

# Difusão Periódica Multinomial Ótima em VANETs *Slotted* Aloha Multicanal com Restrição Temporal

Geovanny Lucas de Lima Paulino, João Paulo José Vicente da Silva, Renato Mariz de Moraes

**Resumo**— Este trabalho apresenta um protocolo de difusão periódica de mensagens de alerta em redes *ad hoc* veiculares, obedecendo a um modelo probabilístico multinomial para descrever a probabilidade de transmissão com sucesso. O método utiliza o protocolo *Slotted* Aloha e faz uso de múltiplos canais de comunicação. Um modelo matemático da abordagem é proposto, sendo realizadas simulações para validar o modelo e gerar resultados. A abordagem proposta consegue atingir probabilidade de transmissão com sucesso de 99,9%, em um tempo máximo de 100 ms, atendendo aos requisitos de confiabilidade para redes veiculares, superando em desempenho as abordagens anteriores.

**Palavras-Chave**— Redes *Ad Hoc*, *Slotted* Aloha, VANETs.

**Abstract**— This paper describes a periodic rebroadcasting protocol for safety (warning) messages delivery in vehicular *ad hoc* networks (VANETs), following a multinomial probabilistic distribution modeling to calculate the successful delivery probability. The method uses *Slotted* Aloha as medium access control (MAC) protocol employing multiple communication channels. A mathematical model of the multinomial approach is conceived, and also simulation is performed to validate the model and generate results. This approach achieves successful delivery probability of 99,9%, in a time deadline of 100 ms, attending the safety requirements for VANETs, and outperforms the previous related proposed approaches.

**Keywords**— *Ad Hoc* Networks, *Slotted* Aloha, VANETs.

## I. INTRODUÇÃO

Em recente relatório global de segurança no trânsito da Organização Mundial da Saúde (WHO) [1], acidentes de trânsito resultaram em 1,35 milhões de mortes nos 175 países analisados, apenas no ano de 2016, além de gerar entre 20 e 50 milhões de pessoas com lesões. São a 8ª maior causa de mortes no mundo e também são a causa de morte mais comum de pessoas entre 5 e 29 anos de idade.

A tecnologia tem se tornado uma ferramenta capaz de atuar na prevenção de sinistros de trânsito. Uma das possíveis soluções são as redes *ad hoc* veiculares (VANETs) [17], redes sem fio consistindo de veículos, sendo que estes trocam informações entre si, sem necessariamente usar de um ponto de acesso central ou infraestrutura ao longo da estrada para mediar a comunicação entre os veículos. Entre as aplicações das VANETs, se encontram a propagação de alertas de segurança, informações da via e assistência ao condutor.

Um dos meios utilizados para realizar a propagação de informações nas VANETs é através de mensagens de difusão [6], de modo a atingir o máximo possível de nós vizinhos na rede. As mensagens de difusão têm os mais diversos objetivos nas VANETs, seja o mapeamento e manutenção da topologia

da rede, como também a disseminação de informações acerca de roteamento dos nós [17]. Também envia alertas de perigo e aviso de colisão, além de mensagens sobre possíveis acidentes aos motoristas, os quais podem então tomar contramedidas. As restrições na difusão se dão através dos rígidos requisitos de confiabilidade [5], sendo estes o prazo máximo de entrega de pacotes, com o valor de 100 ms estipulado devido ao tempo de reação do motorista, e a probabilidade de entrega com sucesso, que deve ser maior ou igual a 99,9%.

Este trabalho propõe um protocolo de retransmissão de pacotes, utilizando um modelo probabilístico multinomial para maximizar a probabilidade de entrega com sucesso, empregando o protocolo MAC *Slotted* Aloha [16], com múltiplos canais de comunicação. A estratégia busca unir eficiência e simplicidade no protocolo de difusão de pacotes de alerta de segurança no trânsito, visando a entrega com sucesso das mensagens e obedecendo aos requisitos de confiabilidade das VANETs. O estudo considera a presença de terminais escondidos e a possibilidade de ocorrência de falhas na recepção.

No restante deste artigo, a Seção II apresenta uma revisão da literatura relacionada. A Seção III descreve as premissas utilizadas na construção do modelo da rede veicular. A Seção IV descreve a difusão multicanal não periódica e a geométrica. A Seção V explica a abordagem multinomial. A Seção VI apresenta a análise de desempenho do protocolo, comparando com propostas relacionadas. A Seção VII conclui o trabalho.

## II. TRABALHOS RELACIONADOS

O protocolo de difusão proposto neste artigo parte da abordagem de difusão proposta por [4], que investigou a probabilidade de acesso ótimo  $a^*$  que maximiza a chance de transmissão bem sucedida em VANETs, utilizando-se o protocolo *Slotted* Aloha para acesso ao meio de comunicação. Considerou-se um modelo não periódico de transmissão de mensagens, monocal, onde o prazo de entrega é dividido em *slots*, nos quais é realizada a tentativa de transmissão da mensagem, focando na transmissão de um nó da rede. Cada nó tem a mesma probabilidade de acesso  $a$  ao canal, considerando-se a rede saturada (todos os nós têm pacotes a transmitir) e a transmissão só é tentada, no máximo, uma única vez. Apesar de conseguir a expressão para a probabilidade ótima de acesso que maximiza a probabilidade de sucesso, dentro das condições especificadas, a abordagem não levou em consideração o problema dos terminais escondidos [5], ou seja, considerar nós cuja transmissão pode resultar na colisão de pacotes caso transmitam simultaneamente ao nó em estudo e não apresentou uma modelagem da probabilidade de falha na recepção da mensagem por efeitos do canal.

Em [2] há a continuidade da abordagem de [4], calculando-se a probabilidade de acesso ótima para um modelo não periódico de transmissão de pacotes em VANETs, mas levando em consideração a presença de terminais escondidos na rede. Ao utilizar-se também de um modelo não periódico de difusão, obteve-se que a presença de terminais escondidos representa um obstáculo importante a ser considerado na probabilidade de transmitir a mensagem com sucesso. Em [3], há a continuidade da pesquisa, com a proposição de modelos não periódicos e periódicos de difusão de mensagens em VANETs, considerando o protocolo *Slotted Aloha* para acesso ao meio e erros decorrentes da camada física na recepção com sucesso das mensagens, para um cenário monocanal. A estratégia de retransmissão (periódica) divide o prazo de entrega máximo  $D_f$  em  $N$  ciclos de retransmissão de tamanho  $D_p$  slots, onde em cada um pode ser tentada a transmissão com probabilidade  $a$  e os nós receptores estejam sujeitos a uma probabilidade de falha  $p_f$  ao receber a mensagem. Essa estratégia levou em consideração duas formas de contabilizar a probabilidade de sucesso: o modelo geométrico e o multinomial. O geométrico considera a transmissão com sucesso para todos os nós da região receptora se estes conseguirem receber com sucesso a mensagem em um mesmo ciclo (tentativa) de retransmissão. O multinomial considera que todos os nós conseguem receber com sucesso a mensagem antes do fim do prazo máximo de entrega, independente do ciclo de retransmissão em que recebem a mensagem. Os resultados, em termos de probabilidade de sucesso, melhoraram com relação ao modelo de transmissão não periódico, mas a modelagem proposta ainda não atendeu aos requisitos de confiabilidade das VANETs.

### III. MODELAGEM DA REDE

Esta seção estende o modelo de VANETs de [4], [2] e [3] aplicando o protocolo *Slotted Aloha* multicanal.

#### A. O Protocolo MAC *Slotted Aloha* Multicanal

O protocolo de acesso ao meio *Slotted Aloha* [16] divide a linha do tempo em *slots* de mesmo tamanho, sendo os nós sincronizados de modo que a transmissão só pode ocorrer no início de um *slot*. A duração da mensagem é igual ao tamanho do *slot*. Em [8], foi investigada a utilização do *Slotted Aloha* para a transmissão de pacotes utilizando múltiplos canais independentes. A ideia é aproveitar a disponibilidade de bandas de comunicação para poder aumentar a vazão da rede, aumentando-a de  $\frac{1}{e}$  para  $\frac{C}{e}$ , onde  $C$  é a quantidade de canais disponíveis ao protocolo. Tal abordagem diminui a probabilidade de colisão, dado que os nós têm mais possibilidades de canais para envio de pacotes. O protocolo multicanal segue os mesmos moldes do monocanal, e sua motivação decorre do fato que a família do padrão IEEE 1609 (WAVE) para VANETs [7] já considera o uso de múltiplos canais.

Trabalhos como [11] abordaram a implementação e aplicabilidade de variações do *Slotted Aloha* em VANETs (*RR-Aloha*, *RR+-Aloha* e *MS-Aloha*). Em [9], analisou-se a competitividade das variações do protocolo *Slotted Aloha* frente ao padrão 802.11p, usado pelas redes veiculares, que se baseia no protocolo *CSMA/CA*, obtendo resultados promissores que abriu uma nova linha de pesquisa nas VANETs [10].

#### B. Camada Física (PHY)

Usando a robusta modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) para o sinal transmitido, a probabilidade de erro de bit  $p_{BER}$  do sinal recebido é dada por [14]

$$p_{BER} = \int_0^\infty Q(\sqrt{2\gamma})p_\gamma(\gamma)d\gamma, \quad (1)$$

onde  $\gamma$  é a relação sinal-ruído (SNR, do inglês *signal-to-noise ratio*), modelada pela distribuição de densidade de probabilidade Nakagami- $m$  dada por [14], [12]

$$p_\gamma(\gamma) = \frac{1}{\Gamma(m)} \left(\frac{m}{\bar{\gamma}}\right)^m \gamma^{m-1} e^{-\frac{m\gamma}{\bar{\gamma}}}, \quad (2)$$

sendo  $m$  o parâmetro de desvanecimento da distribuição Nakagami- $m$ , e  $\bar{\gamma}$  o valor médio da SNR dado por [14], [12]

$$\bar{\gamma} = \frac{P_T G_T G_R \lambda^2}{(4\pi)^2 R_x N_0 d^l}, \quad (3)$$

onde  $R_x$  é a taxa de transmissão em bits por segundo,  $N_0$  é a densidade espectral de ruído, assumindo um canal com ruído aditivo gaussiano branco,  $P_T$  é a potência de transmissão,  $G_T$  e  $G_R$  representam os ganhos das antenas transmissoras e receptoras, respectivamente,  $d$  representa a distância entre os nós que se comunicam e  $l$  é o expoente de atenuação do sinal.  $\lambda$  representa o comprimento de onda do sinal transmitido, e é dado por  $\lambda = \frac{c}{f}$  em que  $c$  é a velocidade de propagação da luz e  $f$  é frequência da onda portadora do sinal.

#### C. Topologia da Rede

A topologia da rede se dá com os nós dispostos em uma área ilimitada (ver Fig. 1), obedecendo uma distribuição bidimensional de Poisson, com densidade  $\sigma$  nós/ $m^2$ , em que [4], [2], [3],

$$p(i, A) = \frac{(\sigma A)^i e^{-\sigma A}}{i!}, \quad (4)$$

é a probabilidade de se encontrar  $i$  nós em uma área  $A$ .

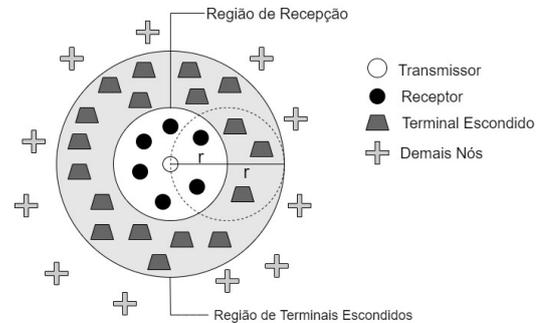


Fig. 1: Distribuição dos nós na rede *ad hoc* veicular.

Da Fig. 1, considerando o nó transmissor no centro,  $N_r$  é a quantidade de nós na região de recepção de raio  $r$  a partir do transmissor (região de *broadcast*),  $N_H$  a quantidade de nós na região de terminais escondidos que se situam a uma distancia maior que  $r$  e menor que  $2r$  a partir do transmissor, e  $M$  é a quantidade total de nós. Assim, tem-se que

$$N_r = \pi\sigma r^2, \quad N_H = 3\pi\sigma r^2, \quad M = N_r + N_H = 4\pi\sigma r^2. \quad (5)$$

### IV. ABORDAGENS NÃO PERIÓDICA E GEOMÉTRICA

Para a transmissão de uma mensagem na rede, são feitas as seguintes considerações: *i*) O tempo é dividido em *slots* para a ocorrência de transmissão; *ii*) Cada nó da rede tenta transmitir com uma probabilidade  $a$ , em determinado *slot*, idêntica para todos os nós; *iii*) Se um nó transmite, este sorteará de maneira uniforme um entre os  $C$  canais disponíveis

para transmitir e os nós podem receber em todos os canais empregando um esquema como descrito em [8]; *iv*) Uma colisão ocorre quando dois ou mais nós transmitem no mesmo canal, considerando todos os  $M$  nós da região de influência; *v*) Não há confirmação da recepção com sucesso da mensagem transmitida por nenhum nó, bem como não há retransmissão da mensagem pelos nós receptores; *vi*) As mensagens de difusão têm um prazo máximo de entrega  $D_f$ , o equivalente em *slots* da restrição de latência (considerada  $100\text{ ms}$ , ou  $500\text{ slots}$ ); *vii*) A probabilidade de falha  $p_f$  refere-se a erro na recepção da mensagem. São considerados dois cenários, onde o primeiro usa probabilidade constante  $p_f = 0, 1$ , e o segundo considera a probabilidade modelada com a abordagem de camada física, sendo que, para uma mensagem de tamanho  $S$ , e considerando a falha associada ao erro por bit, resulta que

$$p_f = 1 - (1 - p_{BER})^S. \quad (6)$$

Considerando a probabilidade de acesso com sucesso ao canal  $p_{ac}$ , em um prazo de entrega de  $D_f$  slots, com probabilidade de acesso ao canal  $a$ , com  $C$  canais disponíveis e  $M$  nós na rede, dado que nenhum nó transmite mais de uma vez dentro do prazo, devemos ter que

$$p_{ac}(a, C, D_f, M) = \sum_{k=1}^{D_f} a(1-a)^{k-1} p_{naf}(a, M, k, C), \quad (7)$$

onde  $p_{naf}(a, M, k, C)$  é a probabilidade de nenhum nó transmitir no mesmo canal que o nó considerado, no *slot*  $k$ ,

$$\begin{aligned} p_{naf}(a, M, k, C) &= \sum_{i=0}^{M-1} \binom{M-1}{i} [1 - (1-a)^{k-1}]^i \\ &\quad \times (1-a)^{(k-1)(M-1-i)} \left(1 - \frac{a}{C}\right)^{M-1-i} \\ &= \frac{C \left(1 - \frac{a}{C}\right)^M (1-a)^{(k-1)(M-1)} \left(\frac{(1-a)^{-k} [a((1-a)^k + C) - C]}{a-C}\right)^{M-1}}{C-a}, \end{aligned} \quad (8)$$

onde no *slot*  $k$ ,  $i$  nós podem ter tentado transmitir anteriormente, enquanto os outros  $M-1-i$  não podem ter tentado transmitir anteriormente, e não podem transmitir no mesmo canal que o nó em estudo.

Como extensão dos modelos propostos em [3], utilizando a probabilidade de acesso dada pela Eq. (7), para o protocolo não periódico, temos a probabilidade de sucesso  $p_s$  dada por

$$p_s(a, C, D_f, \sigma, p_f) = p_{ac}(a, C, D_f, M)(1-p_f)^{N_r-1}, \quad (9)$$

onde não pode haver falha na recepção da mensagem por nenhum dos  $(N_r-1)$  nós da região receptora e excetuando-se o nó transmissor.

Já para o modelo de retransmissão periódico com modelagem probabilística geométrica, dada a divisão do prazo de entrega  $D_f$  em  $N$  ciclos de retransmissão, de tamanho  $D_p$  slots, e para uma transmissão com sucesso todos os nós devem receber a mensagem no mesmo ciclo, temos que a probabilidade de sucesso pode ser dada por

$$p_s(a, C, D_p, M, N_r, p_f, N) = 1 - (1 - p_{ac}(a, C, D_p, M)(1-p_f)^{N_r-1})^N, \quad (10)$$

onde o termo elevado a  $N$  é a probabilidade de ocorrer a falha na transmissão para pelo menos um nó, em todos os  $N$  ciclos.

## V. ABORDAGEM PERIÓDICA MULTINOMIAL MULTICANAL

O protocolo de retransmissão que utiliza o modelo multinomial se apresenta como uma alternativa para a entrega com sucesso de mensagens na rede veicular. O prazo de entrega  $D_f$  é dividido em prazos parciais  $D_p$ , gerando assim  $N = D_f/D_p$  ciclos de retransmissão. Logo, em cada intervalo  $D_p$ , cada nó realiza uma tentativa de transmissão. A Fig. 2 ilustra a divisão do prazo de entrega final  $D_f$  em  $N$  ciclos de retransmissões.

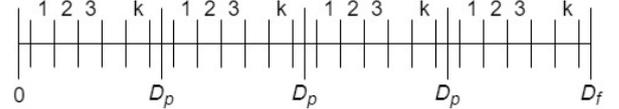


Fig. 2: Diagrama dos ciclos de retransmissão.

O sucesso na recepção de uma mensagem *broadcast*, no modelo multinomial, se dá pela recepção com sucesso, da mensagem transmitida, por todos os nós da região de recepção ao fim do prazo  $D_f$ . Ou seja, sendo os  $N$  ciclos de retransmissão, e  $N_{rti}$  a quantidade de nós que receberam com sucesso a mensagem no ciclo  $i$ , devemos ter que

$$N_r - 1 = \sum_{i=1}^N N_{rti}, \quad (11)$$

onde se exclui o nó transmissor dos possíveis receptores. Como a recepção com sucesso pode acontecer de diferentes maneiras, nos diferentes ciclos de retransmissão, temos que, para um número  $N_r - 1$  de nós, com um número  $N_s$  de ciclos, a quantidade de possibilidades é igual a

$$N_s^{N_r-1} = \sum_{N_{rt1}, N_{rt2}, N_{rt3}, \dots, N_{rtN_s}} \binom{N_r-1}{N_{rt1}, N_{rt2}, N_{rt3}, \dots, N_{rtN_s}}, \quad (12)$$

sendo ilustrada uma possível configuração na Fig. 3.

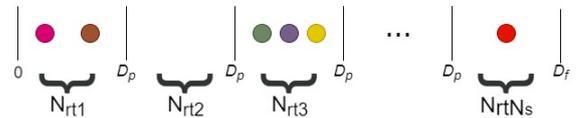


Fig. 3: Exemplo de disposição dos nós que recebem com sucesso uma mensagem transmitida nos ciclos de retransmissão  $D_p$ , no modelo multinomial.

### A. Fórmula Extensa da Probabilidade de Sucesso

Supondo uma possível configuração  $i$ , entre as  $N_s^{N_r-1}$  possíveis, seja  $n_{i,j}$  a quantidade de nós que receberam com sucesso a mensagem, no ciclo de retransmissão  $j$ . Seja também  $N_{f,i,j}$  o número de nós que ainda não receberam a mensagem com sucesso, no ciclo  $j$ , assim

$$N_{f,i,j} = N_r - 1 - \sum_{k \leq j} n_{i,k}. \quad (13)$$

Dado que  $\sum_{j=1}^{N_s} n_{i,j} = N_r - 1$  e considerando a probabilidade dos  $n_{i,j}$  nós receberem com sucesso, resulta que a probabilidade do nó transmissor conseguir transmitir com sucesso é dado pelo seguinte termo

$$p_{ac}(a, C, D_p, M)^{N_s} \sum_{i=1}^{N_s^{N_r-1}} \prod_{j=1}^{N_s} [(1-p_f)^{n_{i,j}} p_f^{N_{f,i,j}}],$$

onde o produtório se refere aos  $N_s$  ciclos de acesso com sucesso,  $p_f$  é a probabilidade de falha, em que o somatório se dá com relação a todas as possíveis configurações de recepção dos nós, e o nó consegue acesso com sucesso ao canal com  $p_{ac}$  em  $N_s$  ciclos. Levando em consideração a quantidade total  $N$  de ciclos, dado o acesso com sucesso em pelo menos um ciclo para ser contabilizado o sucesso da transmissão ( $N \geq N_s \geq 1$ ), tem-se que a probabilidade de sucesso  $p_s$  é dada na forma extensa por

$$p_s(a, C, D_p, M, N_r, p_f, N) = \sum_{N_s=1}^N \left[ \binom{N}{N_s} \times (1 - p_{ac}(a, C, D_p, M))^{N-N_s} p_{ac}(a, C, D_p, M)^{N_s} \right] \times \sum_{i=1}^{N_s} \prod_{j=1}^{N_s} [(1 - p_f)^{n_{i,j}} p_f^{N_{f,i,j}}]. \quad (14)$$

A equação obtida pode ser maximizada obtendo-se o valor ótimo para a probabilidade  $a$  de acesso ao canal por cada nó. Para fins de simplificação na notação, tomando

$$t(N_r, N_s, p_f) = \sum_{i=1}^{N_s} \prod_{j=1}^{N_s} [(1 - p_f)^{n_{i,j}} p_f^{N_{f,i,j}}], \quad (15)$$

que não depende de  $a$ , derivando  $p_s$  com relação a  $a$  e igualando a zero, obtém-se

$$\frac{\partial p_s}{\partial a} = \frac{\partial p_{ac}}{\partial a} \left\{ \sum_{N_s=1}^{N-1} \left[ -(N - N_s)(1 - p_{ac})^{N-N_s-1} + N_s p_{ac}^{N_s-1} \right] \times \binom{N}{N_s} t(N_s, N_r, p_f) \right\} + N(p_{ac}^{N-1}) t(N, N_r, p_f) = 0,$$

e que resulta 
$$\frac{\partial p_{ac}(a, C, D_p, M)}{\partial a} = 0, \quad (16)$$

que não apresenta fórmula fechada, sendo resolvida numericamente. A Eq. (14), obtida para  $p_s$ , apresenta uma complexidade de implementação inerente, dada a necessidade de se gerar todas as possíveis combinações dos nós nos ciclos de retransmissão para efetuar seu cálculo. Assim, na próxima seção é apresentada uma modelagem equivalente, recursiva, que possibilita uma abordagem mais intuitiva do modelo probabilístico. Aproveitando a probabilidade de acesso ótima obtida, pode-se utilizar a abordagem recursiva para gerar os resultados do modelo analítico.

### B. Fórmula Recursiva da Probabilidade de Sucesso

A abordagem de contabilização no modelo multinomial se baseia na transmissão com sucesso acumulado entre os diversos ciclos de retransmissão, de modo a alcançar sucesso no envio da mensagem se todos os nós tiverem recebido a mensagem até um ciclo  $N_s \leq N$ . Dessa maneira, pode-se definir a seguinte função recursiva  $p_s(a, C, D_p, M, N_{rm}, p_f, N_s)$  que contabiliza a probabilidade de entrega de pacotes com sucesso, onde  $N_{rm}$  representa a quantidade de nós que ainda faltam receber o pacote,  $N_s$  representa a quantidade de ciclos restantes para retransmissão e os demais parâmetros são iguais aos definidos para a equação extensa (14). Dessa forma a função recursiva obedece às seguintes condições:

$$p_s(a, C, D_p, M, N_{rm}, p_f, N_s) = \begin{cases} 1, & \text{se } N_s \geq 0 \text{ e } N_{rm} = 0; \\ 0, & \text{se } N_s = 0 \text{ e } N_{rm} > 0. \end{cases} \quad (17)$$

Dessa maneira, há duas situações distintas na transmissão: *i*) o nó transmissor consegue acesso ao canal com sucesso  $p_{ac}$ , transmitindo com sucesso para  $n_{N_s}$  nós, variando de 0 a  $N_{rm}$ . Assim, o termo da probabilidade é contabilizado como

$$\sum_{n_{N_s}=0}^{N_{rm}} \binom{N_{rm}}{n_{N_s}} p_{ac}(a, C, D_p, M) (1 - p_f)^{n_{N_s}} \times p_f^{N_{rm} - n_{N_s}} p_s(a, C, D_p, M, N_{rm} - n_{N_s}, p_f, N_s - 1),$$

indo para o próximo ciclo  $N_s - 1$  com uma quantidade de nós  $N_{rm} - n_{N_s}$ ; *ii*) O nó não consegue acesso com sucesso ao canal com probabilidade  $1 - p_{ac}$ , e deve tentar no próximo ciclo, termo dado por

$$(1 - p_{ac}(a, C, D_p, M)) p_s(a, C, D_p, M, p_f, N_s - 1).$$

Sendo os dois eventos disjuntos, a probabilidade de entrega com sucesso é então dada por

$$p_s(a, C, D_p, M, N_{rm}, p_f, N_s) = (1 - p_{ac}(a, C, D_p, M)) \times p_s(a, C, D_p, M, N_{rm}, p_f, N_s - 1) + \sum_{n_{N_s}=0}^{N_{rm}} \binom{N_{rm}}{n_{N_s}} p_{ac}(a, C, D_p, M) (1 - p_f)^{n_{N_s}} (p_f)^{N_{rm} - n_{N_s}} \times p_s(a, C, D_p, M, N_{rm} - n_{N_s}, p_f, N_s - 1). \quad (18)$$

Apesar do termo recursivo ser mais intuitivo, sua complexidade computacional é a mesma do modelo extenso  $O(N^{N_r})$ , com seu uso sendo inviável para valores altos de  $N_r$  e  $N$ .

Para contornar essa limitação, para a validação do modelo analítico, foi gerada uma simulação dos eventos de difusão, que depois é utilizada para a geração de resultados para valores maiores dos parâmetros da rede  $N$  e  $N_r$ . A simulação se baseia na criação da topologia da rede, gerando aleatoriamente um nó transmissor e os nós da região de recepção, bem como da região de terminais escondidos. A cada execução da simulação, o nó transmissor tenta enviar com sucesso a mensagem para todos os nós da região receptora, em cada um dos  $N$  ciclos de retransmissão, sendo sujeito a uma probabilidade ótima de acesso ao canal  $a^*$ , calculada à priori da Eq. (16), e cada nó receptor estando sujeito a uma probabilidade de falha  $p_f$ , calculada de acordo com a configuração da rede. Sendo *sucessos* o número de rodadas com transmissão bem-sucedida e  $q$  a quantidade total de rodadas, temos que  $p_s = \frac{\text{sucessos}}{q}$ .

## VI. AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO

Aqui se considera os requisitos de confiabilidade das redes veiculares, em que a latência máxima permitida para entrega de pacotes é 100 ms, representada por  $D_f = 500$  slots, devendo ser  $p_s \geq 99,9\%$ . As simulações foram realizadas em MATLAB para a geração da topologia da rede e na execução dos eventos de transmissão e recepção de pacotes, além de contabilizar  $p_s$ , sendo gerados os resultados com nível de confiança de 95%. A Tabela I ilustra os valores adotados para a simulação, seguindo as especificações das redes veiculares que descrevem o ambiente das camadas PHY e MAC, validados com dados obtidos para simulação em [12] e [15].

TABELA I: Parâmetros para camada física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) para redes veiculares com protocolo 802.11p [12], [15].

Parâmetros	Descrição	Valores
$R_x$	Taxa de dados	6 Mbps
$S$	Tamanho da mensagem	150 Bytes
$P_T$	Potência de transmissão	33 dBm
$N_0$	Ruído no canal	-174 dBm/Hz
$r$	Raio da região de recepção	300 m
$r_{max}$	Raio da região de influência	1,3 km
$G_t$ e $G_R$	Ganho das antenas	4 dBi
$f$	Frequência da portadora	5,9 GHz
$c$	Velocidade da luz	$3 \times 10^8$ m/s
$B$	Largura de banda	10 MHz
$m$	Parâmetro de desvanecimento	1,75 ( $d \leq 80m$ ) e 0,75 ( $d > 80m$ )

A Fig. 4 mostra que o modelo teórico e a simulação dos eventos possuem resultados similares para a probabilidade de entrega com sucesso ( $p_s$ ) em função do número de usuários ( $M$ ), para 1 e 3 canais ( $C$ ), usando 2, 5 e 10 repetições ( $N$ ).

A Fig. 5 ilustra que o modelo multinomial apresenta uma probabilidade final de entrega superior quando comparado ao modelo não periódico e ao modelo geométrico, tanto monocanal, quanto multicanal, apresentando para  $M = 100$

usuários  $p_s = 52\%$  para  $C = 1$  e  $N = 10$ , em comparação a  $p_s = 5,6\%$  no caso não periódico com  $C = 1$  e  $p_s = 29,7\%$  no caso geométrico, para  $N = 20$ . Além disso, para  $C = 3$  canais de comunicação e  $M = 100$  usuários, o modelo multinomial apresenta  $p_s = 86\%$ , com  $N = 5$ , para  $p_s = 95\%$ , com  $N = 10$  repetições, em comparação a  $p_s = 6,9\%$  no caso não periódico e  $p_s = 34\%$  no caso geométrico, para  $N = 20$  repetições. E ainda, para  $N = 5$  repetições e usando 3 canais do protocolo 802.11p, é possível atingir  $p_s = 99,9\%$  para  $M \leq 16$  usuários, ou ainda melhor para  $M \leq 40$  quando  $N = 10$ , mesmo com a probabilidade de falha em  $10\%$ .

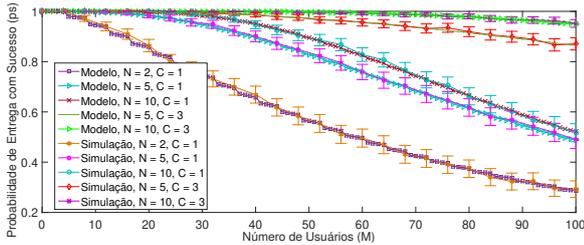


Fig. 4:  $p_s$  versus  $M$  no modelo multinomial para  $C=1$  e  $3$ ,  $D_f=500$  slots,  $N=2, 5$  e  $10$  repetições,  $p_f=0, 1$ .  $q=3000$  rodadas nos casos de simulação.

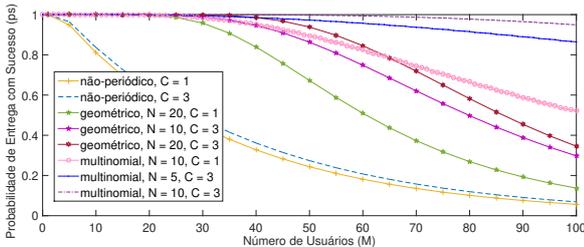


Fig. 5:  $p_s$  versus  $M$ , comparando os modelos não periódico, geométrico, e multinomial, com  $p_f=0, 1$  e  $D_f=500$ , para diferentes valores de  $N$  e  $C$ .

As Figs. 6a e 6b mostram o desempenho do modelo multinomial com  $q = 5000$  rodadas de simulação, com desvanecimento Nakagami-m para  $p_f$ , com expoentes de atenuação  $l = 2$  e  $l = 1,77$  [13], respectivamente,  $R_x = 6$  Mbps e  $S = 150$  Bytes. Para  $l = 2$ , pode-se observar que há sucesso na transmissão para  $N = 10$  e  $C = 5$ , resultando em  $p_s = 99,94\%$ , com  $M = 100$  usuários, e tem-se  $p_s \geq 99,96\%$ , para  $N = 20$  e  $C = 5$ , com  $M \leq 100$ . Para o valor de  $l = 1,77$ , obtém-se também resultados bem-sucedidos, com  $N = 10$  e  $C = 5$  crescendo para  $p_s = 99,98\%$ . Os resultados não só obedecem aos requisitos de confiabilidade, como se mantêm bem-sucedidos para um número de 100 usuários na rede.

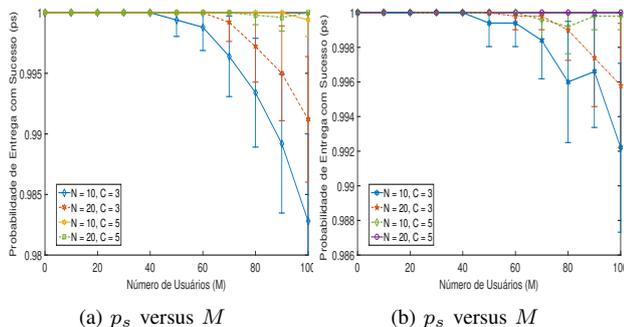


Fig. 6:  $p_s$  obtida por simulação de eventos, versus  $M$ , para diferentes valores do expoente de atenuação  $l$ ,  $D_f = 500$  e  $q = 5000$ . (a)  $l = 2$ ,  $R_x = 6$  Mbps e  $S = 150$  Bytes. (b)  $l = 1,77$ ,  $R_x = 6$  Mbps e  $S = 150$  Bytes.

## VII. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposta uma reinterpretação do protocolo de envio periódico de mensagens de difusão com *Slotted Aloha* multicanal, seguindo uma distribuição multinomial. Foi desenvolvida uma fórmula computável para calcular a probabilidade ótima de transmissão com sucesso, sendo corroborada com base em simulações dos eventos de transmissão e recepção. Foi analisado o desempenho da nova proposta em comparação às anteriores modificadas para multicanal, utilizando o modelo analítico para avaliar o desempenho do protocolo sob o efeito de probabilidade de falha constante e simulando o desvanecimento Nakagami-m no canal. Os resultados obtidos se mostraram superiores às propostas anteriores, e obedeceram aos requisitos e confiabilidade para *VANETs*.

Como trabalhos futuros, pretende-se analisar o desempenho do protocolo proposto em cenários de redes utilizando-se o simulador *NS-3*. Além disso, quer-se estudar o uso de outros protocolos MAC, como o *CSMA/CA* e *Slotted Aloha MIMO*.

## REFERÊNCIAS

- [1] World Health Organization, *Road Traffic Injuries*, Global Status Report on Road Safety, 2018.
- [2] J. C. R. Montealegre, M. M. Carvalho and R. M. de Moraes, "Deadline-Constrained Optimal Broadcasting under Hidden Terminals in Cognitive Networks," *In Proc. of ACM LANC*, Montevideo, Uruguay, Sept. 2014.
- [3] J. C. R. Montealegre, *Difusão periódica ótima em redes veiculares com restrição de tempo considerando o terminal escondido*, Dissertação de mestrado em Engenharia de Controle e Automação, UnB, 2015.
- [4] Yun Han Bae, "Analysis of Optimal Random Access for Broadcasting with Deadline in Cognitive Radio Networks," *IEEE Communications Letters*, v. 17, pp. 573-575, 2013.
- [5] X. Ma, X. Yin and K. S. Trivedi, "On the reliability of safety applications in VANETS," *International Journal of Performance Engineering*, v. 8, n. 2, pp. 115-130, 2012.
- [6] M. Khabazian, S. Aissa and M. Mehmet-Ali, "Performance Modeling of Safety Messages Broadcast in Vehicular Ad Hoc Networks," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 14, n. 1, pp. 380-387, 2013.
- [7] IEEE 1609.4, *IEEE Trial-Use Standard for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) - Multi-Channel Operation*, IEEE Std, IEEE 1609.4, 2007.
- [8] P. W. De Graaf and J. S. Lehnert, "Performance comparison of a slotted ALOHA DS/SSMA network and a multichannel narrow-band slotted ALOHA network," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 46, n. 4, pp. 544-552, 1998.
- [9] H. A. Cozzetti, R. M. Scopigno, L. Casone and G. Barba, "Comparative analysis of IEEE 802.11p and MS-Aloha in Vanet scenarios," *In Proc. of IEEE APSCC*, Biopolis, Singapore, Dec. 2009.
- [10] K. K. G. Vishnu and K. R. Narayanan, "Evaluation of Interference-cancellation Based MAC Protocol for Vehicular Communication," *In Proc. of IEEE VTC-Fall*, Chicago, USA, Aug. 2018.
- [11] R. Scopigno and H. A. Cozzetti, "Mobile Slotted Aloha for Vanets," *In Proc. of IEEE VTC-Fall*, Anchorage, AK, USA, Sept. 2009.
- [12] F. Jameel, Faisal, M. A. A. Haider and A. A. Butt, "Performance analysis of VANETS under Rayleigh, Rician, Nakagami-m and Weibull fading," *In Proc. of C-CODE*, Islamabad, Pakistan, March 2017.
- [13] J. Karedal, N. Czink, A. Paier, F. Tufvesson and A. F. Molisch, "Path Loss Modeling for Vehicle-to-Vehicle Communications," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 60, n. 1, pp. 323-328, 2011.
- [14] A. Goldsmith, *Wireless communications*, Cambridge Univ. Press, 2009.
- [15] IEEE, *IEEE 802.11 Standard for Information technology - local and metropolitan area networks - specific requirements - wireless lan (MAC) and (PHY) specifications*, IEEE, 2009.
- [16] Lawrence G. Roberts, "ALOHA packet system with and without slots and capture," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, v. 5, n. 2, pp. 28-42, 1975.
- [17] S. K. Bhoi and P. M. Khilar, "Vehicular communication: a survey," *IET Networks*, v. 3, n. 3, pp. 204-217, 2014.