

# Análise de Impacto da Escolha do MCS em Cenários de NR V2X Modo 2

Ricardo Q. de F. H. Silva, Daniel R. de Luna, Dario G. de Macedo, Tarciana C. de B. Guerra e Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—O *New Radio* (NR) 5G viabilizou uma série de novas aplicações baseadas na sua menor latência, maior confiabilidade e taxa de transmissão, dentre essas, a melhoria na comunicação entre veículos. As comunicações *Vehicle-to-Everything* (V2X) possuem cenários extremamente dinâmicos, fazendo com que uma configuração cuidadosa do sistema seja essencial para garantir o desempenho esperado. Este estudo tem como objetivo apresentar uma análise do impacto do *Modulation and Coding Scheme* (MCS) em cenários NR 5G V2X com comunicação tipo Modo 2. O simulador ns-3 é adotado como ferramenta de prototipagem, pelo qual são avaliadas três variações de um cenário de rodovia definido pelo 3GPP. Métricas de atraso e de confiabilidade de entrega de pacotes, bem como de taxa útil na recepção, são utilizadas para evidenciar a sensibilidade do desempenho do V2V para diferentes valores de MCS.

**Palavras-Chave**—NR V2X, MCS, ns-3, 3GPP, Rodovias.

**Abstract**—The *New Radio* (NR) 5G enabled a series of new applications based on its lower latency, higher reliability and transmission rate, among these, the enhancement in communication among vehicles. The *Vehicle-to-Everything* (V2X) communications have extremely dynamic scenarios, in order to ensure expected performance, a careful system configuration is essential to the system. This study aims to present an analysis of the impact of the *Modulation and Coding Scheme* (MCS) in NR 5G V2X scenarios with Mode 2 communication. The ns-3 simulator is adopted as a prototyping tool, through which three variations of a highway scenario defined by the 3GPP are evaluated. Metrics of packet delivery delay and reliability, as well as useful reception rate, are used to show the sensitivity of V2V performance to different MCS values.

**Keywords**—NR V2X, MCS, ns-3, 3GPP, Highways.

## I. INTRODUÇÃO

A denominação *Vehicle-to-Everything* (V2X) é um termo guarda-chuva que engloba a comunicação de veículos com outros meios, como: outros veículos (V2V), redes de comunicação (V2N), infraestruturas (V2I), *Road Side Units* (RSU) (V2R) e pedestres (V2P).

A tecnologia *Dedicated Short Range Communications* (DSRC), primeira a ser padronizada para o V2X, surgiu em 2010 a partir da especificação IEEE 802.11p [1]. Já no *The 3rd Generation Partnership Project* (3GPP), o V2X foi introduzido a partir do *Release* 12, com os sistemas *Device-to-Device* (D2D), usado como suporte para *Serviços de Proximidade* (ProSe). O D2D permite a transmissão de dados em curtas distâncias por meio de um link direto entre os nós, baseado em uma nova interface chamada PC5. Dependendo do

agendamento de transmissões dos *User Equipments* (UEs), o D2D possui dois modos de operação: Modo 1 (centralizado) e Modo 2 (distribuído). No Modo 1, o escalonamento das transmissões dos UEs é feito pela Estação Rádio Base (ERB), enquanto no Modo 2, o UE seleciona autonomamente os recursos de rádio para sua transmissão, por meio de configurações da rede via interface PC5. Essa arquitetura foi posteriormente utilizada pelo 3GPP como base para o 4G *Long Term Evolution* (LTE) V2X, chamado de C-V2X, que foi desenvolvido a partir do *Release* 14.

O C-V2X introduziu a padronização do *Sidelink* (SL), meio de comunicação entre os veículos baseado na interface PC5. Além disso, também estabeleceu dois modos de comunicação, chamados Modo 3 e 4, baseados nos modos já existentes do D2D, mas apresentando uma nova estrutura de alocação dos canais de controle e de tráfego, visando diminuir a latência e aumentar a densidade de veículos abarcados pelo sistema. O Modo 3 possui agendamento centralizado, no qual a ERB do LTE (eNB) e o UE se comunicam via interface *Uu* e o Modo 4 usa agendamento distribuído entre os UEs, como nos Modos 1 e 2 do D2D respectivamente [2].

### A. V2X no 5G NR

Nos *Releases* 16 e 17, o 3GPP continuou a padronização de comunicações V2X utilizando como base o 5G *New Radio* (NR), surgindo o NR V2X [2]. O NR V2X herda do C-V2X tanto o SL, quanto a interface em que este se baseia (PC5). O mesmo ocorre com os modos de comunicação estabelecidos via SL, que são renomeados. O Modo 1 é equivalente ao Modo 3 do C-V2X enquanto o Modo 2 é equivalente ao Modo 4. Um exemplo de arranjo dos Modos 1 e 2 é mostrado na Fig.1.

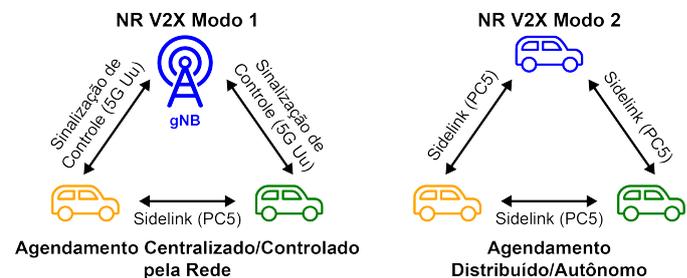


Fig. 1: Modos de Operação 1 e 2 do NR V2X (adaptado de [3]).

No Modo 2, os UEs podem selecionar os recursos para transmissão de forma aleatória ou com base em um procedimento baseado em sensoriamento, sendo este segundo, conforme mostra a Fig. 2, estabelecido em três etapas: 1) uma janela de sensoriamento; 2) um gatilho de transmissão; e 3) uma janela de seleção.

Na janela de sensoriamento, os UEs leem os *Sidelink Control Informations* (SCIs) de primeiro estágio associados

Ricardo Q. de F. H. Silva, Daniel R. de Luna, Dario G. de Macedo, Tarciana C. de B. Guerra e Vicente A. de Sousa Jr são da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, E-mails: {ricardo.queiroz.105, daniel.luna.088, dario.macedo.129, tarciana.guerra.051}@ufrn.edu.br e vicente.sousa@ufrn.br.

Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

As simulações fornecidas por esse trabalho foram realizadas com o apoio do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

aos recursos do SL. Após isso, o UE mede o *Reference Signal Received Power* (RSRP) das transmissões de outros UEs associadas aos SCIs de primeiro estágio e utiliza essas duas informações para determinar quais recursos candidatos da janela de sensoriamento devem ser excluídos da próxima janela de seleção, com base em critérios configurados. A janela de sensoriamento é o intervalo de tempo definido por  $[n - T_0, n - T_{proc,0})$ , no qual  $n$  é um gatilho de seleção.

Um gatilho de seleção é ativado no UE toda vez que são gerados pacotes para a transmissão. Logo após isso, se inicia a janela de seleção, na qual estão inclusos todos os recursos aptos à transmissão dentro do intervalo configurado no SL, denominados de  $T_1$  e  $T_2$ . A seleção do recurso para transmissão é feita de forma aleatória pelo UE, dentre os recursos presentes na janela de seleção.

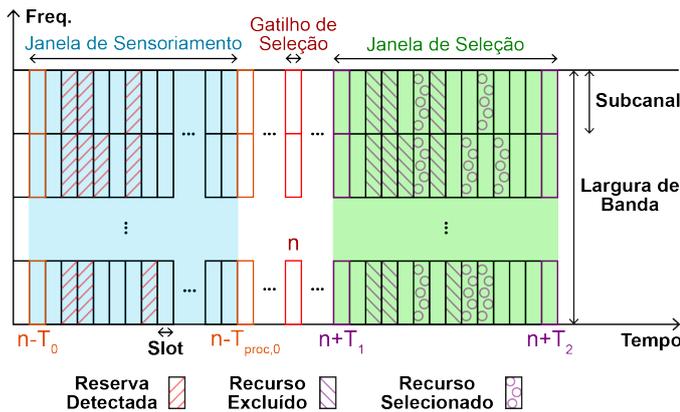


Fig. 2: Ilustração da janela de sensoriamento e de seleção do NR V2X SL Modo 2 (adaptado de [1]).

O NR V2X permite a escolha entre dois esquemas de agendamento para a transmissão de Blocos de Transporte (TBs): o dinâmico e o Semi-Persistente (SPS). O SPS permite que o UE selecione recursos para um número consecutivo de TBs e suas retransmissões. Esse número consecutivo de TBs é definido por uma variável chamada *Reselection Counter*, sorteada dentro de um intervalo pré-configurado e definido pelo Intervalo de Reserva de Recursos (RRI), toda vez que novos recursos devem ser selecionados. Por outro lado, no esquema de agendamento dinâmico, o UE precisa selecionar novos recursos para a transmissão de cada novo TB e suas retransmissões [1].

Os cenários V2X Modo 2 são extremamente dinâmicos e as configurações pré-estabelecidas podem não atender às necessidades do UE naquele instante da comunicação como atenderiam outrora. Como não existe comunicação do UE com gNBs, não são realizados alguns procedimentos como o de aferição do canal, que auxiliam, também, na escolha do *Modulation and Coding Scheme* (MCS) da transmissão do UE, dificultando, dentre outras questões, o estabelecimento de algoritmos de adaptação de enlace com base na SINR aferida via *feedback* de *Channel Quality Indicator* (CQI).

Ao identificar esse problema, este artigo visa estudar o impacto do MCS em cenários de comunicação NR V2X Modo 2, utilizando o módulo de NR V2X para o *Network Simulator Version 3* (ns-3) 5G-LENA, apresentado em [2].

O artigo é dividido da seguinte forma: a Seção II apresenta os estudos relacionados ao tema; a Seção III caracteriza o NR V2X no ns-3; a Seção IV descreve os cenários estabelecidos para estudo; a Seção V apresenta e discute os resultados

obtidos; e, por fim, a Seção VI traz as principais conclusões dos autores sobre o estudo realizado.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

A locomoção dos veículos em sistemas V2X traz uma alta dinamicidade no canal de comunicação entre os UEs, tornando a escolha do MCS uma etapa crucial para se alcançar alto desempenho em tais sistemas. Este fato se reflete na busca da comunidade científica em realizar estudos sobre esse parâmetro para diferentes cenários, serviços e topologias de sistemas V2X.

Trabalhos como [4] e [5] se dedicam a desenvolver algoritmos de adaptação de enlace para o LTE C-V2X Modo 4, cujo MCS é originalmente fixo. Os autores de [4] desenvolvem um algoritmo que entrega melhorias na interferência de subcanal e no congestionamento, mas não apresenta os melhores resultados para o sistema quando comparado aos outros MCSs avaliados. Em [5], cujo foco é melhorar a transmissão de dados do sistema, a adaptação de enlace trouxe benefícios quando comparada à transmissão com um MCS fixo não ideal. Ambos trabalhos relatam dificuldades e limitações na implementação de uma adaptação de enlace para o Modo 4, e ressaltam a necessidade desses algoritmos quando se tem cenários com alta densidade de UEs.

Quando se trata de NR V2X, os autores de [6] propõem a seleção de MCS pela maximização de uma função utilidade baseada na confiabilidade de entrega de pacotes. Contudo, os autores não deixam claro como tal solução pode ser empregada em sistemas reais. Em [7], um estudo similar ao realizado neste trabalho foca na avaliação do MCS para cenários de transmissões *broadcast*.

É interessante observar que os trabalhos aqui citados investigaram cenários diferentes e cada um deles apresenta um valor de MCS ótimo diferente para seu cenário, o que ressalta a importância do estudo do impacto do MCS para cada cenário específico de V2X. Este trabalho contribui nessa investigação.

## III. MODELAGEM DO SISTEMA NR V2X NO NS-3

Para suportar as funcionalidades do NR V2X, os autores de [2] realizaram modificações em todas as camadas da pilha de protocolos do módulo 5G-LENA [8], desde a *Non-Access Stratum* (NAS) até a camada PHY.

O protocolo NAS passou a suportar a ativação de *bearers* de SL, mapeamento de pacotes de Protocolo de Internet (IP) para os *bearers* de SL (com base apenas no endereço IP do destino) e transmissão/recepção de pacotes no estado NAS OFF.

Conforme estabelece o TS 38.331 [9], a camada *Radio Resource Control* (RRC) foi remodelada para poder criar *bearers* do SL ao receber uma notificação da NAS e pré-configurar UEs em um cenário sem a cobertura de gNBs. A RRC também é responsável pela configuração das *Bandwidth Parts* (BWPs) do SL e das *pools* de transmissão e recepção, que neste caso é usada uma única *pool* para ambas as direções.

Devido à possibilidade de, no Modo 2, UEs selecionarem o mesmo *Logical Channel Identifier* (LCID), foram adicionados dois novos identificadores de Camada 2 (ID da Camada 2 de origem e ID da Camada 2 de destino), conforme estabelece [10]. Assim, é possível identificar o UE transmissor de uma mensagem ainda que o LCID coincida com o de outras transmissões. Essa implementação abrange mudanças

nas camadas *Medium Access Control* (MAC), *Radio Link Control* (RLC) e *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP).

A camada MAC foi bastante modificada para dar suporte ao SL. Houve a implementação de uma nova interface de agendamento, a qual fornece todas as informações necessárias para agendadores realizarem a seleção dos recursos do SL. Foi adicionado um buffer de dados de sensoriamento fornecidos pela camada PHY para dar suporte à seleção de recursos baseada em sensoriamento, e também foi implementado o algoritmo de seleção de recursos descrito na Subseção I-A.

A camada PHY recebeu acréscimos de protocolos para aferir os recursos selecionados para transmissão pela camada MAC. Essa camada agora é capaz de rastrear os valores SINR para cada transmissão do SL, sendo possível determinar qual pacote é decodificado com sucesso. Além disso, foram implementadas rotinas relacionadas aos protocolos de seleção de recursos baseada em sensoriamento.

Um dos parâmetros configuráveis no *script* de simulação disponível é o MCS, cujo índice pode ser definido de 0 a 28. Sua implementação dentro do módulo segue o que está estabelecido pelo 3GPP, na Tabela 5.1.3.1-1 de [11].

Apenas transmissões *broadcast* estão implementadas no *script* de simulação, deste modo, as transmissões agendadas ocorrem de todos os UEs e para todos os UEs do cenário. O esquema de agendamento implementado é o SPS.

A estruturação do SL entre as camadas descritas nessa seção foi reunida em uma classe *helper*. Portanto, o usuário do ns-3 consegue configurar todos os parâmetros do SL por meio dos métodos de configuração dessa classe.

O módulo disponibiliza funções baseadas em *callbacks* para coletar os dados e os dispor em um arquivo de resultados. O arquivo final é um banco de dados contendo *Key Performance Indicators* (KPIs) das camadas PHY e MAC dos canais de controle e de tráfego. Os resultados apresentados neste artigo são baseados nos seguintes KPIs:

- *Packet Inter-reception Delay* (PIR): intervalo de tempo decorrido entre duas recepções bem-sucedidas de pacotes transmitidos por um UE vizinho específico. Informa sobre latência;
- *Packet Reception Ratio* (PRR): proporção de UEs vizinhos que receberam o pacote enviado com sucesso sobre o número total de UEs vizinhos. Informa sobre confiabilidade;
- *Throughput*: número total de bytes recebidos corretamente durante o tempo de simulação, medido na camada de aplicação, para cada par transmissão-recepção de UE.

Segundo determina [12], o PIR e a PRR foram calculados levando em consideração o *Awareness Range* dos UEs, ou seja, só são computados valores referentes a outros UEs dentro do raio definido pelo *Awareness Range*. O *Throughput* é calculado levando em consideração todos os UEs do cenário.

#### IV. CENÁRIOS DE AVALIAÇÃO

O cenário V2X investigado neste artigo segue o cenário de avaliação para rodovias descrito no TR 38.885 do 3GPP [12]. Seguindo os resultados de [2], os valores dos parâmetros de referência adotados nesta investigação são os que visam proporcionar os melhores KPIs para o cenário. A Tabela I mostra os parâmetros de configuração, enquanto a Fig. 3 ilustra a disposição dos veículos do cenário de referência.

O estudo foi dividido em três campanhas de simulação em que se avaliou o impacto do MCS para: 1) o cenário

TABELA I: Parâmetros de configuração do cenário de referência.

Parâmetro	Valor	Referência
Número de veículos por faixa	50	[2]
Número de faixas	3	[12]
Distância entre as faixas	4 m	[12]
Distância entre os veículos	78 m	[12]
Velocidade dos veículos	140 km/h	[12]
Tamanho do pacote	300 bytes	[12]
Intervalo entre pacotes	100 ms	[12]
Largura de banda do SL	10 MHz	[12]
Frequência central do SL	5.9 GHz	[12]
Numerologia do SL	2 (SCS = 60 kHz)	[2]
Comprimento da janela de sensoriamento	100 ms	[2]
Comprimento da janela de seleção	64 slots	[2]
Tamanho do subcanal do SL	10 RBs	[2]

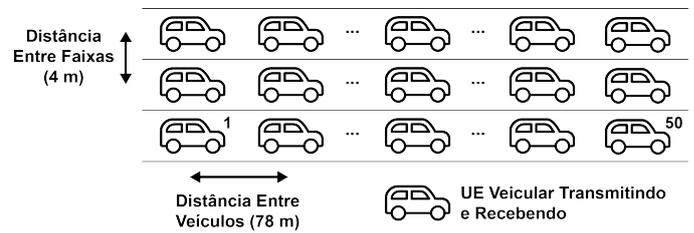


Fig. 3: Cenário de rodovia com 3 faixas, 3,9 km de comprimento e 50 veículos (UEs) por faixa, se movendo a uma velocidade de 140 km/h (adaptado de [2]).

de referência; 2) um cenário em que se aumenta a distância entre os veículos e o *Awareness Range* dos UEs, de forma proporcional; e 3) um cenário no qual se varia a distância entre os veículos, sua velocidade e a quantidade de veículos por faixa. A Tabela II apresenta as variações dos parâmetros em cada campanha.

TABELA II: Principais parâmetros das campanhas de simulação.

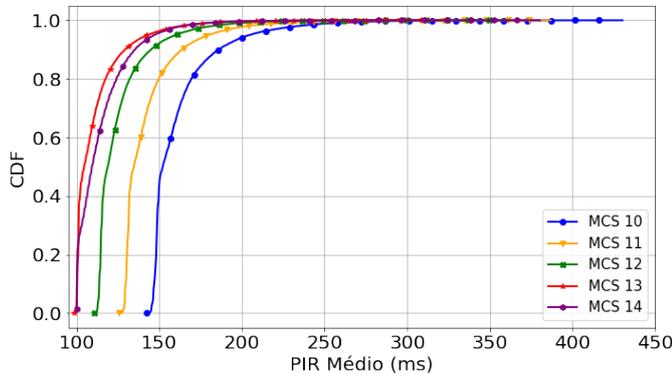
Campanha	1	2	3
Número de veículos por faixa	50	50	20 ou 80
Velocidade dos veículos (km/h)	140	140	70 ou 140
Distância entre os veículos (metros)	78	78, 156 ou 312	39 ou 78
<i>Awareness Range</i> (metros)	200	200, 400 ou 800	200

Conforme definido em [12], foram avaliadas as KPIs PIR, PRR e *Throughput* médias de cada uma das campanhas de simulação. Buscando maior confiabilidade estatística nos resultados, cada cenário foi simulado 20 vezes com o mesmo *script* de simulação e com sementes (*seeds*) diferentes do gerador de números aleatórios (20 *jobs*).

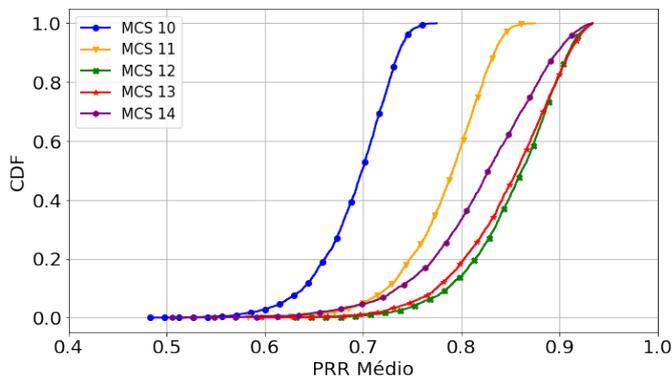
#### V. RESULTADOS

As Figs. 4, 5 e 6 mostram a sequência de três gráficos de Função de Distribuição Acumulada Empírica (CDF empírica) da PIR, da PRR e do *Throughput*. A CDF empírica foi usada para uma melhor visualização dos resultados, pois inclui os vários percentis dos dados amostrais.

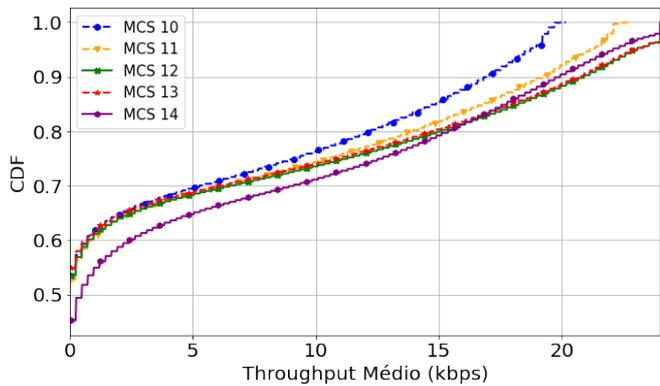
A Fig. 4 revela que existe um MCS ótimo para cada KPI avaliada. Para o PIR (Fig. 4a), o melhor foi o MCS 13, para a PRR (Fig. 4b) o MCS 12 e para o *Throughput* (Fig. 4c) existe um *trade-off* entre o MCS 12 e o 14, ou seja, para alguns usuários o MCS 12 será mais benéfico, enquanto para outros usuários o MCS 14 entregará uma taxa útil superior.



(a) CDFs do PIR.



(b) CDFs da PRR.



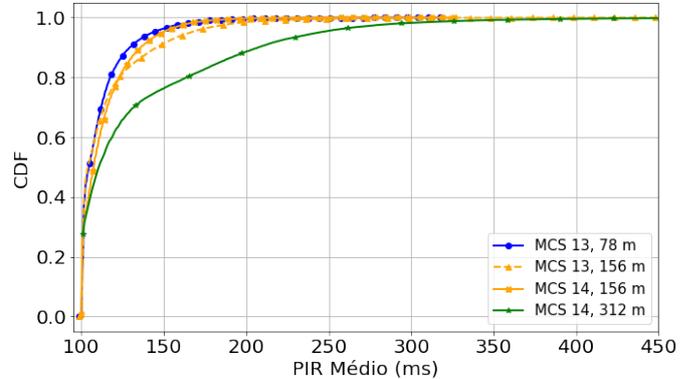
(c) CDFs do *Throughput*.

Fig. 4: Resultados da campanha do cenário de referência.

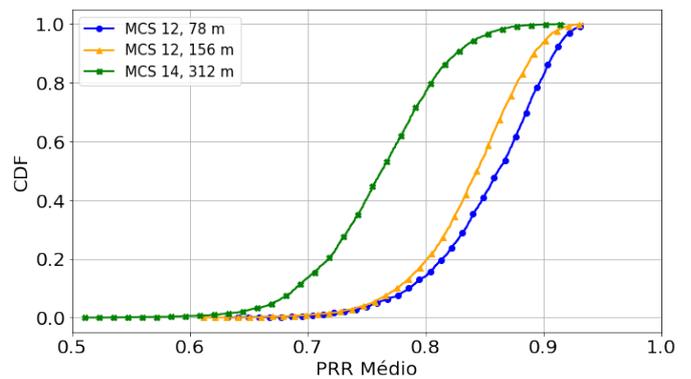
Para as Campanhas 2 e 3, buscou-se observar como o MCS ótimo varia de acordo com o cenário. Desta forma, foram comparadas as CDFs empíricas para os melhores valores de MCS de cada variação do mesmo cenário.

Os resultados da Campanha 2, em que a distância entre os veículos varia de 78, 156 ou 312 m, são mostrados na Fig. 5. O PIR (Fig. 5a) apresenta uma transição do valor ótimo de MCS, indo do 13 ao 14 à medida que a distância aumenta. Para distância de 78 m o MCS 13 permaneceu sendo o parâmetro ótimo, conforme o cenário de referência. Existe um *trade-off* entre o MCS 13 e o 14 para distância de 156 m, e para distância de 312 m tem-se que o MCS 14 apresenta o melhor

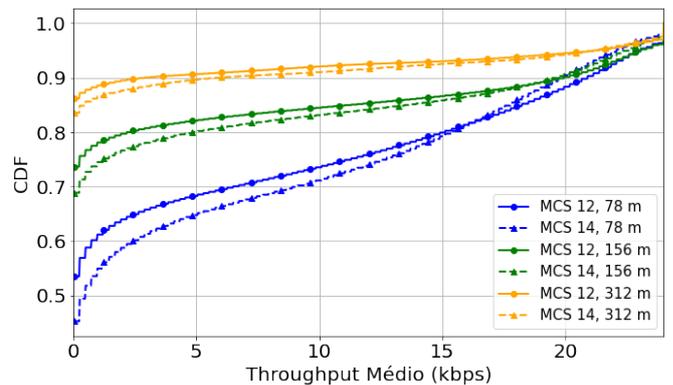
desempenho. Sobre a PRR (Fig. 5b), constata-se que o MCS 12 seguiu sendo o parâmetro ótimo para distâncias entre veículos de 78 e 156 m, mas para a distância de 312 m, o MCS ótimo passou a ser o 14. O *Throughput* (Fig. 5c) segue apresentando o comportamento de *trade-off* presente no cenário de referência. Como esperado, em todas as métricas avaliadas observou-se uma queda no desempenho à medida que a distância aumentou.



(a) CDFs do PIR (melhor MCS).



(b) CDFs da PRR (melhor MCS).

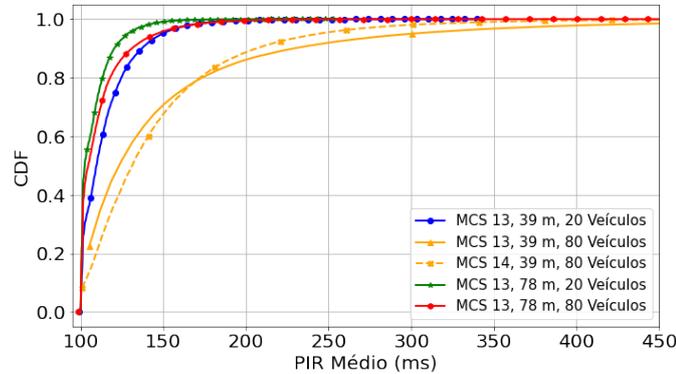


(c) CDFs do *Throughput* (melhor MCS).

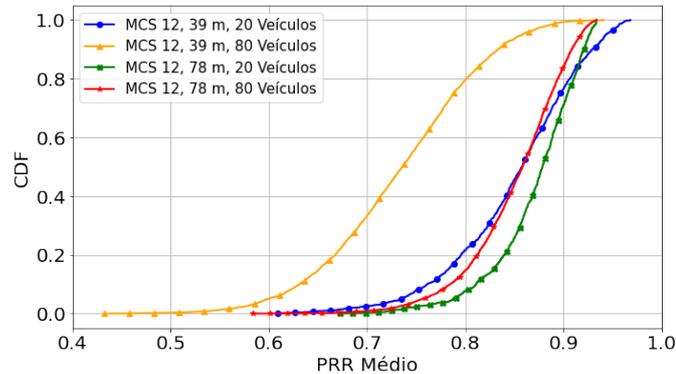
Fig. 5: Resultados da campanha do cenário com variação de distância entre os veículos.

A Fig. 6a mostra que, para três dos quatro cenários variados, o valor ótimo foi o MCS 13 em relação à métrica de PIR. Também se percebe que existe um *trade-off* entre MCS 13 e 14 quando a distância entre veículos é de 39 m e tem-se 80 veículos por faixa, o cenário mais crítico. Na KPI de PRR (Fig. 6b), o MCS 12 apresentou melhor desempenho para todas as variações do cenário. O comportamento do *Throughput* (Fig. 6c) se manteve o mesmo da campanha de simulação anterior, existindo um *trade-off* entre o MCS 12 e o 14.

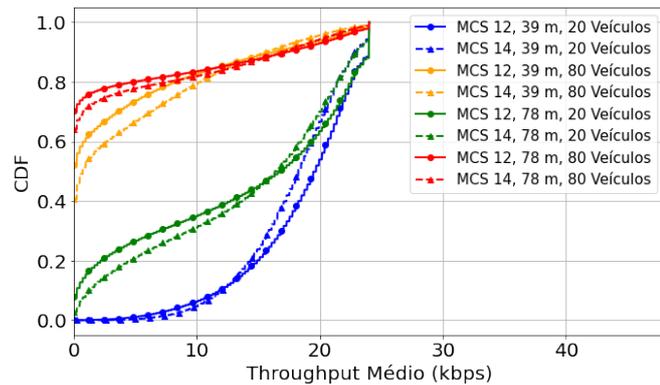
Os resultados da Campanha 3 expressam que existe uma correlação na diminuição da distância entre os veículos (aumento de interferência) com a perda de desempenho nas KPIs PIR e PRR, o que se acentua ainda mais quando se aumenta a quantidade de veículos por faixa. Quando se trata do *Throughput*, os usuários se beneficiam da menor distância entre os veículos, porém, uma menor quantidade de UEs por faixa segue entregando desempenhos melhores.



(a) CDF do PIR (melhor MCS).



(b) CDFs da PRR (melhor MCS).



(c) CDFs do *Throughput* (melhor MCS).

Fig. 6: Resultados da campanha com variação de distância, velocidade e de quantidade de veículos por faixa.

Em todos os cenários avaliados os veículos se movem em uma velocidade constante, isso significa que os veículos permanecem a uma distância de 4 m do veículo vizinho mais próximo. Os veículos nessa circunstância sofrem menos interferência e menos efeitos de desvanecimento em seu enlace de comunicação do que os que estiverem mais distantes. Neste sentido, é justificável a existência de *trade-off* entre os MCSs 12 e 14 para o *throughput*, já que os veículos possuem melhor desempenho com MCS 14 quando estão se comunicando com

veículos próximos e com MCS 12 ao se comunicar com veículos distantes. Isso se dá pela maior redundância do MCS 12, em comparação ao MCS 14, comprometer a taxa útil do sistema.

## VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma investigação sobre a configuração do MCS em um sistema NR V2X. A investigação mostrou o desempenho do cenário de referência baseado em [2] e de cenários em que se variou a distância entre os veículos, sua velocidade e a quantidade de veículos por faixa.

Os resultados apresentados evidenciam que o valor do MCS ótimo varia conforme a quantidade UEs e sua disposição no cenário, bem como com a KPI utilizada como critério na avaliação. A presença de *trade-offs* entre MCSs para as KPIs PIR e *Throughput* de alguns cenários conclui no reforço de que uma otimização das métricas pode ser obtida por meio de algoritmos de adaptação de enlace.

Sabendo das limitações impostas pelo Modo 2 do NR V2X, já apresentadas na literatura, adotar algoritmos de adaptação de enlace baseados em procedimentos não padronizados do NR V2X é uma solução passível de ganho, principalmente em cenários de transmissões *broadcast*, que demandariam alta taxa de processamento de dados pelo UE. Ressalta-se a possibilidade de uso de técnicas de aprendizado de máquina para, baseado em parâmetros já coletados por dispositivos V2X, se encontrar respostas associadas ao MCS ótimo para qualquer cenário.

Em trabalhos futuros, espera-se desenvolver um algoritmo de alocação de recursos e adaptação de enlace baseado em aprendizado de máquina e sua análise de valor agregado utilizando o módulo NR V2X do ns-3.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. H. C. Garcia, A. Molina-Galan *et al.*, “A Tutorial on 5G NR V2X Communications,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 23, no. 3, pp. 1972–2026, 2021.
- [2] Z. Ali, S. Lagén *et al.*, “3GPP NR V2X Mode 2: Overview, Models and System-Level Evaluation,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 89 554–89 579, 2021.
- [3] R. Shrestha, S. Y. Nam *et al.*, “Evolution of V2X Communication and Integration of Blockchain for Security Enhancements,” *Electronics*, vol. 9, no. 9, 2020. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/2079-9292/9/9/1338>
- [4] A. Burbano-Abril, B. McCarthy *et al.*, “MCS Adaptation within the Cellular V2X Sidelink,” in *2021 IEEE Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*, 2021, pp. 111–117.
- [5] J.-C. Yin and S.-H. Hwang, “Variable MCS method for LTE V2V Mode4,” in *2021 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, 2021, pp. 1368–1370.
- [6] K.-L. Chen, W.-Y. Chen, and R.-H. Hwang, “Optimizing Resource Allocation With High-Reliability Constraint for Multicasting Automotive Messages in 5G NR C-V2X Networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 4792–4804, 2023.
- [7] J. Yan and J. Härrri, “MCS Analysis for 5G-NR V2X Sidelink Broadcast Communication,” in *2022 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2022, pp. 1347–1352.
- [8] N. Patriciello, S. Lagen *et al.*, “An e2e simulator for 5g nr networks,” 2019.
- [9] 3GPP, “TSG RAN; NR; Radio Resource Control (RRC) protocol specification (Release 16),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.331, 09 2020, version 16.2.0.
- [10] —, “TSG RAN; NR; NR and NG-RAN Overall Description; Stage 2 (Release 16),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.300, 09 2020, version 16.3.0.
- [11] —, “TSG RAN; NR; Physical layer procedures for data (Release 16),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.214, 01 2021, version 16.4.0.
- [12] —, “TSG RAN; NR; Study on Vehicle-to-Everything (V2X) (Release 16),” 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Technical Specification (TS) 38.885, 03 2019, version 16.0.0.