aos condutores e passageiros provendo informações de segurança, controle e entretenimento. Contudo, essas aplicações geram um grande fluxo de comunicação entre os dispositivos (nós) da rede a fim de alcançar um nível confiável de entrega dos dados [3].

A comunicação em redes veiculares segue dois modelos básicos: a comunicação entre veículos (V2V) e entre veículos e uma infraestrutura de suporte (V2I) [3, 4, 5]. Em cenários V2V, há grande variabilidade na conectividade devido à alta mobilidade dos nós afetando a confiabilidade e a conectividade. A confiabilidade está intrínseca à seleção de um canal apropriado ao nó. Desse modo, o acesso ao meio de comunicação apresenta instabilidade, impedindo o provimento de boa confiabilidade na comunicação para os requisitos dessas aplicações [6].

Nesse sentido, os trabalhos existentes na literatura abordam diferentes soluções com o objetivo de alcançar confiabilidade e eficiência na entrega dos dados. Em geral, esses trabalhos empregam gerência de recursos, mobilidade ou mensagens para indiretamente prover melhorias na confiabilidade ou eficiência. Entretanto, essas abordagens não tratam do problema principal de conectividade, pois agem mas de próprias gerências, aludindo que a confiabilidade e a eficiência de entrega dos dados tornam-se consequências. Outras propostas agem diretamente sobre a gerência do uso do canal. Porém, essa gerência ainda não apresenta resultados eficientes em ambientes de alta dinamicidade pois necessitam utilizar critérios relevantes nesses cenários [5].

A comunicação em áreas urbanas e rodovias é extremamente afetada no tempo e espaço pela variação das características dos canais [7]. Essa variação está dependente da mobilidade dos nós e da presença de obstáculos. Com isso, a alta mobilidade dos veículos dificulta na boa qualidade de transmissões, diminuindo a obtenção de confiabilidade de conectividade.

O acesso dinâmico ao espectro pode prover melhorias de conectividade, aproveitando-se de canais do espectro disponíveis repentinamente. Soluções existentes utilizam informações sobre o canal ou sobre requisitos do usuário para realizar decisões de uso. No entanto, necessita-se de outras informações representativas para se obter maior qualidade e confiabilidade [8, 7].

A tecnologia de rádio cognitivo (RC) é um modelo de comunicação sem fio que permite melhor aproveitamento do espectro de comunicação [9, 8]. Assim, o RC permite que as VANETs obtenham um aumento da confiabilidade de transmissão e na entrega dos dados. Essa tecnologia permite que um dispositivo de comunicação sem fio seja autônomo com habilidades de autoconfiguração e adaptação de parâmetros de transmissão e recepção. A autoconfiguração e adaptação são realizadas a partir de funcionalidades dessa tecnologia: sensoriamento, seleção, compartilhamento e mobilidade do espectro [10]. Esses conceitos são estendidos para as redes cognitivas, os quais são formados por dispositivos que compartilham o uso do espectro e adaptam-se para prover melhor aproveitamento do espectro e assim.

Esses conceitos são estendidos para as redes de rádio cognitivos, ou redes cognitivas, os quais são formados por dispositivos que compartilham o uso do espectro e adaptam-se dinamicamente para prover melhor aproveitamento do espectro. As redes cognitivas são caracterizadas por dois tipos de usuários: (i) os usuários primários que têm licenças das bandas espectrais e maior prioridade para acessar esses canais, e (ii) os usuários secundários que não têm licenças, mas podem usar estas bandas, quando elas estão ociosas. Os usuários primários realizam um tipo de transmissão de serviços licenciados, como TV, rádio (AM, FM) e outros. Eles têm privilégio no uso da faixa espectral (canal) a qualquer momento. Entretanto, os usuários primários geram ociosidade dentro da banda espectral como espaços em branco, os quais podem ser aproveitados pelos usuários secundários. Dessa forma, os usuários secundários realizam transmissões utilizando um canal para difundir sua informação. Devido a essas características e benefícios, as redes cognitivas são motivadas para ambientes com alta dinamicidade.

1.1 Problema

As redes veiculares *ad-hoc* (da língua inglesa, *veicular ad hoc networks* - VANETs) apresentam altas variações de conectividade. Essas variações estão condicionadas à mobilidade, concorrência dos nós pelo uso do canal e pelo ambiente urbano composto principalmente por prédios e construções. Dessa forma, as VANETs não dispõem de muitas opções para manter um nível de conectividade contínuo com o tempo. Com essa

variação, as aplicações dos usuários não tem seus requisitos atendidos a todo momento. Esses requisitos são Qualidade de Serviço (QoS) ou Qualidade de Experiência (QoE). Portanto, a qualidade requisitada pelas aplicações do usuário não será atendida.

As tecnologias de acesso dinâmico ao espectro, como a tecnologia de rádio cognitivo, solucionam parte do problema de acesso ao meio nas VANETs. Essas tecnologias disponibilizam acesso aos usuários de maneira dinâmica e oportunística. O RC, por exemplo, inicialmente avalia os canais acessíveis aos usuários por meio da caracterização dos mesmos, fundamentada em métricas como: força do sinal recebido (da língua inglesa, *residual strength signal* - RSS), interferências e taxa de erro de bits (da língua inglesa, *bit error rate* - BER). Contudo, as características dos canais apresentam variações relacionadas às condições da rede impactando na qualidade de distribuição do conteúdo nos canais. Portanto, é necessário avaliar a qualidade do canal constantemente a fim de perceber sua degradação e proativamente realizar uma possível seleção do canal que mantenha a qualidade necessária ao usuário [10].

A principal discussão sobre a utilização de múltiplos canais consiste na estratégia de seleção de canais a fim de obter a qualidade requisitada para cada usuário e suas aplicações. Essa seleção pode ser de dois tipos: centralizada ou descentralizada. No modelo de seleção centralizada, uma entidade central é responsável por selecionar um canal para os nós. Em uma relação descentralizada, cada nó é responsável pela sua estratégia de seleção de utilização do canal. Além disso, esse modelo de seleção descentralizada apresenta baixa complexidade computacional e de comunicação comparado ao modelo centralizado [5].

Impor eficiência e confiabilidade ao processo de seleção de canais em VANETs é um grande desafio. Considerando a dinamicidade e suas influências na conectividade, esse ambiente concentra inúmeras indecisões e possibilidade de uso do canal ao usuário [6]. Dessa forma, a seleção necessita de flexibilidade e adaptação dessas variações do ambiente para atender aos requisitos das aplicações.

1.2 **Objetivo Geral**

Este trabalho tem como principal objetivo prover melhorias na conectividade e confiabilidade na entrega dos dados às aplicações dos usuários secundários através de uma melhor qualidade de utilização do canal com base em um mecanismo de seleção de canal dinâmico. Para alcançar esse objetivo é proposto um Mecanismo distribuído para seleção de Canais em redes veiculares cognitivas (MOCA). Para isso, esse mecanismo utiliza a tecnologia de rádio cognitivo como motivação em redes veiculares.

O mecanismo segue uma abordagem descentralizada de seleção de canal por meio da tecnologia de RC. Cada nó seleciona o canal disponível com base nos requisitos de suas aplicações com objetivo de aumentar o tempo de conectividade e a confiabilidade na entrega dos dados. A seleção de canal é realizada periodicamente e proativamente para prever a qualidade do canal em um futuro próximo, prevenindo a possibilidade de trans-

tornos de qualidade do canal utilizado. Esse mecanismo utiliza informações de canais, de veículos e direção eficiente. Devido à alta dinamicidade de mobilidade dos nós, os critérios utilizados apresentam diferentes níveis de importâncias no decorrer do tempo. Assim, o MOCA apresenta um processo de adaptação que aperfeiçoa os critérios mais relevantes a cada instante e pondera seus valores, tornando-o dinâmico e proativo à dinamicidade dos nós.

1.2.1 Objetivos específicos

Esta seção irá apresentar os objetivos específicos desta dissertação, onde os mesmos são apresentados a seguir:

- Prover uma melhor conectividade e eficiência na entrega dos dados
- Prover melhor desempenho na taxa de entrega e de atraso dos dados
- Dispor dinamicamente o melhor canal a ser selecionado
- Prever a qualidade do canal selecionado
- Adaptar os critérios dinamicamente

1.3 Estrutura da proposta

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. O Capítulo 2 apresenta os fundamentos da tecnologia de redes veiculares cognitivas. Ele enfatiza o funcionamento das redes ad-hoc de rádio cognitivo em redes veiculares e relata suas características. O Capítulo 3 descreve os trabalhos relacionados. Nele são descritos as abordagens utilizadas por protocolos e mecanismos de decisão. O Capítulo 4 apresenta o Mecanismo distribuído para seleção de Canais em redes veiculares cognitivas (MOCA). Além disso, descrevem-se os detalhes das funcionalidades do MOCA. O Capítulo 5 avalia o uso do mecanismo MOCA e analisa seus resultados. Por fim, o Capítulo 6 introduz as considerações finais e os trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Fundamentos

Este capítulo aborda os fundamentos das redes veiculares cognitivas. Os avanços dessas redes têm habilitado a possibilidade de novos serviços com habilidades de uso espectral oportuno pelo uso do rádio cognitivo [11]. Dessa forma, a Seção 2.1 descreve características das redes veiculares e sua necessidade por tecnologias que dêem melhor suporte a suas aplicações. A Seção 2.2 o uso da tecnologia de rádio cognitivo como solução que garanta os requisitos necessários as aplicações dos usuários.

2.1 Redes Veiculares

Os sistemas de transportes inteligentes (da língua inglesa, *intelligent transport systems* – ITS) são sistemas com a integração entre as tecnologias de telecomunicações e de informação para prover segurança, conforto e entretenimento ao sistema de transportes [7]. Os ITS incluem várias aplicações como: monitoramento de tráfego cooperativo, controle de fluxos de veículos, prevenções de colisões, controle de fiscalizações, detecção de rotas alternativas, jogos interativos e difusão de vídeos. Essas aplicações comunicam ubiquamente os usuários em vias urbanas e necessitando de eficiência na comunicação veicular.

No que diz respeito à utilização das VANETs, motoristas, passageiros e autoridades (por exemplo, paramédicos e bombeiros) devem ser capazes de receber, compartilhar e transmitir vídeos em tempo real sobre as condições dos veículos e das ruas/pistas, acidentes, situações de perigo ou mesmo catástrofes naturais ao longo do caminho a ser percorrido com qualidade de serviço assegurada. Fluxos de vídeo transmitem informações mais precisas do que simples mensagens de texto ou dados escalares, assim como permitem a tomada de decisão mais eficiente por parte de condutores ou equipes de resgate/apoio. Além disso, o mercado de entretenimento pretende usar conteúdos multimídia para au-

mentar as receitas com as redes veiculares, fornecendo soluções mais adequadas desse segmento para atender essa importante demanda.

Sistema de alerta sobre colisões, por exemplo, o veículo detecta o risco de possíveis colisões em vias urbanas como: colisões laterais, frontais ou traseiras. Assim, transmite informações para outros veículos a fim de diminuir esse risco.

Em sistemas de emergência, o veículo dispara uma emergência para a polícia, bombeiros ou para algum sistema de saúde. Os demais veículos recebem esse sinal de emergência e disseminam essa informação corrente para seus vizinhos atuais. Essa informação é cooperada até o destino.

Em sistemas de condições de tráfego, algum veículo detecta uma evolução do tráfego de carros atuais e informa para os outros veículos. Essa informação pode ser retransmitida e os outros veículos que recebem essa informação podem atualizar uma rota de percurso para diminuir desagradados em vias urbanas.

As VANETs se diferenciam de outras redes sem fio principalmente pela natureza dos nós, que são compostos por automóveis, caminhões, ônibus etc., com interfaces de comunicação sem fio, e por equipamentos fixos no entorno das vias. Os nós dessas redes apresentam alta mobilidade e trajetórias que acompanham os limites das vias públicas de acesso.

As VANETs são redes compostas por veículos que se comunicam de duas maneiras: a comunicação entre veículos (V2V) e entre veículos e uma infraestrutura de suporte (V2I) conforme a Figura 1. Em comunicação V2I, os nós realizam comunicações por meio de infraestruturas disponibilizadas ao ambiente urbano. Essa infraestrutura é responsável pela gerência da comunicação entre os nós. Em comunicação V2V, a comunicação é realizada somente entre os nós da rede. Dessa forma, o controle das conexões entre os nós é feita pelos próprios de maneira dinâmica e distribuída. Por isso, há grande variabilidade na conectividade, pois as decisões dos nós são distintas e os nós possuem alta mobilidade que afetam a confiabilidade e a conectividade dos mesmos [5]. Desse modo, o acesso ao meio de comunicação apresenta instabilidade, dificultando o provimento de boa confiabilidade na comunicação para os requisitos dessas aplicações [6].

2.1.1 Comunicação entre veículos com infraestrutura- V2I

A arquitetura V2I adota a presença de entidades estáticas funcionando como pontos de acesso (AP) na rede. Essas entidades centralizam todo o tráfego da rede, servindo como nós intermediários para as comunicações. A vantagem do modo infraestruturado é o aumento da conectividade e a possibilidade da comunicação com outras redes, como a Internet. Entretanto, essa conectividade da rede só é garantida mediante um grande número de entidades estáticas elevando consideravelmente o custo de instalação e manutenção dessa infraestrutura.

Um dos principais problemas da comunicação V2I é a dificuldade na seleções

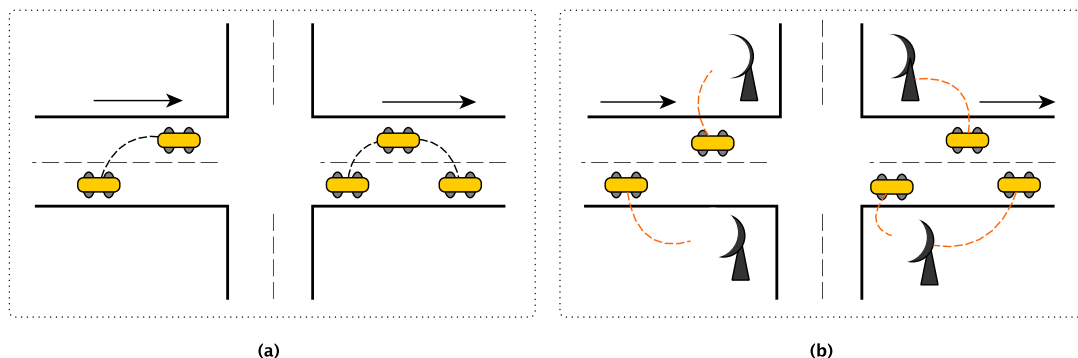


Figura 1: Modelos de comunicação em VANETs

de canais de comunicação para os usuários. Uma vez que os usuários são móveis, essa comunicação necessita alocar canais dinamicamente para usuários individuais em uma certa área de cobertura. Para isso, necessita-se de requisitos de sincronização no tempo, que pode ser alcançado pelo uso de um receptor GPS [12].

2.1.2 Comunicação entre veículos - V2V

Através da comunicação V2V, os veículos realizam comunicação entre os mesmos de maneira *ad-hoc*. Esses nós disseminam informações em ruas e rodovias com seus vizinhos até a chegada da informação ao nó de destino. Dessa forma, esses nós apresentam comunicação flexível e adaptativa às condições da rede. A V2V está em amplo crescimento e proporcionará o desenvolvimento em larga-escala de dispositivos de rede e sistemas computacionais.

A arquitetura V2V é caracterizada pela descentralização das funções na rede, em que os veículos se comunicam entre si sem qualquer infraestrutura que auxilie na comunicação. Para isso, os próprios veículos fazem o gerenciamento dos pacotes na rede, encaminhando-os através de outros veículos por múltiplos saltos. Apesar dessa estrutura de rede ser simples, ela possui a desvantagem de ter sua conectividade dependente da densidade e do padrão de mobilidade dos veículos.

A principal característica das VANETS é alta mobilidade dos nós. Esses nós realizam aceleração, desaceleração abrupta, mudança repentina de direção ou ainda paradas por diversos motivos e com possibilidades de acontecer um longo período de tempo. Com isso, essas características prejudicam comunicação eficiente de padrões atuais de rede de comunicação. Portanto, há inúmeras pesquisas e especificações nesse sentido de oferecer melhor eficiência e qualidade ao usuário em ambientes sem a presença de infraestrutura de comunicação. Os maiores desafios referem-se ao aumento da vazão, diminuição da entrega dos dados e aumentar a qualidade da conectividade enquanto os nós trafegam pelas ruas e avenidas.

As VANETs apresentam características únicas que põem desafios ímpares, comparados as outras redes, relacionados ao: compartilhamento, segurança e disseminação dos dados [13]. Esses serviços disseminam grande fluxo de informação entre os veículos (nós) na rede. Com isso, tem-se o aumento da demanda à comunicação do meio sem fio. Dessa forma, a comunicação em redes veiculares necessita garantir confiabilidade na entrega dos dados.

Além desses, as VANETs possuem uma série de desafios para sua adoção em larga escala. Dentre os principais desafios estão particularidades como a alta mobilidade dos nós, o dinamismo dos cenários e a escalabilidade em termos do número de nós. A perda de conectividade durante a transmissão dos dados e o tempo reduzido em que dois nós permanecem em contato são outros desafios.

2.2 Redes de rádio cognitivo

As VANETs são auto-organizáveis e autogerenciáveis. No entanto, apresentam alta dinamicidade de topologia da rede devido à movimentação dos nós. Além disso, esse tipo de rede geralmente apresenta impedimentos de prover boa qualidade do canal de comunicação e conectividade devido à infraestrutura das vias urbanas contidas por construções e prédios. Dessa forma, essa rede apresenta alta variação de qualidade do canal e consequentemente os requisitos das aplicações do usuário tem altas variações de conectividade, vazão e latência. Portanto, as VANETs necessitam de habilidade para lidar com essas restrições para oferecer continuamente a qualidade requisitada pelos usuários [14].

Nas VANETs, a comunicação é afetada no tempo e espaço pela variação das propriedades dos canais. Essas mudanças afetam tanto a transmissão quanto a recepção dos dados de comunicação trafegados. No sentido de prover melhor eficiência espectral a partir da tecnologia de RC torna-se uma solução gerenciar o uso do canal de maneira dinâmica e oportunística [5, 15]. Essa tecnologia será abordada com mais detalhes na próxima seção. Portanto, as VANETs podem usufruir da tecnologia de RC por meio de eficiência espectral, utilizando canais disponíveis dinamicamente, mantendo os requisitos exigidos pelas aplicações.

Recentes avanços em tecnologias sem fio, como rádios definidos por *softwares* (do inglês, *software defined radios* - SDRs), prometem lidar com algumas das grandes limitações ocorridas em sistemas de comunicação sem fio [11, 16]. Uma dessas limitações é a gestão ineficiente do espectro de rádio frequência (RF) em modo licenciado e não licenciado.

Embora esse modelo garanta comunicação livre de interferências entre os usuários, ele apresenta um modelo de uso ineficiente de gestão do espectro. As atividades do espectro, pelo modo de canais de espectro licenciados, varia de 15% a 85% que dependerá da localização geográfica durante um período de tempo [5]. Com o aumento da demanda dos usuários por novos serviços, há a necessidade de maior eficiência tanto pelas agências reguladoras quanto por tecnologias de acesso ao espectro dinâmico. Em 2003, a Comissão

Federal de Comunicação (da língua inglesa, *Federal Communications Commission* - FCC) dos Estados Unidos propôs um modelo de acesso ao espectro dinâmico (da língua inglesa, *Dynamic Spectrum Access* - DSA). Essa proposta estava condicionada a ameaças de falta de espectro para as tecnologias do futuro. Com o passar dos anos, aumenta-se a preocupação por essa escassez do espectro que leva a novas direções e tendências de utilização do mesmo [5].

Atualmente, o espectro de RF é coordenado por agências reguladoras responsáveis em fixar porções do espectro para usuários individuais pela forma de requisição de licenças renováveis, chamados de usuários licenciados ou primários (UPs). Desse modo, o licenciador disponibiliza uma faixa de espectro para um UP. No entanto, durante um período de tempo o UP pode não utilizar essa faixa de espectro. Com isso, essa faixa de espectro torna-se ociosa durante um período de tempo permitindo o uso desse espectro oportunamente por usuários não licenciados ou usuários secundários (USs) [9].

Ao longo dessas discussões, o RC torna-se uma forte tendência em cenários que apresentem mobilidade, pois otimizam o acesso por meio de uso do espectro oportunu e dinamicamente. O RC é um sistema de comunicação sem fio inteligente capaz de modificar os parâmetros dos transceptores com base em informações externas em que operam. Dessa forma, o RC é visto como uma tecnologia que permite eficiência em DSA [5, 6].

O RC tem como objetivo eliminar as limitações de acesso dinâmico ao espectro das redes tradicionais, permitindo o aperfeiçoamento de uso do espectro e consequentemente o seu desempenho. Para isso, os nós de uma rede de rádio cognitivo realizam adaptações nas configurações de rádio às mudanças no meio de transmissão para obter um melhor aproveitamento de uso do espectro. Contudo, a rede de rádio cognitivo captura as informações do espectro para gerenciar suas ações no mesmo, considerando as atividades dos UPs e USs [6].

A Figura 2 apresenta a funcionalidade de uso do RC em relação às atividades dos UPs e USs. Os USs utilizam o canal de espectro disponível oportunamente. Caso o UP retorne a utilizar um canal licenciado, o US para de utilizar esse canal e realiza novo sensoriamento a fim de procurar novos canais disponíveis. Encontrando a disponibilidade de outros canais, pode utilizá-lo, caso contrário, continua sensoriando o espectro a fim de encontrar canais ociosos.

O processo de utilização eficiente do espectro através de RC pode ser centralizado ou descentralizado. Em modo centralizado, uma entidade central é responsável pela coleta de informações sobre o uso do espectro dos UPs e USs para decidir o canal de uso. As decisões realizadas por entidade central necessitam que os USs enviem suas requisições e que a entidade central indique os canais de uso aos USs. Porém, esse modelo apresenta alto custo de comunicação por concentrar todas as informações recebidas dos USs. Além disso, a entidade central necessita usufruir de uma infraestrutura para consolidar esse modelo. Uma vez que os USs possuem alta mobilidade e que essas informações locais sensoriadas também variam, esse modelo pode não apresentar a melhor solução de otimização de uso do espectro.

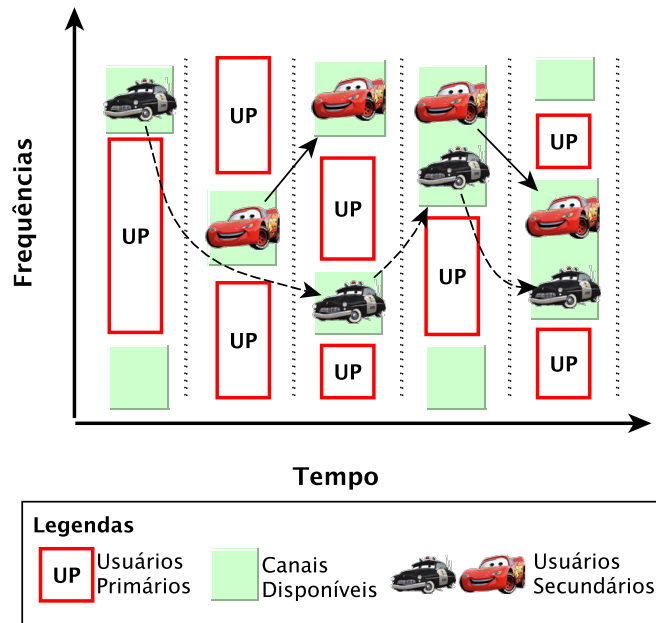


Figura 2: Estratégia de uso do espectro pelos USs

2.2.1 Modelo de gestão de acesso descentralizado ao espectro

O modelo de gestão de acesso dinâmico do espectro, o US realiza sua seleção de canal no espectro independente a partir de informações individuais coletadas. Devido à relevância do trabalho de [17] discutido amplamente na literatura, considera-se que um modelo de gestão dinâmico do espectro consiste de: sensoriamento, seleção, compartilhamento e mobilidade do espectro, como mostra a Figura 3.

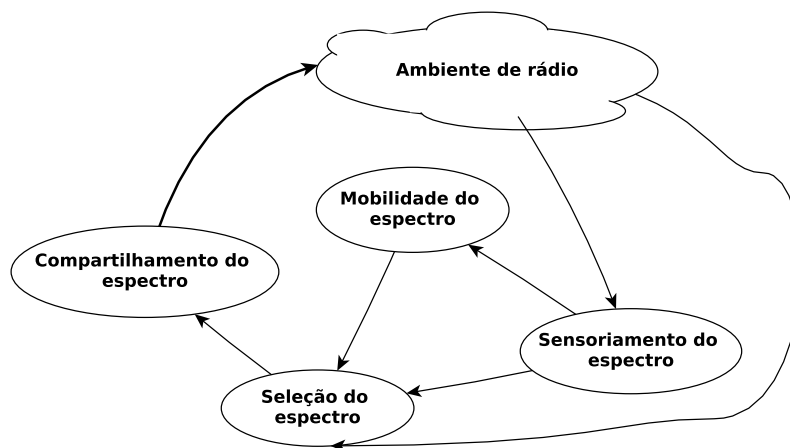


Figura 3: Modelo de gestão do espectro por RC [17]

2.2.1.1 Sensoriamento do espectro

A fase de sensoriamento é responsável em informar aos USs sobre a disponibilidade de canais, faixa de espectro de transmissão, durante um período de tempo. A fase de sensoriamento envolve a identificação das faixas de canais de espectro disponíveis e a habilidade de detectar rapidamente o retorno da atividade do UP em porções ocupadas instantâneas pelos USs. O US utiliza somente as faixas de espectro disponíveis, caso contrário, sensoria o espectro em busca de disponibilidade. Além disso, caso o UP retorne o uso de seu espectro, o sensoriamento detecta essa presença e informa às outras fases para realizarem decisões.

A fase de sensoriamento informa aos USs os canais ociosos em um período de tempo. Dessa forma, essa fase sensoria o espectro em busca de transmissões dos UPs e indica a disponibilidade desses canais. Existem três tipos de sensoriamento do espectro: sensoriamento não cooperativo, cooperativo e baseado em nível de interferência.

O sensoriamento não cooperativo sensoria o espectro e busca de possíveis transmissões dos UPs com base em informações locais. Assim, cada US é responsável pelo sensoriamento o espectro e pela avaliação das medições locais em um instante de tempo. Essas avaliações podem ser por filtros de detecção de sinal, energia de transmissão e ciclos de detecção [9].

Há o problema declarado de presença de um nó oculto que pode acontecer entre os USs e o UP. Nesse caso, considera-se que o US não pode detectar a presença do UP em distantes áreas geográficas. Com isso, durante a transmissão de dados de algum US interferirá na transmissão de algum UP. Portanto, esses modelos de sensoriamento do espectro apresentam baixa acurácia de informação ao US. Dessa forma, há modelos de sensoriamento cooperativos que tentam diminuir a incerteza de sensoriamento de uso do canal para o US.

O sensoriamento cooperativo realiza tomada de decisão com base em múltiplos USs. Esses usuários trocam informações sobre a presença ou ausência dos UPs para diferentes localidades. Com isso, o sensoriamento cooperativo pode solucionar o problema de nó oculto e ainda aumentar a certeza de detecção do UP. Porém, essa técnica discorre de grande fluxo de comunicação e recursos computacionais comparada ao sensoriamento não cooperativo [9].

Há abordagens de modelos de sensoriamento a partir de limites de propagação de sinais dos UPs. Dessa forma, o sensoriamento com base em interferências realiza medições do nível de ruído de sinais de transmissão dos UPs. Dessa forma, a partir de um limiar de nível de ruído do canal o US reconhece o UP em modo de disponível ou ocupado para uso.

2.2.1.2 Compartilhamento do espectro

A fase de compartilhamento refere-se ao acesso coordenado pelo canal selecionado aos USs. Dado que existem múltiplos USs em busca de acesso de alguma faixa do espectro, suas transmissões podem ser coordenadas para prevenir colisões, perdas e sobreposições de uso. Essa fase prove a capacidade de compartilhamento do espectro oportuno entre os USs evitando interferências aos UPs. Com isso, o US utiliza os canais ociosos dos UPs em um intervalo de tempo. Caso o UP retorne a utilizar seu canal licenciado, o US deve procurar outro canal disponível para restabelecer transmissão.

O compartilhamento pode ser centralizado ou distribuído. Em relação ao compartilhamento centralizado, uma entidade é responsável pelos procedimentos de alocação e acesso ao US. Nesse modelo de compartilhamento, a entidade central constrói um mapa de alocação de canais por diferentes formas: por cooperação de informações de sensoriamento dos USs ou por meio de outras entidades centrais. No entanto, esse modelo apresenta limitações geográficas, pois essa entidade é responsável por uma determinada área. Além disso, há limitações de disponibilidade de informações aos USs, pois os mesmos competem temporalmente por informações de acesso através dessas entidades. Em relação ao modelo distribuído, cada US é responsável em adquirir informações de políticas locais ou globais para realizar a alocação de canal.

2.2.1.3 Mobilidade do espectro

A fase de mobilidade consiste na habilidade de disponibilizar um canal, por parte do US, quando se detecta a atividade do UP. Após o US selecionar o canal a ser usado, passando-se algum tempo o UP pode retornar suas atividades nesse canal. Portanto, caso um UP seja detectado pela fase de sensoriamento, o US deve deixar imediatamente esse canal e continuar sua comunicação em outro canal. Assim, o US necessita mudar de operação de uso de canal, dito como mobilidade de espectro.

Quando o UP retorna à atividade, outro canal deve ser selecionado para o US, que é realizado durante a fase de seleção. Assim, a fase de mobilidade precisa de um esquema de *handoff* para detectar falha no uso do canal atual e trocar para outro canal de transmissão. Dessa forma, essa fase necessita de colaborações de informações de sensoriamento e seleção [17].

2.2.1.4 Seleção do espectro

O principal objetivo da fase de seleção é controlar o acesso dos USs em canais disponíveis durante o tempo. Esse controle deve garantir qualidade de acesso aos USs. Além disso, esse controle de acesso não deve dificultar as transmissões dos UPs.

A fase de seleção consiste na capacidade de decidir o melhor canal que atenderá as necessidades individuais dos USs [5]. Uma vez identificado os canais disponíveis é essencial que o US utilize o canal mais apropriado para seus requisitos [17]. Para isso, é importante

caracterizar os canais ou informações sobre a atividade de uso do UP. Além disso, o desenvolvimento de seleção deve incorporar funcionalidade dinâmica da característica do espectro e prioridade sobre informações os UPs. Portanto, essa fase é o eixo principal de uso do RC pois é nessa fase que se decide o canal disponível que colabora informações às demais fases.

A seleção pode ser por critérios locais e globais. No caso de informações locais, os USs realizam seleção de modo não cooperativa e distribuída. Na seleção não cooperativa e por informações locais os US são autônomos e independentes pela tomada de decisão de uso do canal. Dessa forma, o US não coopera e recebe informações de outros USs. Portanto, essa estratégia apresenta baixo requisitos de comunicação.

No entanto, em relação a informações globais, os USs realizam cooperação entre os mesmo, podendo ser centralizado em uma entidade ou distribuído. Na estratégia centralizada, há uma entidade central que indica a disponibilidades dos canais disponíveis com base em informações recebidas dos USs e ainda de seu próprio sensoriamento. Em uma estratégia distribuída de cooperação, os USs cooperam informações locais pela rede para que os mesmos possam aperfeiçoar suas decisões de uso do canal.

2.3 Resumo

Este capítulo apresentou os conceitos relacionados ao funcionamento da tecnologia de rádio cognitivo e redes veiculares denominadas redes veiculares cognitivas. Destacaram-se as características das VANETs de modo geral. Em relação à tecnologia de rádio cognitivo foram descritos os modelos, características e funcionalidades existentes dessas redes.

CAPÍTULO 3

Trabalhos Relacionados

Este capítulo tem como objetivo apresentar alguns trabalhos relacionados à gestão da conectividade através da tecnologia de RC. Ele descreve as principais características e o funcionamento de cada trabalho. Dividiu-se em duas seções. A Seção 3.1 relata trabalhos envolvendo a garantia da conectividade com o uso de RC considerando as atividades dos UPs. A Seção 3.2 descreve trabalhos que tratam da gestão da conectividade considerando os requisitos dos USs.

3.1 Gestão do espectro de acordo com a atividade dos UPs

Esta seção descreve soluções que tratam da garantia da conectividade considerando a não impedimento da atividade dos UPs. Além disso, comentam-se as características e necessidades desses trabalhos.

Com o aumento da demanda ao acesso sem fio, a concorrência pela conectividade terá um maior fluxo de comunicação. Com isso, soluções prevendo que haverá escassez do acesso ao meio provêm gestão de recursos inerente ao nó ou ao ambiente de comunicação. Em relação ao ambiente de comunicação, há trabalhos de gestão de acesso aos canais por meio de funcionalidades oportunas de comunicação. Com isso, poder-se-ia acessar o meio por canais disponíveis temporariamente de UPs aos USs [5].

O acesso oportuno ao espectro permite ao US acessar canais quando o UP não está em atividade. Nesse sentido, o desenvolvimento de estratégias de utilização desse espectro deve seguir modelos de gestão de recursos disponíveis na rede e que não afetem a comunicação do UP. Dessa forma, alguns trabalhos realizam a modelagem considerando a dinâmica de atividade do UP. Outros trabalhos assumem que o UP possui uma alta

complexidade de uso, sendo inviável e construção de modelos que o representem e, portanto, partem para a uma abordagem de gestão de recursos disponíveis, que atendam aos requisitos dos USs. Dessa forma, atendem-se os requisitos dos USs e não dificultam a comunicação dos UPs [18].

O trabalho de [19] estuda a otimização de sistemas de comunicação provendo eficiência espectral em cenários com mobilidade. Consideram que o maior desafio é prover boa estimativa da qualidade do canal, que afeta o desempenho desses sistemas. Com base em informações estatísticas analisa o impacto do nível de imperfeição das informações do canal. Dessa forma, ele gerencia a quantidade de *bits* de controle necessários por transmissão.

Apesar desse trabalho considerar importante o critério de mobilidade para a otimização de um sistema. Há outros critérios relevantes que podem incrementar a eficiência de um sistema. A avaliação da qualidade do canal é um critério que indica o quanto um usuário pode usufruir de boa conectividade.

Outros trabalhos realizam a predição de atividade do UP. O trabalho realizado por [20] prediz a atividade do UP por meio do sensoriamento do espectro. Esse sistema necessita de dois rádios de comunicação um para controle e outro para recepção de dados. Para alcançar esse objetivo, modelou a atividade dos UPs como um processo estocástico não estacionário e que os UPs possuem baixa taxa de atividade. Assim, esse trabalho realiza a predição da atividade do UP com base nas características de tráfego e ainda estimar a disponibilidade dos canais durante um período de tempo.

Para alcançar essa predição, esse trabalho considera três casos de predição: quando o UP termina a atividade em um determinado período, o US inicia no mesmo instante. A partir desse ponto, o US avalia a predição de chegada do UP em um tempo predefinido; quando o UP termina a atividade e o US inicia sua transmissão instantes seguintes. Nesse instante o US prediz a chegada do UP com base no tempo disponível em que o UP terminou as atividades e o tempo que o US iniciou; e quando o UP apresenta em atividade, mas o US necessita iniciar alguma transmissão. Nesse caso, o US avalia a predição se o UP deixará o canal em um instante predefinido. Caso o UP ainda permaneça em atividade, o US pesquisa por outros canais disponíveis.

Na mesma perspectiva, o PCTC (*a distributed prediction-based cognitive topology control*) realiza predição de atividade dos UPs em cenários que o USs apresenta baixa mobilidade [21]. Além da predição dos UPs, o PCTC realiza controle dos USs pelo uso do algoritmo de *Dijkstra* para alcançar um aumento de taxas de vazão e atrasos da rede. No entanto, o PCTC não avaliou cenários com alta mobilidade e densidade da rede. Dessa forma, não se pode afirmar que o PCTC apresenta melhorias de resultados em ambientes de alta dinamicidade e densidade de nós.

Para realizar a predição, o PCTC considera um tempo para prever a movimentação do US por uma determinada área próxima de algum UP. Assim, para um determinado instante o PCTC realiza a probabilidade da predição de atividade do UP a partir da predição de movimentação dos USs. Em relação à gerência dos nós, o PCTC

faz pontuações dos nós com base em disponibilidade e falhas de conexão.

O PCTC afirma que o controle dos nós é essencial para prover aumento na capacidade cognitiva. Porém, com o aumento da mobilidade dos nós na rede aumenta-se a complexidade dessa gerência. Assim, aumenta-se as chances de desconectividades, a diminuição da garantia da entrega e ainda o fluxo dos nós é dinâmico. Portanto, modelos que realizam alguma gerência de controle de nós nesses ambientes podem não apresentar um aumento dos resultados de taxas de vazão e atrasos.

A atividade do UP dá indícios que apresenta alta dinamicidade de atividade. Dessa forma, esses UPs tornam-se ativos/inativos em diferentes canais do espectro durante o tempo e com diferentes fluxos de informações. Com isso, aumenta-se a complexidade da oportunidade de uso canal [22].

A mobilidade dos nós desempenha um papel desafiador na análise de VANETs. A movimentação dos nós dita como as conexões entre eles são criadas. Sempre que um nó na rede move-se para uma região diferente, o mesmo providencia uma nova forma de conexão entre a região original para a outra região nova [19]. Nesse sentido, o trabalho de [23] propôs um modelo adaptativo de sensoriamento do espectro distribuído, que os USs com mobilidade compartilham as informações de sensoriamento. Esse sensoriamento dos canais caracteriza-os em disponíveis ou ocupados a partir da métrica de RSS. Para alcançar esse objetivo, utilizou critério de probabilidade condicional de *Bayes* para indicar a disponibilidade do canal e de retorno de uso pelo UP.

No mesmo sentido, o trabalho de [24] realiza sensoriamento do uso do espectro para prover aumento de taxa de vazão e justiça de conectividade. Para alcançar esses objetivos, ele necessita no mínimo dois rádios de comunicação um para identificar os canais e outro para transmissão e recepção. O rádio de identificação de canal é responsável em sensoriar os canais e analisar o nível de atividade informando-os em: disponível, em uso pelo UPs ou em uso pelo USs. Sua principal contribuição é indicar o grau de acurácia na identificação do canal em relação às atividades dos UPs.

Para isso, esse trabalho implementou três possibilidades de estados para o sensoriamento: disponível, ocupado por atividades do UP ou pelo US. Dependendo desses estados, os USs podem realizar diferentes ações. Quando um canal está disponível, o US pode utilizá-lo. Similarmente, se o canal estiver ocupado por USs outros nós podem competir pelo uso do canal. No entanto, quando o UP está em atividades o US deve abandonar o canal atual em uso. Para prover acurácia desses estados, esse trabalho utilizou informações de RSS e direcionado ao algoritmo de *Direction of Arrival* (DoA).

O protocolo *TCP Friendly Rate Control - Cognitive radio* (TFRC-CR) seleciona canais disponíveis com base em informações de uma base de dados sobre a atividades dos UPs. Nesse cenário considera que há três tipos de estados. No Estado I, o nó atualiza a base de dados sobre as informações de atividades dos UPs. No entanto, somente nós com capacidade de geolocalização são capazes de participar desse estado. No Estado II, os nós adquirem informações dos nós que possuem participaram do Estado I. Por fim, o Estado III, os nós realizam sensoriamento do espectro em busca de canais ociosos [25].

Após analisar essas informações dos UPs, o TFRC-CR reconhece os canais disponíveis aos USs. No entanto, esse modelo de seleção de canais utilizado pelo TFRC-CR constitui-se de maneira aleatória.

Apesar do TFRC-CR apresentar adaptação de uso do canal para os US, não considera questões como a variação da qualidade do canal com o tempo. Dessa forma, quando o TFRC-CR seleciona um canal, esse canal apresentará as mesmas características de uso e somente será trocado por outro canal quando o mesmo iniciar uma atividade de uso pelo UP. Além disso, os USs apresentam a necessidade de realizar atualizações às entidades centrais que sensoriam as atividades dos UPs que influencia em alto custo computacional e de processamento. Outro fato é que o TFRC-CR não considera os requisitos dos USs. Dessa forma, os USs não possuem uma abordagem que agregue resultados de confiabilidade particularmente para cada um dos USs.

Abordagens de detecção da disponibilidade e ocupação do canal com base em informações dos canais em ambientes dinâmicos pode indicar decisões incorretas do uso do canal. Alternativamente, o US pode incorretamente escolher um canal disponível embora o canal esteja em uso pelo UP. Além disso, os UPs apresentam níveis de complexidades de atividades diferentes um dos outros. Dessa forma, cada UP pode apresentar taxas de uso do canal diferentes com o tempo e local. Com isso, o sensoriamento da presença ou ausência do UP pode não indicar uma solução de seleção de uso do canal em ambientes dinâmicos [26].

3.2 Gestão do espectro de acordo com os requisitos dos USs

Esta seção descreve soluções que tratam da garantia da conectividade considerando os requisitos dos USs. Dessa forma, esses trabalhos buscaram a garantia de eficiência da conectividade aos USs sem impedir as atividades dos UPs. Além disso, comentam-se as funcionalidades desses trabalhos.

A partir da gestão dos recursos da rede, outros trabalhos realizam a seleção de canal para garantir boa conectividade. O trabalho de [27], seleciona o canal de comunicação com base nas características individuais dos USs. Esse trabalho está fundamentado no conceito que cada canal possui características distintas uns dos outros e que essas propriedades permitem diferentes resultados de taxas de vazão, atraso e tráfego de comunicação. Inicialmente, realiza-se classificação dos canais com base em informações de capacidade do canal. Por seguinte, indica aos USs os canais que atendem os requisitos de suas aplicações.

O trabalho em [28] utiliza o critério de prioridade e classificação de encaminhamento de mensagens dos nós fundamentado na métrica de tempo de conexão para prover qualidade de serviço (QoS). Porém, em ambientes com alta dinamicidade da rede, essa técnica de classificação necessita constantemente de atualizações. Dessa forma, questões como o custo energético ou de processamento são pontos a serem avaliados.

Na perspectiva de prover QoS e estabilidade da rede, o protocolo de encaminhamento de mensagens VANET QoS-OLSR [29] realiza agrupamentos dos nós utilizando a métrica de mobilidade. Esse protocolo utilizou um modelo bioinspirado em formigas para otimizar a comunicação entre os grupos por mensagens de controle. No entanto, como as VANETs apresentam alta sensibilidade em relação à mobilidade e variação da densidade dos nós essa técnica apresenta alta sobrecarga na rede interferindo na confiabilidade de entrega dos dados, pois necessita de excessivas atualizações de informações do ambiente para a tomada de decisões.

O mecanismo distribuído de seleção de canais para disseminação de dados em redes de rádio cognitivo (SURF) [30] apresenta uma seleção de canal com base em uma estratégia de classificação de canal. Assim, cada nó classifica os canais considerando as métricas de atividades dos UPs e densidade de nós nos canais. A cada momento, essa classificação é atualizada e o nó seleciona o melhor canal para realizar uma transmissão. Caso em algum momento essa seleção indique uma estimativa errônea, o SURF adapta-se para futuras decisões. Para isso, o SURF possui um histórico de seleções realizadas e estimativas de uso do canal. Caso tenha acontecido alguma estimativa errônea a classificação atualiza essa informação.

O SURF considera que quanto maior o número de nós em uso no canal melhor será esse canal. No entanto, quanto maior a quantidade de nós em um canal, maior será a concorrência entre nós diminuindo o desempenho de taxa de entrega e atraso dos dados. Dessa forma, o uso dos canais tende a um não equilíbrio entre os mesmos, pois alguns canais apresentam uma grande concentração de nós enquanto outros com baixo número de nós. Portanto, aplicações sensíveis ao atraso dos dados terão resultados não satisfatórios.

A predição de tráfego indica as condições de tráfego em um futuro próximo. No contexto de VANETs, predição de tráfego auxilia na funcionalidade de seleção de canais, pois indica quais canais estarão aptos ao nó em um determinado momento. Dessa forma, o processo de predição auxilia na gestão de seleção de canal considerando diferentes requisitos e objetivos dos nós [6].

O conceito de eficiência espectral obtido pela relação entre a taxa de serviço e uso do canal foi apresentado em [31]. Dessa forma, esse algoritmo prevê a taxa de serviço em um tempo futuro com base nas informações de requisição dos nós com objetivo de melhorar o cumprimento dos requisitos de QoS. Os autores utilizaram a técnica de otimização para a métrica de controle de acesso e com restrições da métrica de banda do canal. No entanto, esse algoritmo não demonstra um bom ponto de convergência de decisão aceitável para ambientes dinâmicos. Além disso, não utilizou métricas que satisfaçam as condições de ambientes dinâmicos como: mobilidade e densidade de nós no canal.

A falta de informação transmite baixa confiança. Em mecanismos de seleções de canais para VANETS, essa abordagem também se constitui verdadeira. As informações sobre os canais e os requisitos dos usuários são relevantes, entretanto necessita-se de outras informações representativas que abordem questões da mobilidade juntamente com a dinamicidade. Essas informações fornecem indícios do comportamento dos nós à conectividade

e ao mecanismo de seleção de canal. Com isso, permite maior garantia de conectividade e confiabilidade de decisão. Dessa forma, diferente das abordagens existentes, o MOCA apresenta predição dinâmica da qualidade do canal, aconselhando a mudança quando o canal atual apresenta baixas condições de cumprir os requisitos de QoS à cada nó. Para isso, o MOCA considera as características de mobilidade dos nós, direção eficiente dos condutores e dos canais. Devido à dinamicidade, esses critérios apresentam importâncias independentes a cada instante. Com isso, o MOCA realiza aprendizado de seus critérios e pondera suas importâncias a cada instante.

Tabela 1: Resumo das características dos trabalhos relacionados

Trabalhos Relacionados	UPs	USs	VANETs
Li e Zekavat 2008	X		
Rezende et al. 2011	X		
Tang e Mark 2008	X		
Guan et al. 2010	X		X
Rawat et al. 2013	X		X
Al-Ali e Chowdhury 2013	X		
Boukerche, Rezende e Pazzi 2009		X	X
Jackson e Russell 2013		X	
Wahab, Otrok e Mourad 2013		X	X
Rehmani et al. 2013	X		
Asheralieva e Mahata 2013		X	
MOCA	X	X	X

3.3 Resumo

Este capítulo apresentou os trabalhos existentes na literatura em relação à gestão da conectividade pelo uso de RC. Desse modo, foi realizada uma breve contextualização de abordagens que utilizam gestão da conectividade pelo uso de RC que não apresente interferências aos UPs e outros trabalhos que consideram os requisitos dos USs como parte da gestão de uso pelo RC. A Tabela 1 sintetiza as características dos trabalhos relacionados utilizados neste capítulo. Por fim, detalham-se os desafios encontrados na VANETs e as contribuições do MOCA.

CAPÍTULO 4

MOCA

Este capítulo apresenta o mecanismo distribuído para seleção de canais em redes veiculares cognitivas (MOCA). A principal contribuição do MOCA é promover melhorias na conectividade e entrega dos dados através de uma melhor seleção e predição da qualidade do canal. O MOCA aplica funcionalidades de: classificação, seleção, predição da qualidade dos canais e adaptação de critérios. O MOCA utiliza uma estratégia distribuída de seleção de canal considerando os requisitos dos usuários e da rede através da tecnologia de rádio cognitivo.

Dividiu-se este capítulo em duas seções e quatro subseções. A Seção 4.1 apresenta o mecanismo do MOCA. A Subseção 4.1.1 descreve a funcionalidade de classificação de qualidade do canal. A Subseção 4.1.2 ilustra o método de seleção do canal com base em requisitos de QoS. A Subseção 4.1.3 ilustra a partir de equações a funcionalidade de predição da qualidade do canal. A Subseção 4.1.4 ilustra o processo de adaptação dos critérios utilizados na funcionalidade de predição. Por fim, a Seção 4.2 resume este capítulo.

4.1 Mecanismo distribuído para seleção de canais em redes veiculares cognitivas

Esta seção apresenta a arquitetura do mecanismo MOCA e subseções que descrevem suas funcionalidades. A Figura 4 ilustra os três fundamentos utilizados pelo MOCA para alcançar seu objetivo. As informações sobre as características do canal são importantes para discriminar as propriedades dos canais durante a transmissão e recepção de dados. No entanto, nas VANETs os usuários possuem alta mobilidade, que influencia na qualidade do canal. Portanto, o reconhecimento de informações sobre a mobilidade

retrata as condições que os condutores dispõem e como podem realizar ações benéficas que melhorem a qualidade do uso do canal. Além disso, as informações repassadas pelos condutores são relevantes, pois são eles quem indicam a qualidade do serviço que deve ser prestado.

Devido à instabilidade de comunicação em redes veiculares, o MOCA realiza seleção e predição proativa da qualidade do canal a fim de manter os requisitos das aplicações dos usuários. Para isso, utilizou-se os critérios de mobilidade, caracterização do canal e direção eficiente durante a funcionalidade de predição. A mobilidade utiliza as informações de posicionamento e velocidade. A caracterização do canal é avaliada pelas informações de SNR e BER. E a direção eficiente provê informações entre condições satisfatórias de conectividade por meio das informações de velocidade e distância para outro veículo. Devido à dinamicidade das VANETs esses critérios podem apresentar graus de importância distintos com o tempo. Com isso, o MOCA realiza adaptação dinâmica da relevância dos critérios utilizados pela funcionalidade de predição.

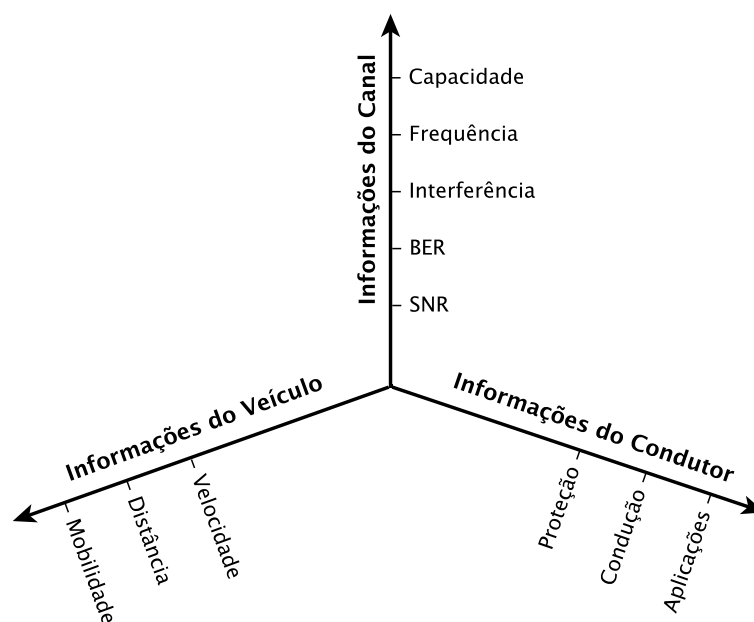


Figura 4: Fundamentos de informações para prover qualidade de canal em VANETs

O mecanismo do MOCA é ilustrado pela Figura 5 que possui as funcionalidades de: classificação, seleção, predição e adaptação. O MOCA promove melhorias na conectividade e entrega dos dados através de uma melhor seleção e predição da qualidade do canal em redes veiculares cognitivas.

A funcionalidade de classificação é responsável em ordenar os canais disponíveis por uma métrica de qualidade de canal. A funcionalidade de seleção indica dentre os canais classificados o melhor canal que atenda aos requisitos das aplicações dos USs. A funcionalidade de predição repassa informações relativas à qualidade futura do canal em uso para a funcionalidade de seleção. Caso o canal em uso tenda a apresentar baixo nível de

QoS para um instante futuro, a funcionalidade de seleção recomenda outro canal ordenado pela funcionalidade de classificação. A funcionalidade de predição utiliza os critérios de mobilidade, características do canal e direção eficiente para prover melhor informações à seleção de canal. Por fim, a funcionalidade de adaptação ajusta as ponderações dos critérios utilizados na funcionalidade de predição. Cada funcionalidade será detalhada nas próximas seções.

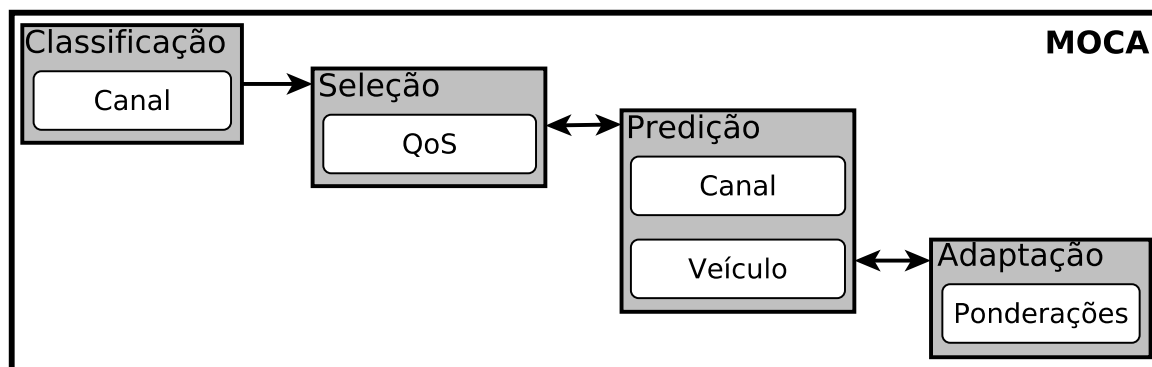


Figura 5: Funcionalidades do mecanismo distribuído de seleção de canais

4.1.1 Classificação

Esta subseção descreve a classificação empregada pelo MOCA. A classificação é importante para indicar os canais com base nos requisitos dos usuários. Além disso, essa funcionalidade permite que exista um melhor equilíbrio de utilização dos canais na rede.

Inicialmente, cada nó classifica sua aplicação atual que necessita realizar alguma transmissão. Assim, cada aplicação tem uma estratégia que atende os requisitos. Em sequência, cada nó classifica e agrupa os canais conforme a informação recebida durante a fase de sensoriamento. Após essa funcionalidade, cada nó passa para a funcionalidade de seleção de canal.

Cada canal possui características diferentes que oferecem resultados distintos durante a comunicação de dados sem fio. Características como interferência, BER e SNR variam entre os canais que pode adquirir-se na fase de sensoriamento [5]. Essas características resultam em diferentes desempenhos de vazão, atraso e largura de banda. Além disso, no caso de redes veiculares cognitivas, a mudança de posicionamento frequente dos nós também interfere na qualidade do canal que apresenta variações das características ao longo do tempo. Como consequência, a utilização de um canal ineficiente pode impedir que sejam alcançados os requisitos exigidos pelas aplicações.

As aplicações em VANETs apresentam diferentes requisitos de taxa de erros por bit (da língua inglesa, *Bit error rate* - BER), largura de banda, atraso e nível de vazão da rede. Desse modo, essas aplicações são classificadas e agrupadas em a grupos que permitem diferentes níveis de confiabilidades para entrega dos dados. Desta forma, cada

grupo necessita de uma estratégia de seleção de canal que ofereça os melhores canais para cada grupo ajudando a manter os requisitos exigidos pelas aplicações [32].

Após fase de sensoriamento do espectro, o MOCA agrupa os canais baseado em informações sobre a métrica BER. A métrica BER é inversamente proporcional a taxa de pacotes bem sucedidos, quanto menor o valor de BER melhor será o canal. São definidos n grupos, cada um com m canais. Cada grupo de canal está disponível a um grupo de aplicações a . Assim, para cada a grupo de aplicações existe um grupo de m canais que a desempenha suas necessidades.

4.1.2 Seleção

Esta subseção descreve a seleção empregada pelo MOCA. A seleção é a principal funcionalidade do MOCA. A partir dessa funcionalidade, decidi-se a permanência ou a mudança de uso do canal com o decorrer do tempo considerando os requisitos dos usuários. No entanto, a seleção necessita do auxílio de outras funcionalidades para realizar a melhor escolha.

Nesta funcionalidade, após a classificação, cada nó seleciona o melhor canal de acordo com o seu grupo de aplicação. A partir desse ponto, avalia-se constantemente a qualidade do canal através da predição de qualidade do mesmo canal em um tempo de futuro próximo, conforme a Equação 4.1. O resultado dessa equação indica a qualidade de canal para um tempo de instante próximo.

Caso o resultado da Equação 4.1 esteja acima do nível de sensibilidade, mantém-se o uso do canal atual. No entanto, caso o valor dessa equação esteja inferior ao nível de controle, seleciona-se outro canal a partir da lista criada durante a fase de sensoriamento. À medida que cada grupo possui exigências diferentes, apresentam diferentes níveis de sensibilidade de seleção.

4.1.3 Predição

Esta subseção descreve a predição empregada pelo MOCA. A predição é a parte essencial para a funcionalidade seleção do MOCA. A partir desta funcionalidade, prevê a qualidade do canal para um período de tempo com base em requisitos dos usuários. Esta informação é repassada à seleção que decide a mudança ou a troca por outro canal. A predição realiza sua funcionalidade considerando os requisitos de características dos canais, mobilidade e direção eficiente.

A previsão de tráfego permite observar e coletar informações sobre as condições de tráfego futuro [6]. No contexto de VANETs, a predição da qualidade de canal ajuda no processo de seleção de canais, pois indica quais os canais estão disponíveis para desempenhar as exigências dos usuários no futuro próximo e ainda alerta sobre a qualidade do canal corrente. Assim, a previsão antecipa possíveis dificuldades de conectividade e permite mudanças de para outro com maior qualidade.

A predição tem o objetivo antecipar situações futuras com base em informações atuais ou históricos [33]. Esta técnica afeta positivamente aspectos orientados a serviços e outros fins. Em VANETs, a previsão apresenta efetividade em diferentes situações, tais como: a qualidade de canais, o roteamento de mensagens e a mobilidade. Assim, o MOCA utiliza a predição de qualidade de canal para um momento de futuro próximo a fim de garantir qualidade as aplicações dos usuários.

A predição exige informação consistente para proporcionar eficiência. Por esta razão, as informações de mobilidade, características do canal e direção eficiente são usadas para indicar a qualidade do canal. O MOCA evita o uso de um canal quando esse apresenta baixa qualidade ou não satisfaz a expectativa do usuário. Assim, o MOCA sugere novas opções de canais, que ajudam a manter os requisitos das aplicações.

A formalização de predição empregada pelo MOCA segue na Equação 4.1 para um momento de tempo futuro t_i em um canal id_{ch} . A partir das informações de mobilidade, caracterização do canal e direção eficiente, realiza-se a predição das mesmas pelas Equações 4.2, 4.3 e 4.4. Cada uma dessas equações possui diferentes níveis de importância que variam com o tempo denominados como: α , β e γ . Esses níveis de importância são obtidos durante a funcionalidade de adaptação de critérios, detalhado na Subseção 4.1.4.

A Equação 4.2 de previsão mobilidade é a razão entre a distância atual para outro nó (Equação 4.5) com a previsão de distância futura (Equação 4.6). Caso o resultado da Equação 4.2 esteja entre $]0 \ 1[$, indica que o nó está afastando-se, caso o resultado dessa equação seja maior que 1, o nó está aproximando-se; e se o resultado for 1, indica que não alterou-se a distância entre os nós. A Equação 4.6 é baseada na equação de movimento retilíneo uniformemente acelerado. A métrica de velocidade média do nó é calculada pela Equação 4.7. Essa equação considera a média entre a velocidade atual e a velocidade coletada no momento anterior. Devido às grandes VANETs dinâmicas não é considerado informações históricas sobre velocidades, bem como a aceleração de nós.

$$QoS_{Ch}(id_{ch}, t_i) = \alpha \times Mob(t_i) + \beta \times Ch(id_{ch}, t_i) + \gamma \times DirEfic(t_i) \quad (4.1)$$

$$Mob(t_i) = DistAt(t_i) / DistFut(t_i) \quad (4.2)$$

$$Ch(id_{ch}, t_i) = Bw \times \log_2(1 + SnrFut(t_i)) \quad (4.3)$$

$$DirEfic(t_i) = \psi \times VelAt(t_i) + \phi \times DistAt(t_i) \quad (4.4)$$

A Equação 4.3 de predição do canal baseia-se na equação de capacidade do canal de *Shannon* [34]. Essa equação utiliza o resultado da Equação 4.9 para indicar a capacidade futura do canal. A Equação 4.9 é o inverso da Equação de *Friis*. A variável Bw é a capacidade máxima do canal.

A Equação 4.4 de predição de direção eficiente, considera ponderações de velocidade e de distância atual (Equação 4.5). Os valores ψ e ϕ são adaptados com o tempo. Obtêm-se informações de velocidade atual através de um dispositivo de geolocalização como o GPS. Esses pesos de controle da velocidade e das distâncias são ajustados para ajudar os motoristas a manter uma boa conectividade com outros nós e relevância do controle do veículo.

$$DistAt(t_i, snr) = friss(t_i, snr) \quad (4.5)$$

$$DistFut(t_i) = VelMed \times t_i + 1/2 \times acel \times t_i^2 \quad (4.6)$$

$$VelMed(t_i) = (VelAnt(t_i) + VelAt(t_i))/2 \quad (4.7)$$

$$VelAnt(t_i) = VelAt(t_{i-1}) \quad (4.8)$$

$$SnrFut(t_i) = 1/friss(DistFut(t_i)) \quad (4.9)$$

4.1.4 Adaptação

Esta subseção descreve a adaptação dos critérios utilizados pelo MOCA. A adaptação realiza ponderações dinâmicas dos critérios utilizados na funcionalidade de predição. Dessa forma, a adaptação trabalha ao lado da predição. Esta funcionalidade reconhece a boa ou má qualidade de canal ao usuário. Assim, a adaptação realiza um enriquecimento de ponderações para ainda utilizar o canal atual que apresentam boa qualidade e diminui quando o mesmo não apresenta resultados significativos.

Devido à alta dinâmica em redes veiculares, os critérios listados na Seção 4.1.3 têm diferentes níveis de importância ao longo do tempo. A Figura 6 ilustra o recurso de adaptação utilizando os critérios de canal ($Ch_{ch}(id, t_i)$), mobilidade ($Mob(t_i)$), e direção eficiente ($DirEfic(t_i)$) que são parâmetros de entrada para o recurso da funcionalidade de previsão da qualidade do canal ($QoS_{Ch}(id, t_i)$) com identificação ID para um futuro próximo t_i . Assim, o MOCA realiza a ponderação dos critérios utilizados para prever a qualidade do canal em cada momento.

Para realizar a ponderação, supõe-se que cada critério tem um nível de significância de α, β e γ de acordo com a Equação 4.1 (no estado inicial, todo o critérios têm o mesmo valor de importância). A partir do resultado do estado atual e das equações anteriores 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são calculados seus *deltas*. Cada *delta* é a diferença entre o resultado atual e do instante anterior de cada equação. Os *deltas* das Equações 4.2, 4.3 e 4.4 são normalizados para valores entre $[0 \ 1]$.

O critério de maior influência em cada momento será o critério com maior re-

sultado entre os *deltas* normalizados. Em outra parte, avalia-se o resultado do *delta* na Equação 4.1. Se o *delta* da equação 4.1 é positivo, o maior critério de influência aumenta o seu valor com o resultado da diferença entre o valor atual e o segundo maior valor entre outros critérios. O processo é inverso quando o *delta* da Equação 4.1 é negativo. Assim, diminui-se o valor do critério de maior influência pelo resultado entre o valor atual e o segundo maior critério. Outros demais critérios têm igual redistribuição da diferença entre o valor atual do critério mais influente e o valor máximo que pode ser atribuído.

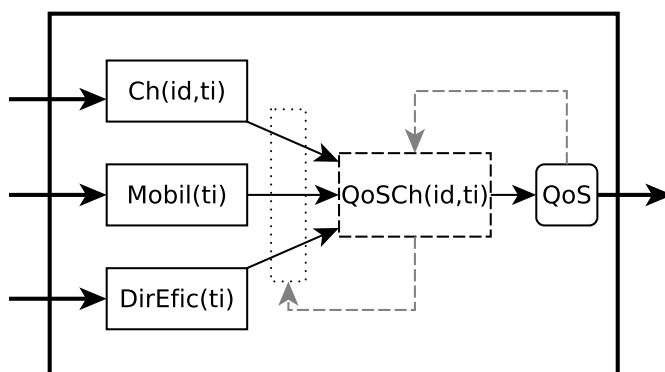


Figura 6: Funcionalidade de adaptação

4.2 **Resumo**

Neste capítulo apresentou-se o mecanismo distribuído para seleção de canais em redes veiculares cognitivas. Logo após, foi dedicada uma seção que detalha a arquitetura do mecanismo e subseções que descrevem as suas funcionalidades: classificação, seleção, predição e adaptação.

CAPÍTULO 5

Avaliação

Este capítulo apresenta a avaliação do mecanismo MOCA. Avaliou-se os termos de desempenho de qualidade de serviço, conectividade, mobilidade dos USs, densidade e complexidade dos UPs e sensibilidade de seleção. A Seção 5.1 indica os critérios mais relevantes para se utilizar nas simulações. A Seção 5.2 validou o protocolo TFRC-CR, utilizado como comparação ao MOCA. A Seção 5.3 descreve os cenários e parâmetros de simulação utilizados. A Seção 5.4 descreve e analisa os resultados. Por fim, a Seção 5.5 resume o conteúdo deste capítulo.

5.1 Análise 2^k fatorial

Esta seção descreve a análise 2^k fatorial. A análise 2^k fatorial é responsável em indicar critérios mais relevantes para um determinado cenário. Dessa forma, essa análise permite que se empreguem os critérios mais relevantes para uma avaliação de um mecanismo.

A avaliação de sistemas em VANETs a partir de simulações geralmente envolve um número vasto e heterogêneo de cenários com a possibilidade de ampla quantidade de critérios. Com a intenção de reconhecer os critérios mais relevantes e excluir os demais com menor importância, utilizou-se a técnica de análise 2^k fatorial a fim de encontrar os critérios de maior impacto em um sistema [35]. A técnica 2^k fatorial determina o efeito de k critérios onde cada possui duas alternativas ou níveis. O resultado dessa análise é uma classificação da importância dos critérios.

Avaliou-se os requisitos taxa de entrega de pacotes (da língua inglesa, *Packet Delivery Ratio* - PDR) e *jitter* em relação aos critérios de densidade de veículos (x_a), velocidade dos nós (x_b) e dimensão da rede (x_c), com dois níveis extremos de importância

que são nomeados como $\{-1, 1\}$, conforme as Equações 5.1, 5.2 e 5.3, respectivamente. A Tabela 2 ilustra os resultados obtidos das simulações a partir de configurações de cada permutação desses critérios. Desse modo, obtém-se a Equação 5.4 por meio de regressão linear do resultado da Tabela 2. Nessa equação, os critérios que estiverem multiplicando o maior valor constante apresentam-se como os mais importantes que nesse caso foi a densidade de veículos e velocidade dos nós. Dessa forma, para a avaliação do sistema variou-se a densidade de veículos e velocidade dos nós mantendo constante a dimensão.

$$x_a = \begin{cases} -1 & \text{se } \textit{veiculos} = 10 \\ 1 & \text{se } \textit{veiculos} = 100 \end{cases} \quad (5.1)$$

$$x_b = \begin{cases} -1 & \text{se } \textit{velocidade} = 2 \text{ m/s} \\ 1 & \text{se } \textit{velocidade} = 12 \text{ m/s} \end{cases} \quad (5.2)$$

$$x_c = \begin{cases} -1 & \text{se } \textit{dimensao} = 100 \times 100 \text{ m}^2 \\ 1 & \text{se } \textit{dimensao} = 1000 \times 1000 \text{ m}^2 \end{cases} \quad (5.3)$$

Tabela 2: Resultados obtidos das simulações da análise 2^k fatorial

Simulações	x_a	x_b	x_c	PDR (%)
1	-1	-1	-1	34.23
2	-1	-1	1	61.73
3	-1	1	-1	14.73
4	-1	1	1	8.83
5	1	-1	-1	62.29
6	1	-1	1	60.07
7	1	1	-1	15.47
8	1	1	1	9.30

$$y_{2^k} = 37.67 - 27.33x_a + 2.57x_b + 1.59x_c - 4.25x_ax_b - 4.41x_bx_c - 3.76x_ax_c + 3.97x_ax_bx_c \quad (5.4)$$

5.2 Validação

Realizou-se a validação do protocolo TFRC-CR [25]. Reproduziu-se o cenário original utilizado pelo protocolo conforme na Tabela 3. Foram feitas 20 simulações com duração de 200s e a coleta dessas informações com intervalo de confiança de 95%. Nesse caso, os USs não possuem mobilidade. Avaliou-se os requisitos de QoS por meio de taxa de PDR e *jitter*.

A Figura 7 apresenta os resultados de QoS entre o MOCA e o TFRC-CR com densidade de 50 e 100 USs sem mobilidade. Em relação ao PDR, ilustrado na Figura 7(a), para todas as densidades dos nós o MOCA apresentou poucas variações e ganho médio de aproximadamente 5%. De maneira semelhante, a Figura 7(b) mostra os valores de *jitter* na qual apresentou poucas variações e ganho médio de aproximadamente 5%. Embora o mecanismo MOCA considere ambientes dinâmicos, com alta mobilidade e densidade de nós, o principal influenciador para a tomada de decisão de canal, ainda apresentou resultados satisfatórios em ambientes estáticos. Além disso, apresentou menor variação de resultado, pois utiliza um método determinístico de seleção comparado ao TFRC-CR que utiliza um método randômico de seleção.

Tabela 3: Parâmetros de Simulação para validação

Parâmetros	Valores
Área	1000 x 1000 m
Quantidade de ruas e travessas	10, 10
Número de veículos	50, 100
Área de transmissão do veículo	250 m
Quantidade de transmissores do veículo	1
Tempo de sensoriamento e transmissão	0.5 s
Número de usuários primários	11
Percentual de atividade dos UPs (Distribuição de Poisson)	0.5

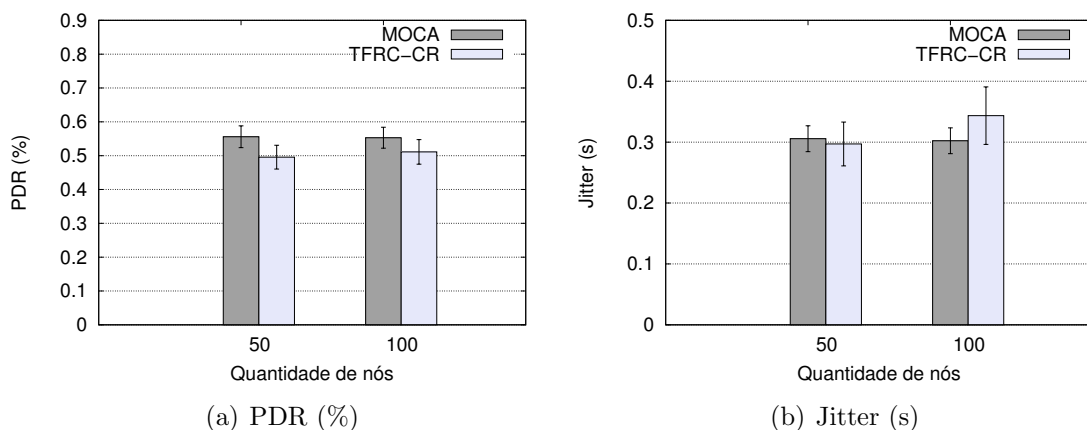


Figura 7: Avaliação de QoS pela validação

5.3 Descrição de avaliação

Utilizou-se o simulador de redes NS2, versão 2.31, na avaliação de eficiência e confiabilidade do MOCA. O mecanismo foi implementado e integrado ao código do módulo CRAHN, desenvolvido por pesquisadores da Universidade de Northeastern, EUA [36]. O cenário de avaliação é composto por uma quantidade de USs variando em 100, 300 e 500, sendo os mesmos dispostos em uma área de 1000m x 1000m seguindo o modelo de mobilidade ManhattanGrid [37]. Em relação ao UP, considera-se a complexidade de UP como o tempo em atividade do UP em relação ao tempo total de simulação. Além do tempo total em atividade, a caracterização do UP considera que se podem utilizar canais em tempos contínuos e descontínuos.

Cada nó possui alcance de transmissão de 250 m. O nó apresenta variação de velocidade entre 2 e 12 m/s, com probabilidade de mudança de velocidade de 20%, probabilidade de parada de 50% e probabilidade máxima do nó estar parado de 50%. O cenário apresentado interliga ruas e travessas designadas em 10 por 10. Realizaram-se 50 simulações com 400s de duração e os resultados consideram um intervalo de confiança de 95%.

O mecanismo foi avaliado por meio de métricas de QoS, conectividade. As métricas de QoS utilizadas foram a taxa de entrega de pacotes (PDR) e *jitter*. O PDR é calculado pela média do número de pacotes recebidos pelo total de pacotes enviados. O *jitter* é a variação de atraso na entrega dos pacotes. As métricas de conectividade foram o tempo de conectividade de um nó e quantidade de trocas de canais. O tempo de conectividade é o tempo total que o nó esteve em uso do canal. A quantidade de trocas de canais é a soma total de trocas de canais.

Tabela 4: Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Valores
Área	1000 x 1000 m
Quantidade de ruas e travessas	10, 10
Número de veículos	100, 300, 500
Área de transmissão do veículo	250 m
Quantidade de transmissores do veículo	1
Velocidade	2, 12 m/s
Probabilidade de mudança de velocidade	0.2
Probabilidade do veículos estacionarem	0.5
Probabilidade de tempo estacionado	0.5
Número de usuários primários	11
Tempo de sensoriamento e transmissão	0.5 s
Tempo de predição do MOCA	1 s
Percentual de atividade dos UPs (Distribuição de Poisson)	0.5

5.4 Resultados

Esta seção descreve e analisa os resultados obtidos por simulações discutidas na seção anterior. A Subseção 5.4.1 descreve os resultados de parametrização da sensibilidade de seleção de canal. Nela, define-se o parâmetro de sensibilidade de QoS que é utilizado nas demais subseções. A Subseção 5.4.2 comenta os resultados alcançados variando a complexidade de uso dos UPs. A Subseção 5.4.3 descreve os resultados encontrados através da variação da mobilidade dos nós. Por fim, a Subseção 5.4.4 avalia os resultados encontrados a partir da variação da densidade dos nós na rede.

5.4.1 Avaliação da sensibilidade de seleção do canal

A avaliação da sensibilidade de seleção do canal indica entre os limiares de seleção de canal o mais adequado que o MOCA tende a alcançar melhores resultados sobre os requisitos de QoS das aplicações dos USs. Assim, a Figura 8 ilustra os resultados de QoS para a sensibilidade de seleção de canal com variações de 30%, 50%, 70% e 90%. Em relação ao PDR, ilustrado na Figura 8(a), a sensibilidade de seleção à 90% apresentou uma maior resultado comparado aos outros limiares. No entanto, em relação ao *jitter*, ilustrado pela Figura 8(b), os resultados obtidos tiveram valores próximos um dos outros.

Percebe-se que maior o limiar de sensibilidade de QoS de seleção de canal, maior as chances de atender os requisitos das aplicações aos USs. Além disso, quanto maior o limiar sensibilidade de QoS, menor a variação dos resultados, comparado com os outros valores de limite. Portanto, quando maior o limiar de densidade, maior as chances do canal atender os requisitos das aplicações dos USs. Dessa forma, a funcionalidade de seleção do MOCA utiliza o valor de 90% para a tomada de decisão de QoS da qualidade do canal.

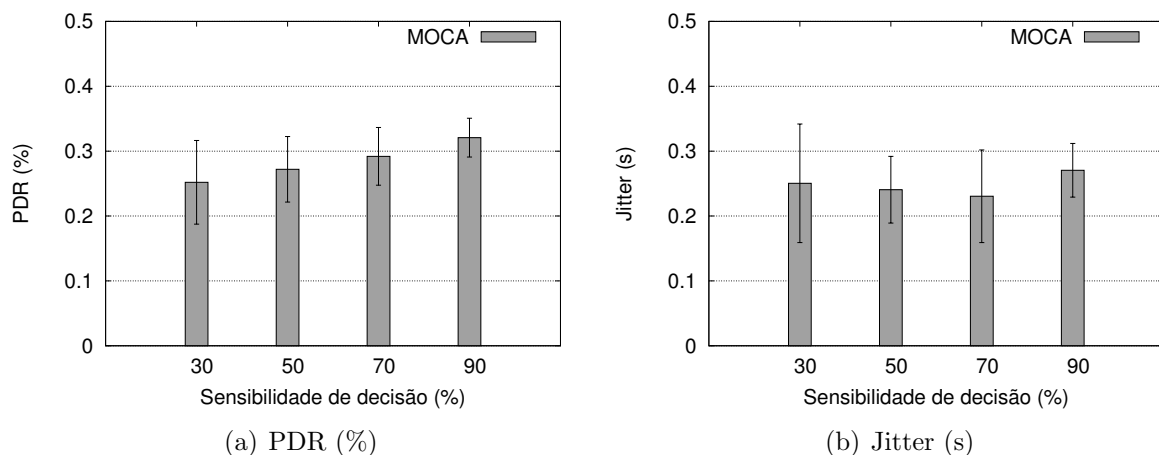


Figura 8: Avaliação de QoS pela variação da sensibilidade de seleção de canal

5.4.2 Avaliação da complexidade dos UPs

A complexidade de atividade do UP interfere no desempenho de alcançar os requisitos das aplicações dos USs. A Figura 9 ilustra os resultados de QoS para a complexidade de atividade de uso do UP com variações de 20%, 40% e 60%. Em relação ao PDR, ilustrado na Figura 9(a), quanto maior a complexidade de uso por UPs, menor é o resultado obtido pelo USs. Nesse caso, para todos os casos de variações da complexidade de uso do canal pelo UPs, o MOCA assegurou um aumento médio de 5% superior comparado ao TFRC-CR. No entanto, em relação ao *jitter*, conforme a Figura 9(b), para todos os casos de variação da complexidade de uso do canal pelo UPs, o MOCA obteve um aumento médio de 7% superior ao TFRC-CR. Dessa forma, o MOCA assegura maior confiabilidade na entrega dos dados, pois a funcionalidade de adaptação adequada as ponderações dos critérios para situações dinâmicas nas VANETs. Portanto, o uso da funcionalidade de previsão da qualidade de canal do MOCA proporciona resultados mais confiáveis, pois permite que o nó realize melhor seleção de canal com o tempo.

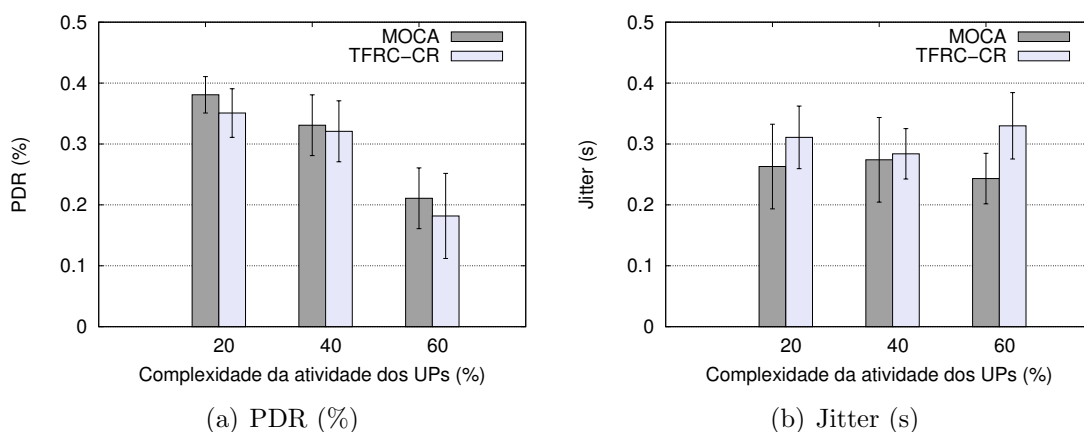


Figura 9: Avaliação de QoS pela variação da complexidade de uso por UPs

A Figura 10 ilustra os resultados de conectividade em relação à variação da complexidade de atividade do uso do UP. Em relação ao tempo total, conforme a Figura 10(a), percebe-se que o aumento da atividade pelo UP, menor é o tempo total em conectividade dos USs. Para os casos de variação da complexidade em 20% e 40%, o MOCA apresentou um aumento médio de 22% comparado ao TFRC-CR. No entanto, para a complexidade de 60% o MOCA e o TFRC-CR apresentaram resultados semelhantes. Em relação à quantidade de troca de canais, como mostra a Figura 10(b), as variações de complexidade em 20% e 40% apresentaram resultados semelhantes ao TFRC-CR e diferentes para a complexidade de 60%.

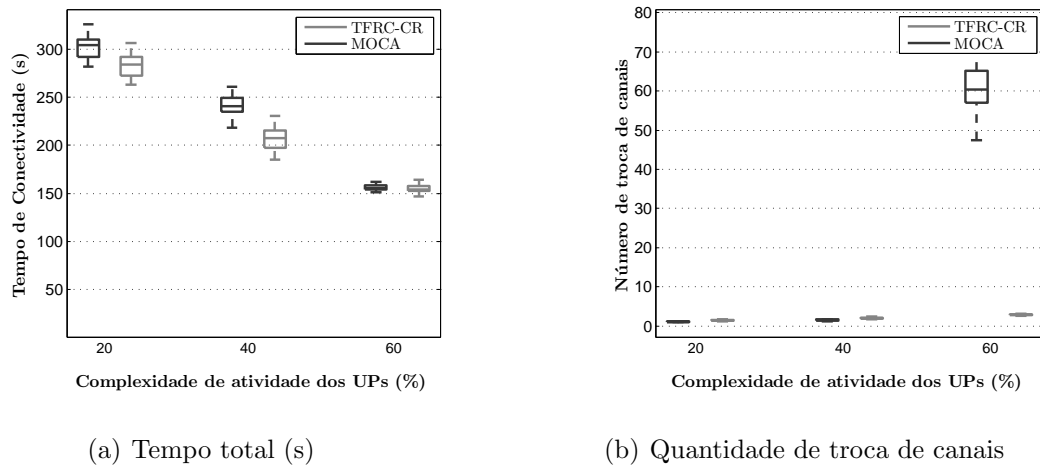


Figura 10: Avaliação da conectividade pela variação da complexidade de uso por UPs

5.4.3 Avaliação da mobilidade dos USs

A Figura 11 ilustra os resultados de QoS para a variação da mobilidade dos USs em 0, 5 e 10 m/s . Em relação ao PDR, ilustrado na Figura 11(a), quanto maior a mobilidade dos USs, menor é o resultado. Nesse caso, o MOCA apresentou um aumento 5 % comparado ao TFRC-CR. Em relação ao *jitter*, conforme a Figura 11(b), percebe-se que o MOCA apresentou ganho médio de 1%. Devido à funcionalidade de predição de mobilidade, o MOCA apresenta resultados de maior confiabilidade de entrega dos dados, pois permite que os nós escolham os melhores canais disponíveis e diminua o tempo de atraso da entrega.

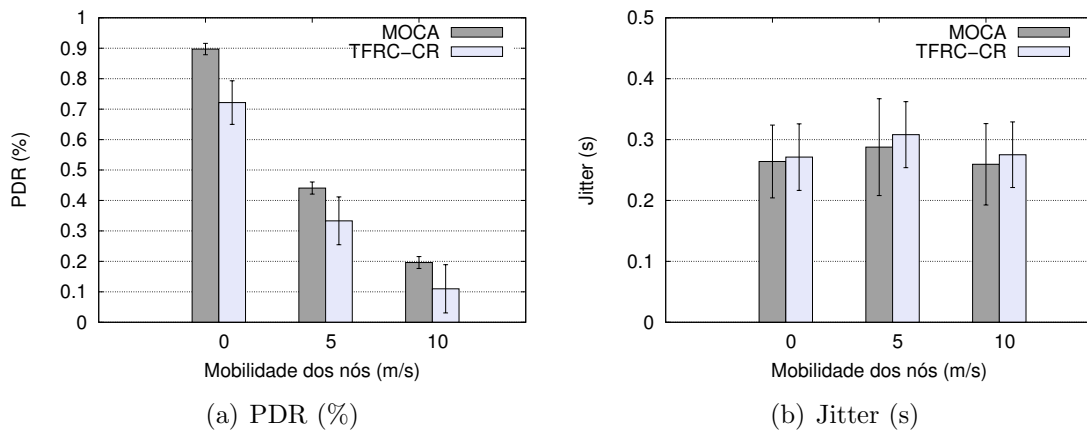
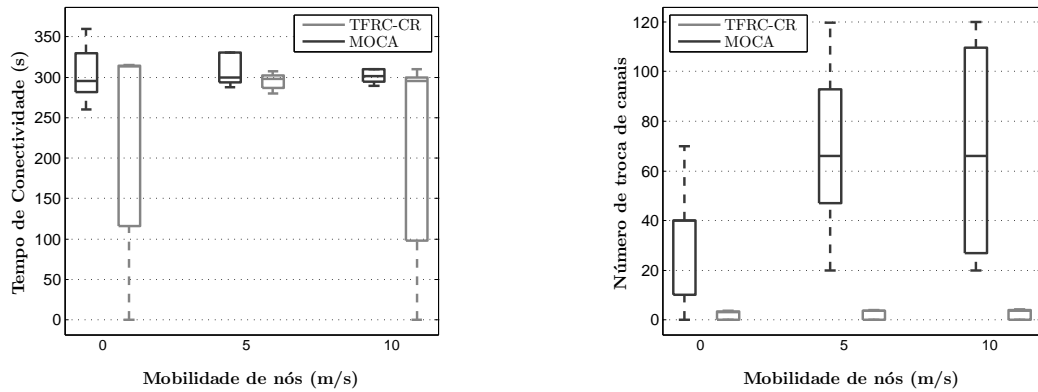


Figura 11: Avaliação de QoS pela mobilidade dos nós

A Figura 12 ilustra os resultados de conectividade variando a mobilidade dos USs em 0, 5 e 10 m/s . Em relação ao PDR, como mostra a Figura 12(a), percebe-se que os resultados do MOCA apresentaram tempo total mais estável e homogêneo comparado ao TFRC-CR. Em relação à quantidade de troca de canais, pela Figura 12(b), percebe-se que maior a velocidade, maior a quantidade de troca de canais. Devido à funcionalidade de predição de mobilidade, o MOCA alcançou resultados mais estáveis e homogêneos, pois

o uso da predição de mobilidade facilita aos USs indicarem outros canais que apresentem bons requisitos às aplicações.



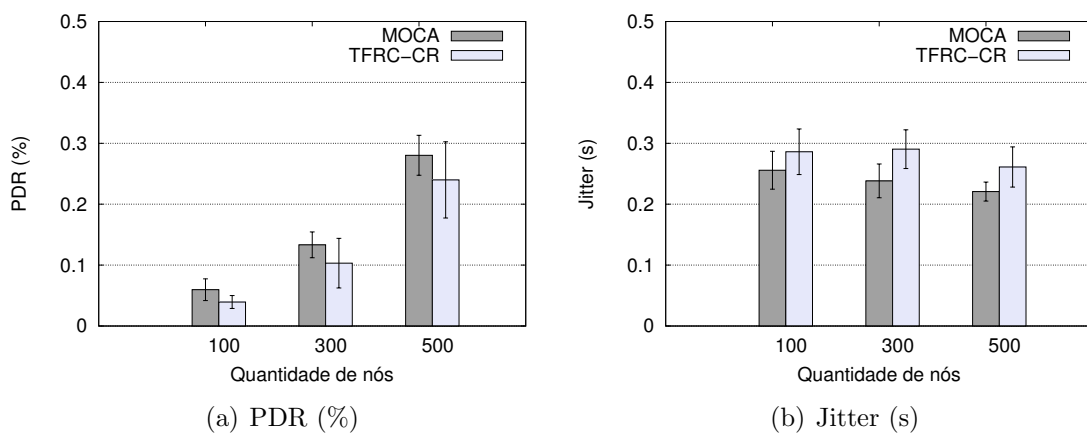
(a) Tempo total (s)

(b) Quantidade de troca de canais

Figura 12: Avaliação da conectividade pela variação da mobilidade dos USs

5.4.4 Avaliação densidade dos USs

A Figura 13 ilustra os resultados de QoS para a variação da densidade dos USs em 100, 300 e 500 nós. A Figura 13(a) ilustra que maior a densidade dos nós, maior o resultado de PDR. Nesse caso, o MOCA apresentou um ganho médio de aproximadamente 4% para todas as variações de densidade de nós. Em relação ao *jitter*, conforme a Figura 13(b), o aumento da densidade proporciona a diminuição desse requisito. Desse modo, o MOCA apresentou um aumento médio de 6% superior ao TFRC-CR. Novamente, o MOCA apresentou resultados mais estáveis, indicando que a confiabilidade de escolha do canal é homogênea.



(a) PDR (%)

(b) Jitter (s)

Figura 13: Avaliação de QoS pela densidade de US

A Figura 14, mostra os resultados de conectividade para a variação da densidade de nós. A Figura 14(a) ilustra que o aumento da densidade dos nós, menos é o tempo total de conectividade. Com o aumento da densidade dos nós, aumenta-se a concorrência pelo uso do canal, e assim, diminui-se o tempo total para cada nó. Em relação à quantidade de troca de canais, como mostra a Figura 14(b), presumi-se que o aumento da densidade, aumenta a quantidade de troca de canais. Nesse caso, o aumento da densidade de nós, os canais disponíveis tendem a apresentar um maior nível de SNR e BER, causado principalmente pela concorrência de uso pelos nós. Dessa forma, o MOCA a partir da funcionalidade de predição, permite maior sensibilidade sobre a qualidade do canal. Assim, a funcionalidade de seleção herda essa sensibilidade para realizar a troca de canal.

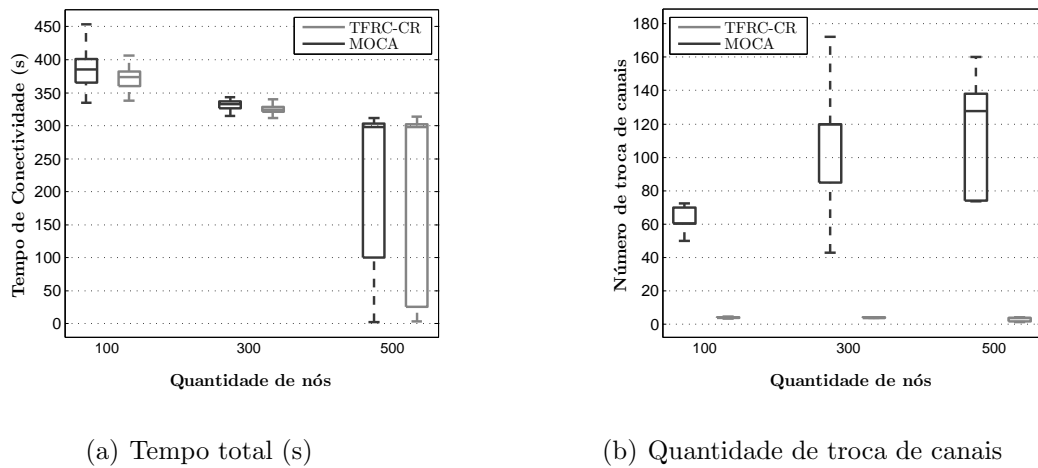


Figura 14: Avaliação da conectividade pela variação da densidade dos USs

5.5 Resumo

Este capítulo apresentou os resultados de avaliação entre o mecanismo MOCA e o protocolo TFRC-CR. Avaliou-se os requisitos de QoS em cenários urbanos por meio de simulações em relação à mobilidade, densidade dos USs e UP's. Concluiu-se que o uso do mecanismo MOCA proporciona resultados estáveis e superiores em relação ao TFRC-CR. Os gráficos apresentados mostraram que o MOCA garantiu poucas perdas e atrasos. Isso ocorreu devido ao conjunto de critérios utilizados durante as funcionalidades de classificação, seleção, predição e adaptação da qualidade do canal. Por fim, a funcionalidade de adaptação ajusta dinamicamente as influências dos critérios que auxilia na funcionalidade de predição.

CAPÍTULO 6

Conclusões e Trabalhos Futuros

Este trabalho propôs o mecanismo (MOCA) para prover melhorias na conectividade e entrega dos dados através de uma melhor seleção e predição da qualidade de canal em redes veiculares cognitivas. O MOCA aplica funcionalidades de: classificação, seleção, predição da qualidade dos canais e adaptação de critérios. A funcionalidade de classificação é responsável em ordenar os canais disponíveis por uma métrica de qualidade de canal. A funcionalidade de seleção é responsável por definir o melhor canal de comunicação dentre os canais disponíveis que atentam os requisitos das aplicações. A funcionalidade de predição repassa informações para a funcionalidade de seleção sobre a qualidade futura do canal em uso. Caso esse canal apresente um baixo nível de QoS para um instante futuro, a funcionalidade de seleção indica outro canal ordenado pela funcionalidade de classificação. Para alcançar esse objetivo, a funcionalidade de predição utiliza os critérios de mobilidade, características do canal e direção eficiente para prover melhores informações à seleção de canal. Por fim, a funcionalidade de adaptação ajusta as ponderações dos critérios utilizados na funcionalidade de predição.

Simulações foram realizadas e os resultados mostraram que o MOCA apresentou maiores taxas de entrega de pacotes, tempo de conectividade e menor taxa de atraso em cenários urbanos. Inicialmente, utilizou-se a técnica de análise 2^k fatorial para encontrar os critérios relevantes durante as simulações. Em seguida, validou-se a implementação do TFRC-CR a partir de cenários originais desses autores. Por fim, comparou-se o MOCA com o protocolo TFRC-CR na qual foi validado.

No cenário de avaliação da variação da complexidade dos UPs, o MOCA obteve 5% e 7% de melhorias médias em relação ao PDR e *jitter*, respectivamente. Em relação à conectividade, o MOCA conseguiu melhorar em média 20% o tempo total e resultados semelhantes para a quantidade de troca de canais.

No cenário de variação da mobilidade dos USs avaliou-se os resultados pelas

métricas de QoS e conectividade. O MOCA conseguiu melhorar em 5% o PDR. Em relação à conectividade, o MOCA obteve para o tempo total de conectividade resultados semelhante, porém esses resultados foram mais estáveis. No entanto, para a quantidade de troca de canais apresentou valores mais elevados comparado ao TFRC-CR.

No cenário de variação da densidade dos USs avaliou-se as métricas de QoS e conectividade. Em relação à QoS, o MOCA apresentou melhorias médias de 4% e 6% sobre o PDR e *jitter*. Em relação à conectividade, o MOCA obteve resultados semelhantes ao TFRC-CR para o tempo total de conectividade, porém para a quantidade de troca de canais apresentou resultados com números superiores comparado do TFRC-CR.

6.1 Trabalhos futuros

No que diz respeito aos trabalhos futuros, apresenta-se os seguintes pontos que podem ser estudados e validados no futuro:

- Avaliar a eficiência do MOCA em cenários rodoviários analisando mais a fundo as características de mobilidade e cooperação dos nós
- Avaliar a eficiência do MOCA em cenários rurais analisando questões de disponibilidade de acesso e conectividade dos nós
- Avaliar a eficiência do MOCA a partir de aplicações como compartilhamento de dados multimídia
- Avaliar o MOCA pela análise e comparação dos resultados através de métricas de Qualidade de Experiência (QoE)
- Aplicar o MOCA em conjunto com um protocolo de roteamento oportuno pelo uso da tecnologia de rádio cognitivo de forma a melhorar o processo de seleção de rotas, bem como diminuir a perda e o atraso de pacotes.

6.2 Publicações relacionadas

1. **Cláudio Silva** ; Michele Nogueira ; Eduardo Cerqueira. Mecanismo Distribuído para Seleção de Canais em Redes Veiculares Cognitivas. In: Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga (WRA 2014), Florianópolis, 2014. Workshop de Redes de Acesso em Banda Larga (WRA), 2014.
2. **Cláudio Silva** ; Michele Nogueira ; Eduardo Cerqueira. Connectivity Management to Support Reliable Communication on Cognitive Vehicular Networks. In: IEEE Wireless Days (WD 2014), 2014 (Submetido).

6.3 Publicações correlacionadas

1. **SILVA, C.** ; COSTA, R. M. ; PIRES, A. ; ROSARIO, D. L. ; CERQUEIRA, E. ; MACHADO, K. L. S. ; NETO, A. ; UEYAMA, J. . A Cluster-based Approach to provide Energy-Efficient in WSN. *International Journal of Computer Science and Network Security*, v. 2013, p. 55-62, 2013.
2. ROSARIO, D. ; ZHAO, Z. ; **SILVA, C.** ; CERQUEIRA, E. ; BRAUN, T. . An OM-NeT++ Framework to Enable Video Transmission and Evaluation for Mobile Wireless Multimedia Sensor Networks. In: *6th International Workshop on OMNET++*, Cannes, 2013. *Proceedings of the 6th International Workshop on OMNET++*, 2013.
3. FARIAS W. ; **SILVA C.** ; COSTA R. ; ROSÁRIO D. ; CERQUEIRA E. Desenvolvimento de Ferramenta para Monitoramento Multimídia a partir de Redes Heterogêneas. In: *Escola Regional de Informática Norte (XIII ERN)*, 2013, Belém.
4. PIRES, A. ; **SILVA, C. R. G.** ; CERQUEIRA, E. C. ; MONTEIRO, D. ; VIEGAS JUNIOR, R. CHEATS: An Cluster-Head Election Algorithm for WSN Using a Takagi-Sugeno Fuzzy System. In: *IEEE Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Belém, 2011.

Referências

- [1] M. D. Felice, L. Bedogni, and L. Bononi, “Group communication on highways: An evaluation study of geocast protocols and applications,” *Elsevier, Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 3, pp. 818–832, 2013.
- [2] A. A. Mu’azu, L. T. Jung, I. A. Lawal, and P. A. Shah, “Throughput measurement for the guaranteed qos real-time traffic flows in vanets,” *Elsevier, Procedia-Social and Behavioral Sciences*, vol. 129, pp. 297–304, 2014.
- [3] G. Karagiannis, O. Altintas, E. Ekici, G. Heijenk, B. Jarupan, K. Lin, and T. Weil, “Vehicular networking: A survey and tutorial on requirements, architectures, challenges, standards and solutions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 4, pp. 584–616, 2011.
- [4] M. Kakkasageri and S. Manvi, “Information management in vehicular ad hoc networks: A review,” *Elsevier, Journal of Network and Computer Applications*, vol. 39, pp. 334–350, 2014.
- [5] M. Masonta, M. Mzyece, and N. Ntlatlapa, “Spectrum decision in cognitive radio networks: A survey,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 3, pp. 1088–1107, 2013.
- [6] Y. Xu, A. Anpalagan, Q. Wu, L. Shen, Z. Gao, and J. Wang, “Decision-theoretic distributed channel selection for opportunistic spectrum access: Strategies, challenges and solutions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1689–1713, 2013.
- [7] B. Jarupan and E. Ekici, “A survey of cross-layer design for vanets,” *Elsevier, Ad Hoc Networks*, vol. 9, no. 5, pp. 966–983, 2011.
- [8] B. A. Fette, *Cognitive radio technology*. Academic Press, 2009.
- [9] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, *Dynamic spectrum access and management in cognitive radio networks*. Cambridge University Press, 2009.

-
- [10] T. Jiang, H. Wang, and A. V. Vasilakos, “Qoe-driven channel allocation schemes for multimedia transmission of priority-based secondary users over cognitive radio networks,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (J-SAC)*, vol. 30, no. 7, pp. 1215–1224, 2012.
- [11] M. Felice, R. Doost-Mohammady, and L. Bononi, “Cognitive vehicular networks,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, no. June, pp. 26–33, 2012.
- [12] Q. Wang, P. Fan, and K. Letaief, “On the joint v2i and v2v scheduling for cooperative vanets with network coding,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 62–73, Jan 2012.
- [13] M. S. Kakkasageri and S. S. Manvi, “A survey on information dissemination in vanets,” *Roadside Networks for Vehicular Communications: Architectures, Applications, and Test Fields*, p. 212, 2013.
- [14] J. Guerrero-Ibañez, C. Flores-Cortes, and S. Zeadally, “Vehicular ad-hoc networks (vanets): Architecture, protocols and applications,” *Springer, Next-Generation Wireless Technologies: 4G and Beyond*, p. 49, 2013.
- [15] M. Watfa, *Advances in Vehicular Ad-hoc Networks*. IGI Global, 2010.
- [16] A. Azarfar, J.-F. Frigon, and B. Sanso, “Improving the reliability of wireless networks using cognitive radios,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 2, pp. 338–354, 2012.
- [17] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, and K. R. Chowdhury, “Crahn’s: Cognitive radio ad hoc networks,” *Elsevier, Ad Hoc Networks*, vol. 7, no. 5, pp. 810–836, 2009.
- [18] Q. Zhao, S. Geirhofer, L. Tong, and B. Sadler, “Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 2, pp. 785–796, Feb 2008.
- [19] C. Rezende, A. Boukerche, R. W. Pazzi, B. P. Rocha, and A. A. Loureiro, “The impact of mobility on mobile ad hoc networks through the perspective of complex networks,” *Elsevier, Journal of Parallel and Distributed Computing*, vol. 71, no. 9, pp. 1189–1200, 2011.
- [20] X. Li and S. A. (Reza) Zekavat, “Traffic pattern prediction and performance investigation for cognitive radio systems,” in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, March 2008, pp. 894–899.
- [21] Q. Guan, F. Yu, S. Jiang, and G. Wei, “Prediction-based topology control and routing in cognitive radio mobile ad hoc networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 9, pp. 4443–4452, Nov 2010.
- [22] S. Srinivasa and S. Jafar, “Cognitive radios for dynamic spectrum access - the throughput potential of cognitive radio: A theoretical perspective,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 73–79, May 2007.
- [23] S. Tang and B. Mark, “An adaptive spectrum detection mechanism for cognitive radio networks in dynamic traffic environments,” in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2008, pp. 1–5.

- [24] D. Rawat, Y. Zhao, G. Yan, and M. Song, “Crave: Cognitive radio enabled vehicular communications in heterogeneous networks,” in *IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS)*, Jan 2013, pp. 190–192.
- [25] A. K. Al-Ali and K. Chowdhury, “Tfrc-cr: An equation-based transport protocol for cognitive radio networks,” *Elsevier, Ad Hoc Networks*, vol. 11, no. 6, pp. 1836–1847, 2013.
- [26] D. Niyato and E. Hossain, “Competitive spectrum sharing in cognitive radio networks: a dynamic game approach,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 2651–2660, 2008.
- [27] C. A. Jackson and H. B. Russell, “Utilization of channel properties for channel access in ad hoc networks with heterogeneous channels,” in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, Dec 2013, pp. 359–364.
- [28] A. Boukerche, C. Rezende, and R. W. Pazzi, “A link-reliability-based approach to providing qos support for vanets,” in *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2009, pp. 1–5.
- [29] O. A. Wahab, H. Otrok, and A. Mourad, “Vanet qos-olsr: Qos-based clustering protocol for vehicular ad hoc networks,” *Elsevier, Computer Communications*, vol. 36, no. 13, pp. 1422–1435, 2013.
- [30] M. H. Rehmani, A. C. Viana, H. Khalife, and S. Fdida, “Surf: A distributed channel selection strategy for data dissemination in multi-hop cognitive radio networks,” *Elsevier, Computer Communications*, vol. 36, no. 10–11, pp. 1172–1185, 2013.
- [31] A. Asheralieva and K. Mahata, “Resource allocation algorithm for cognitive radio network with heterogeneous user traffic,” in *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*. IEEE, 2013, pp. 4852–4857.
- [32] S. Swami, C. Ghosh, R. P. Dhekne, D. P. Agrawal, and K. A. Berman, “Graph theoretic approach to qos-guaranteed spectrum allocation in cognitive radio networks,” in *IEEE International Performance, Computing and Communications Conference (IPCCC)*. IEEE, 2008, pp. 354–359.
- [33] X. Xing, T. Jing, W. Cheng, Y. Huo, and X. Cheng, “Spectrum prediction in cognitive radio networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 2, pp. 90–96, 2013.
- [34] C. E. Shannon and W. Weaver, “The mathematical theory of communication (urbana, il,” 1949.
- [35] R. Jain, *The art of computer systems performance analysis*. John Wiley & Sons Chichester, 1991, vol. 182.
- [36] M. Di Felice, K. R. Chowdhury, W. Kim, A. Kassler, and L. Bononi, “End-to-end protocols for cognitive radio ad hoc networks: An evaluation study,” *Elsevier, Performance Evaluation*, vol. 68, no. 9, pp. 859–875, 2011.

-
- [37] U. M. T. S. ETSI, “Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the umts,” UMTS 30.03 Version 3.2.0, 1998, <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/3003U.htm>. Último acesso: 7 de abril de 2014.