

Estratégias de Transmissão para uma Rede com Canal Retransmissor Multidirecional

Marcio Henrique Doniak¹, Richard Demo Souza² e Bartolomeu F. Uchôa-Filho³.

Resumo— Um modelo de rede com canal retransmissor (mRC) que é amplamente empregado na literatura, é estendido para representar um maior número de cenários, como uma rede veicular (VANET). No sistema proposto, g-mRC, três estratégias de transmissão são apresentadas e avaliadas em termos da taxa efetiva máxima para diferentes números de usuários. Resultados numéricos mostram que a melhor estratégia é aquela em que todos os usuários do sistema transmitem simultaneamente na fase de acesso múltiplo. E cada estratégia apresenta um número de usuários que maximiza a taxa efetiva. O modelo e as estratégias apresentadas podem ser utilizados em diversos cenários práticos.

Palavras-Chave— Multiway relay channel; Effective Rate; VANET.

Abstract— A multiway relay channel (mRC) which is widely employed in the literature is extended to represent a larger number of practical scenarios, such as a vehicular network (VANET). For the proposed system, g-mRC, three transmission strategies are presented and analyzed in terms of maximum effective rate, for different numbers of users. Numerical results show that the best strategy is the one in which all users transmit simultaneously in the multiple access phase. Each strategy presents an optimal number of users which maximizes the effective rate. The system model and the transmission strategies presented can be useful in several practical scenarios.

Keywords— Multiway relay channel, Effective Rate, VANET.

I. INTRODUÇÃO

O uso de retransmissores em redes de comunicação sem fio vem se tornando muito comum graças aos diversos benefícios que essa prática pode proporcionar, tais como uma ampliação do alcance dos usuários, uma melhor coordenação das transmissões, uma maior eficiência energética e uma maior taxa de transferência de informação [1]. Diversas aplicações fazem uso deste conceito, como as redes de sensores sem fio, as redes de satélites e as redes ponto-a-ponto [1], [2]. Outro sistema que explora a retransmissão é a rede veicular ad hoc (VANET), que tem como principais gargalos a alta velocidade e a grande densidade de usuários (veículos), além de um ambiente altamente dinâmico [3].

Recentemente, Gündüz et al. [1] propuseram um modelo de sistema com canal retransmissor multidirecional (mRC), no qual diversos usuários que fazem parte de um mesmo *cluster* desejam trocar informação entre si. Vários *clusters* podem co-existir numa mesma região. É assumido que nenhum par de usuários no sistema pode se comunicar diretamente. Assim,

o retransmissor assume um papel fundamental para habilitar as desejadas trocas de informação. Assume-se também que os usuários operem em modo *full-duplex*, ou seja, que possam enviar e receber sinais simultaneamente. O foco principal do trabalho é a obtenção dos limites fundamentais em termos de taxas de transferência.

Mais recentemente, Su et al. [2] consideraram o mesmo sistema proposto em [1] porém assumindo que todos os usuários da rede se comuniquem diretamente entre si. Em ambos os trabalhos são propostas e analisadas diferentes estratégias para a troca de informação entre os usuários, sempre consistindo em duas fases: uma fase de transmissão (também chamada fase de acesso múltiplo (MAC)), na qual os usuários enviam suas mensagens, e numa fase de difusão (BC), na qual o retransmissor difunde sinais processados a todos os usuários. Na fase MAC dessas estratégias, diferentes números de usuários são convocados a transmitir suas mensagens simultaneamente num mesmo intervalo de tempo (TS). Quanto maior o número de transmissões simultâneas menor será o número de TS para completar a fase. Por outro lado, maior será a complexidade do processamento de sinais nos receptores e menor será a taxa de transmissão que permita a recuperação da informação no retransmissor, o que pode requerer um número adicional de TS até que todas as trocas de informação desejadas sejam realizadas com sucesso.

Outros trabalhos recentes que consideram o mesmo sistema em [1], [2] restringem o número de usuários transmitindo simultaneamente a dois. Estes trabalhos buscam otimizar a escolha dos pares de usuários a transmitir simultaneamente e a ordem em que as transmissões são realizadas na fase MAC.

Por exemplo, em [4], cada um dos M usuários da rede deve transmitir com os demais pelo menos uma vez. O preço que se paga com esta estratégia é que ela precisa de $(M^2 - M)$ TS para completar troca de informações dentre todos os usuários. Em outra estratégia, apresentada em [5], o usuário que possui o melhor enlace com o retransmissor é eleito para participar de todas as transmissões da fase MAC, com o intuito de auxiliar os demais usuários. Assim, esta estratégia precisa de $M - 1$ TS para a fase MAC e, em particular, outros $M - 1$ TS para a fase BC, de modo que no total $2(M - 1)$ TS sejam necessários para que todos os usuários troquem suas informações entre si. Essa grande quantidade de TS é reduzida para apenas M TS em uma das estratégias introduzidas.

Neste artigo, expandimos o modelo mRC em [1] de modo a representar um maior número de cenários práticos. No modelo proposto, que será descrito em detalhes mais adiante, os usuários são distribuídos em *clusters*, e dentro destes os usuários se organizam em *subclusters*. Os usuários dentro de

¹Área de Telecomunicações, Instituto Federal de Santa Catarina, Campus São José, São José-SC, Brasil; ^{1,2,3}Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil; E-mails: ¹mdoniak@ifsc.edu.br, ²richard.demo@ufsc.br, ³uchoa@eel.ufsc.br

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e pela CAPES.

um mesmo *cluster* desejam trocar mensagens entre si, porém apenas os usuários dentro de um mesmo *subcluster* conseguem se comunicar diretamente. Usuários de *subclusters* diferentes se comunicam apenas através do retransmissor. Um cenário típico que pode ser representado por este modelo proposto, e que não pode ser representado pelos modelos descritos anteriormente, é o de uma rede de veículos que trafegam numa área urbana em vias que se cruzam em algum ponto, no qual o retransmissor deve ser instalado. Veículos numa mesma via (mesmo *subcluster*) se comunicam diretamente entre si, mas veículos que trafegam em vias distintas (distintos *subclusters*) se comunicam apenas através do retransmissor.

Adicionalmente, este artigo apresenta três estratégias de transmissão diferentes, que são comparadas em termos de taxa efetiva máxima expressa em bits de informação por símbolo complexo [6]. Para isso, considera-se que o retransmissor usa a técnica decodifica-e-encaminha (DF) [6] para processar e encaminhar os sinais recebidos. Os sinais sobrepostos podem ser detectados, por exemplo, aplicando a técnica de máxima verossimilhança (ML) [7]. O retransmissor combina os sinais utilizando a técnica de codificação de rede (NC) sobre GF(2) [6], [8], que é seguida pelos usuários para separar os sinais combinados.

II. MODELO GERAL DE SISTEMA

Considere um sistema de comunicação sem fio com diversos usuários trocando informações entre si por meio de um retransmissor. Todos os usuários bem como o retransmissor operam no modo *full-duplex*¹. Neste modelo geral de sistema proposto, os usuários são dispostos em *subclusters* e estes, por sua vez, em *clusters*. Todos os usuários de um *cluster* desejam trocar informação entre si. Os usuários de um *subcluster* são agrupados por estarem próximos o suficiente para se comunicarem diretamente entre si. Porém, eles só conseguem se comunicar com os usuários de outro *subcluster* através do retransmissor. Este modelo geral de sistema está ilustrado na Fig. 1 e representa uma generalização do modelo apresentado em [1], sendo aqui denotado pela sigla g-mRC.

Na notação do g-mRC, V é o número de usuários por *subcluster*, Q é a quantidade de *subclusters* por *cluster* e W é a quantidade de *clusters* na rede. C_w representa o w -ésimo *cluster* na rede, $C_{w,q}$ indica o q -ésimo *subcluster* dentro do w -ésimo *cluster*, e $U_{w,q,v}$ indica o v -ésimo usuário dentro do q -ésimo *subcluster* pertencente ao w -ésimo *cluster*, em que $w \in \mathcal{W} = \{1, \dots, W\}$, $q \in \mathcal{Q} = \{1, \dots, Q\}$ e $v \in \mathcal{V} = \{1, \dots, V\}$. Quando implicado pelo contexto, um usuário pode ser indicado apenas pela variável v . O canal (*upload*) formado desde o usuário $U_{w,q,v}$ até o retransmissor é denotado por $h_{w,q,v}$. O canal (*download*) formado a partir do retransmissor até o usuário $U_{w,q,v}$ é denotado por $g_{w,q,v,t}$, em que t indica o TS no qual o retransmissor encaminha o sinal aos usuários. E o canal estabelecido a partir do usuário v até o usuário v' de um mesmo *subcluster* é denotado por $h_{w,q,v,v'}$.

¹É importante destacar que a tecnologia *full-duplex*, há até algum tempo inviável, hoje se tornou disponível em nível comercial. Em [9], os autores demonstram, inclusive com experimentos práticos, que cancelamentos de auto-interferência da ordem de 100 dB são factíveis.

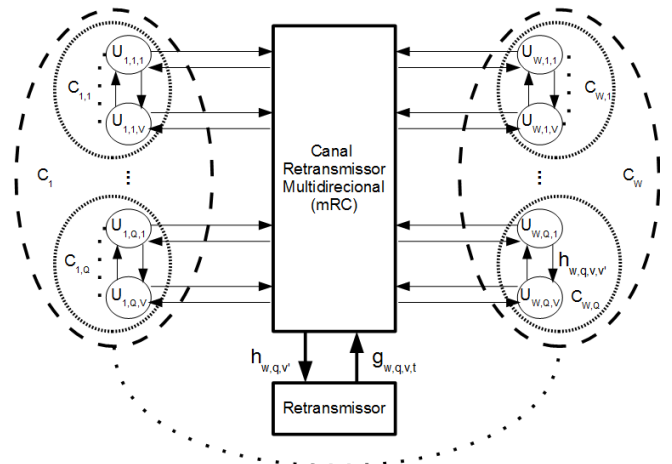


Fig. 1. Modelo de sistema mRC generalizado (g-mRC).

Todos os canais são i.i.d. com distribuição Gaussiana complexa (desvanecimento Rayleigh, plano, lento), com média zero e variância unitária. O ruído de cada canal é do tipo Ruído Aditivo Gaussiano Branco (AWGN), com média zero e variância $\sigma_0^2 = N_0/2$ por dimensão.

III. ESTRATÉGIAS DE TRANSMISSÃO

A definição da estratégia de transmissão tem uma influência direta no desempenho da rede, porque ela irá definir a quantidade de TS necessários para completar a troca de informações entre os usuários do *cluster*, e também a complexidade que o retransmissor terá em decodificar os sinais recebidos simultaneamente.

Nesta seção são introduzidas três estratégias de transmissão, que serão posteriormente comparadas. Por simplicidade, as estratégias serão descritas com base em um sistema com um único *cluster*, e assim o índice w será suprimido. Para mais de um *cluster*, as transmissões a partir de diferentes *clusters* seriam compartilhadas no tempo (*time-sharing*). Também considera-se que cada *cluster* conta com dois *subclusters*, portanto $Q = 2$ e $\mathcal{Q} = \{1, 2\}$. E o número total de usuários no sistema será portanto $M = 2V$.

Por fim, deve-se mencionar que o número de TS indicado a seguir para cada estratégia considera que todas as transmissões (ponto-a-ponto, MAC e BC) sejam bem sucedidas. Porém, a análise de taxa efetiva que será apresentada na Seção IV considera os possíveis insucessos dessas transmissões.

A. Estratégia de Transmissão em Pares

Na estratégia de transmissão em pares, denotada por *pair-wise*-mRC, somente dois usuários transmitem simultaneamente por vez. Na fase MAC, em cada TS um usuário de cada um de dois *subclusters* é selecionado para transmitir seu sinal. Portanto, o retransmissor recebe uma sobreposição dos dois sinais transmitidos, e os demais usuários de cada um dos dois *subclusters* envolvidos nesta transmissão recebem o sinal enviado pelo seu vizinho de *subcluster* que participou da transmissão neste TS. Ao final da fase MAC, o retransmissor

terá conhecimento dos sinais de todos os M usuários do sistema, enquanto que cada usuário terá conhecimento dos sinais de todos os V usuários do seu *subcluster*, faltando receber os V sinais pertencentes aos usuários dos *subclusters* vizinhos.

Na fase BC, o retransmissor, após decodificar os sinais recebidos, envia combinações lineares (sobre GF(2)) aos usuários. Da teoria de NC [8], com conhecimento dos V sinais do seu *subcluster*, cada usuário será capaz de decodificar os sinais de todos os usuários do sistema a partir da transmissão pelo retransmissor de V sinais codificados.

Com esta estratégia, são necessários $\frac{M}{2}$ TS para a fase MAC e $\frac{M}{2}$ TS para a fase BC, totalizando M TS para que os usuários do *cluster* troquem suas informações entre si.

B. Estratégia de Transmissão em Massa

Na estratégia de transmissão em massa, denotada por *massive-mRC*, todos os usuários devem transmitir seus sinais simultaneamente no primeiro TS. Portanto, o retransmissor recebe uma sobreposição de M sinais, e cada usuário, uma sobreposição de $V - 1$ sinais transmitidos pelos seus vizinhos de *subcluster*. Ao final do primeiro TS, todos os usuários já conhecem os V sinais do seu próprio *subcluster*, faltando receber os V sinais pertencentes aos usuários do *subcluster* vizinho.

A fase BC é idêntica à da estratégia *pairwise-mRC*. Dessa forma, a estratégia *massive-mRC* usa apenas $V + 1$ TS para que todos os usuários tenham trocado suas informações entre si.

C. Parcialmente em massa

Na estratégia de transmissão parcialmente em massa, denotada por *partial-mRC*, alguns usuários, sendo pelo menos um de cada *subcluster*, são selecionados para transmitirem seus sinais simultaneamente. Desta forma, o retransmissor recebe menos sinais quando comparado ao esquema *massive-mRC*, diminuindo sua complexidade e melhorando a taxa de transmissão. A quantidade de usuários no *cluster* que transmitem simultaneamente é P , em que $2 \leq P \leq \frac{M}{2}$. Note que o caso $P = 2$ recai na estratégia *pairwise-mRC*, que foi considerada separadamente por questão de conveniência. O fato de a utilização de valores de P na faixa $\frac{M}{2} < P < M$ não gerar uma redução adicional no número de TS na fase MAC justifica o valor máximo de P igual a $\frac{M}{2}$ nesta estratégia.

Para fins de ilustração, considere uma rede com $V = 3$ usuários por *subcluster*, totalizando $M = 6$ usuários no *cluster*. Nesse caso, $P = 3$ é uma opção. No primeiro TS dois usuários do *subcluster* $C_{1,1}$ e um do *subcluster* $C_{1,2}$ são selecionados para transmitirem seus sinais, e no segundo TS, os usuários remanescentes transmitem. Desta forma, haverá uma sobreposição de apenas 3 sinais no retransmissor e de no máximo 2 sinais nos usuários.

Note que foi considerada uma distribuição balanceada da quantidade de sinais transmitindo simultaneamente por *subcluster*. Assim, assume-se que $P = \frac{M}{2}$ e a fase MAC sempre terá 2 TS. Mais uma vez, a fase BC é idêntica à das estratégias apresentadas anteriormente. A quantidade de TS necessária

para esta estratégia é $L + \frac{M}{2}$, em que L é o número de TS da fase MAC e é dado por $L = \lceil \frac{M}{P} \rceil$, e neste artigo foi considerado $L = 2$.

IV. TAXA EFETIVA MÁXIMA

As estratégias de transmissão serão agora avaliadas quanto à taxa efetiva máxima, definida em [6] para um sistema de comunicação com apenas 2 usuários trocando informações entre si através de um retransmissor (TWRC). Esse conceito é aqui generalizado para o sistema de comunicação com múltiplos usuários como apresentado na Fig. 1.

A. Taxa de Mensagem

Assume-se que cada usuário possui a mesma quantidade de bits de informação, B , para transmitir. Esse bloco de bits é dividido em K pacotes de informação, cada um contendo $k = B/K$ bits. Cada pacote de informação é codificado, resultando num pacote de n símbolos complexos. A taxa de mensagem, r , é definida em [6] como:

$$r = \frac{k}{n} \left[\frac{\text{bits de informação}}{\text{símbolo complexo}} \right]. \quad (1)$$

B. Taxa Efetiva

A taxa efetiva, R , é definida em [6] como:

$$R = \frac{B}{nN} \left[\frac{\text{bits de informação}}{\text{símbolo complexo}} \right] \quad (2)$$

em que N é o número total de pacotes transmitidos até que os B bits de informação sejam decodificados com sucesso.

Naturalmente, a quantidade N depende da qualidade do canal, e portanto é uma variável aleatória. Sendo p a probabilidade de sucesso na recuperação de um pacote codificado transmitido, a quantidade esperada de transmissões necessárias para que toda a informação seja decodificada com sucesso é dada por $E[N] = \frac{K}{p}$. É importante observar que p depende da qualidade do canal bem como da taxa de mensagem escolhida. Considerando que os pacotes codificados sejam suficientemente longos, no caso do canal ponto-a-ponto podemos obter p como $p(r) = P(r < C)$, em que C é a capacidade do canal pelo qual os pacotes são transmitidos [6]. Dessa forma, a taxa efetiva pode ser reescrita como [6]:

$$R(r) = p(r) \cdot r \left[\frac{\text{bits de informação}}{\text{símbolo complexo}} \right]. \quad (3)$$

A equação (3) mostra a taxa efetiva como uma função da taxa de mensagem mas também da probabilidade de sucesso, que é uma função decrescente de r . Portanto, existe um valor ótimo para a taxa r para qual $R(r)$ assume o seu valor máximo, chamado de *taxa efetiva máxima* [6]:

$$R^*(r) = \max_{r>0} \{p(r) \cdot r\}. \quad (4)$$

O valor da taxa de mensagem que maximiza a taxa efetiva é chamado de *taxa de mensagem ótima*, e é dado por:

$$r^*(r) = \arg \max_{r>0} \{p(r) \cdot r\}. \quad (5)$$

Para a análise de taxa efetiva das estratégias de transmissão propostas para o sistema da Fig. 1, devemos separar as fases MAC e BC por duas razões: 1) Caso o insucesso ocorra na fase BC, não é necessário repetir a fase MAC. 2) As otimizações de taxas em (4) e (5) são independentes nas duas fases, permitindo inclusive a adoção de taxas de mensagens ótimas distintas.

A taxa efetiva do *massive-mRC*², das fases MAC (denotada por 1) e BC (denotada por 2), são dadas por:

$$R_1 = \frac{MkK}{1 \cdot n_1 K \cdot \frac{1}{p_1}} = M \cdot r_1 \cdot p_1(r_1) \quad (\text{MAC}) \quad (6)$$

$$R_2 = \frac{MkK}{\frac{M}{2} \cdot n_2 K \cdot \frac{1}{p_2}} = 2 \cdot r_2 \cdot p_2(r_2) \quad (\text{BC}) \quad (7)$$

A taxa efetiva global do *massive-mRC* é obtida por:

$$R = \frac{MkK}{1 \cdot n_1 K \cdot \frac{1}{p_1} + \frac{M}{2} \cdot n_2 K \cdot \frac{1}{p_2}} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

As diferentes probabilidades de sucesso para as fases MAC e BC, $p_1(r_1)$ e $p_2(r_2)$, respectivamente, são obtidas conforme a estratégia de acordo com região de capacidade.

V. REGIÃO DE CAPACIDADE

A capacidade (instantânea) de um canal com ruído AWGN com relação sinal-ruído média (SNR) é dada por [7]:

$$C(x) \triangleq \log_2(1 + x \cdot \text{SNR}) \quad [\text{bits/s/Hz}]. \quad (9)$$

Segundo [7], a região de capacidade da fase MAC para os M usuários é descrita pelas $(2^M - 1)$ restrições, sendo uma para cada subconjunto não vazio do conjunto de usuários, $\mathcal{M} = \{1, \dots, M_{\text{MAC}}\}$, em que M_{MAC} é o número de usuários participando da transmissão simultânea. Como a fase MAC de cada estratégia de transmissão apresentada possui uma quantidade distinta de usuários transmitindo simultaneamente, a região de capacidade para cada uma delas será diferente. A região de capacidade da fase BC é a mesma para todas as estratégias, e é basicamente a capacidade do canal ponto-a-ponto para o enlace *downlink* até cada usuário.

A seguir são apresentadas as equações que definem a região de capacidade para cada estratégia. Por simplicidade, será considerado apenas 1 *cluster* com 2 *subclusters* na rede, e por isso o índice w que indica o *cluster* será suprimido e assumiremos $\mathcal{Q} = \{1, 2\}$.

A região de capacidade para a estratégia de transmissão em pares é dada por:

$$\begin{aligned} & \{ (r_{q,v}), \forall q \in \mathcal{Q}, \forall v \in \mathcal{V} : \\ & \sum_{q \in \mathcal{S}} r_{q,v} < C \left(\sum_{s \in \mathcal{S}} |h_{s,v}|^2 \right), \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{Q}, \\ & r_{q,v} < C(|h_{q,v,v'}|^2), \forall v' \in \mathcal{V}, v' \neq v, \\ & r_{q,v} < C(|g_{q,v,t}|^2), \forall t \in \{(M/2) + 1, \dots, M\} \end{aligned} \quad (10)$$

²Para as demais estratégias, o cálculo é semelhante.

A região de capacidade para a estratégia de transmissão em massa é dada por:

$$\begin{aligned} & \{ (r_{q,v}), \forall q \in \mathcal{Q}, \forall v \in \mathcal{V} : \\ & \sum_{q \in \mathcal{S}} \sum_{v \in \mathcal{U}} r_{q,v} < C \left(\sum_{s \in \mathcal{S}} \sum_{u \in \mathcal{U}} |h_{s,u}|^2 \right), \\ & \forall \mathcal{S} \subseteq \mathcal{Q}, \forall \mathcal{U} \subseteq \mathcal{V}, \\ & \sum_{v \in \mathcal{U}} r_{q,v} < C \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} |h_{q,u,v'}|^2 \right), \forall \mathcal{U} \subseteq \mathcal{V} \setminus \{v'\} \text{ e } v' \in \mathcal{V}, \\ & r_{q,v} < C(|g_{q,v,t}|^2), \forall t \in \{(M/2) + 1, \dots, M\} \end{aligned} \quad (11)$$

A região de capacidade para a estratégia de transmissão parcialmente em massa é dada por:

$$\begin{aligned} & \{ (r_{q,v}), \forall q \in \mathcal{Q}, \forall v \in \mathcal{V} : \\ & \sum_{u \in \mathcal{U}} r_{1,u} + \sum_{u' \in \mathcal{U}'} r_{2,u'} \\ & < C \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} |h_{1,u}|^2 \right) + C \left(\sum_{u' \in \mathcal{U}'} |h_{2,u'}|^2 \right), \\ & \forall \mathcal{U} \subseteq \{1, \dots, \lceil V/2 \rceil\}, \forall \mathcal{U}' \subseteq \{1, \dots, \lfloor V/2 \rfloor\}; \\ & \sum_{u \in \mathcal{U}} r_{1,u} + \sum_{u' \in \mathcal{U}'} r_{2,u'} \\ & < C \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} |h_{1,u}|^2 \right) + C \left(\sum_{u' \in \mathcal{U}'} |h_{2,u'}|^2 \right), \\ & \forall \mathcal{U} \subseteq \{\lceil V/2 \rceil + 1, \dots, V\}, \forall \mathcal{U}' \subseteq \{\lfloor V/2 \rfloor + 1, \dots, V\}; \\ & \sum_{u \in \mathcal{U}} r_{q,u} < C \left(\sum_{u \in \mathcal{U}} |h_{q,u,v'}|^2 \right), \\ & \forall \mathcal{U} \subseteq \{1, \dots, \lceil V/2 \rceil\} \setminus \{v'\}, v' \in \mathcal{V}; \\ & \sum_{u \in \mathcal{U}'} r_{q,u} < C \left(\sum_{u \in \mathcal{U}'} |h_{q,u,v'}|^2 \right), \\ & \forall \mathcal{U}' \subseteq \{\lfloor V/2 \rfloor\} \setminus \{v'\}, v' \in \mathcal{V}; \\ & r_{q,v} < C(|g_{q,v,t}|^2), \forall t \in \{(M/2) + 1, \dots, M\} \end{aligned} \quad (12)$$

Ao atender os requisitos definidos nesta seção os sinais transmitidos estarão dentro da região de capacidade e a comunicação é dita confiável, portanto, a probabilidade de erro tende para zero.

VI. RESULTADOS

Para avaliar o desempenho das estratégias apresentadas, foram realizadas simulações considerando uma VANET com $M = 4, 6$ e 8 veículos na rede. A Fig. 2 mostra o desempenho de cada estratégia para as diferentes quantidades de veículos na rede. Como a estratégia Pairwise para 4 veículos é um caso especial da Partial, então, ela foi omitida na figura. O desempenho foi medido em termos da taxa efetiva máxima, que representa a taxa limite que cada veículo pode transmitir de forma que todos consigam trocar suas informações entre si.

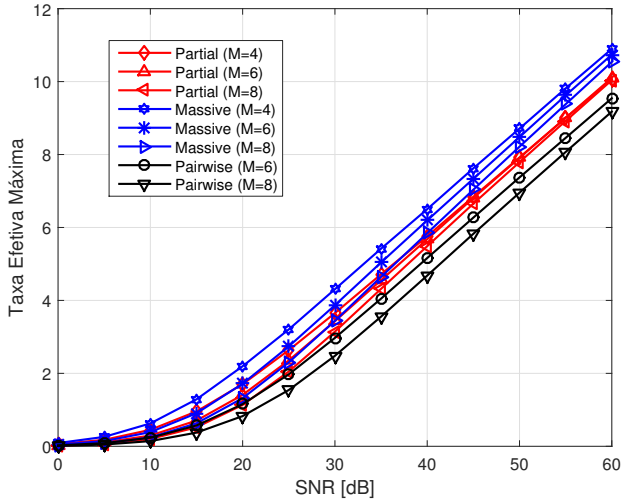


Fig. 2. Taxa efetiva máxima considerando $M = \{4, 6, 8\}$ usuários.

Os resultados apresentados na Fig. 2 mostram que a estratégia de transmissão Massive é a que apresenta o melhor desempenho dentre todas. A figura revela ainda que a estratégia Massive tem uma melhora mais expressiva do que as demais à medida que a SNR cresce.

Outro fato que se pode constatar na Fig. 2 é que a medida que o número de veículos aumenta na rede a estratégia Pairwise fica mais distante da estratégia Massive. Isso ocorre porque aumenta a diferença entre a quantidade de TS usadas pelas estratégias à medida que se aumenta o número de veículos.

A Fig. 3 mostra o resultado da taxa de mensagem ótima das fases MAC e BC para cada estratégia de transmissão com 6 usuários. Note que, apesar de apresentar menor taxa de mensagem ótima, a estratégia Massive é a que obteve a melhor taxa efetiva máxima (ver Fig. 2). Este resultado mostra a relevância que o ganho de multiplexação, maior na estratégia Massive, exerce sobre o resultado da taxa efetiva máxima.

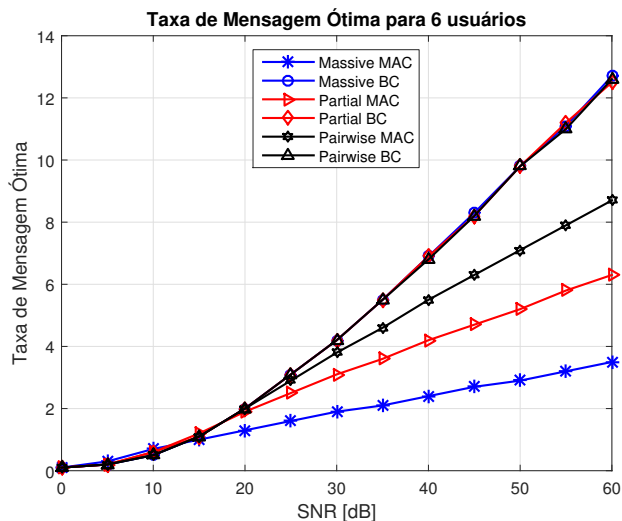


Fig. 3. Taxa de mensagem ótima para 6 usuários.

Por fim, deve ser mencionado que quanto menor o número de usuários, melhor será o desempenho de taxa efetiva máxima de cada estratégia de transmissão. Este fato pode ser explorado na formação dos *subclusters*.

VII. CONCLUSÕES

Este trabalho introduziu um modelo geral (g-mRC) de uma rede de transmissão com diversos usuários e um canal retransmissor. Topologias definidas no estado da arte podem ser modeladas a partir do g-mRC. Três novas estratégias de transmissão para este sistema foram propostas e analisadas em termos de taxa efetiva máxima, definida em [6]. As restrições para definir a região de capacidade para cada uma das estratégias propostas também foram detalhadas.

A partir de resultados de simulações obtidos concluiu-se que a estratégia de transmissão Massive é a que apresenta o melhor desempenho. Porém, para valores de SNR menores do que 40 dB sua diferença para a estratégia Pairwise, a que apresentou o pior desempenho, é de apenas $R^* \leq 1$ bit de informação por símbolo complexo. Essa diferença diminui com a diminuição do número de veículos. A estratégia de transmissão parcialmente em massa é um meio termo entre a Massive e a Pairwise, obtendo um desempenho próximo ao da Massive, principalmente para uma quantidade maior de veículos.

O uso dessas estratégias de transmissão se mostram promissoras não somente em VANETs, mas também em redes de sensores sem fio, que podem ser usadas para melhorar a automação industrial, por exemplo. Desse modo, o modelo de sistema e as estratégias apresentados podem servir para diversas aplicações práticas.

REFERÊNCIAS

- [1] D. Gündüz, A. Yener, A. Goldsmith, and H. V. Poor, "The multiway relay channel," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 1, pp. 51–63, Jan 2013.
- [2] Y. Su, Y. Li, G. Song, and L. Liu, "Achievable rate regions of multi-way relay channel with direct links," *IET Communications*, vol. 9, no. 7, pp. 947–959, 2015.
- [3] H. Hartenstein and K. P. Laberteaux, *VANET: Vehicular Applications and Inter-Networking Technologies*. John Wiley & Sons, 2010.
- [4] R. R. Borujeny, M. Noori, and M. Ardakani, "On the achievable rates of pairwise multiway relay channels," in *2014 IEEE International Symposium on Information Theory*, June 2014, pp. 2719–2723.
- [5] S. N. Islam, S. Durrani, and P. Sadeghi, "A novel user pairing scheme for functional decode-and-forward multi-way relay network," *Physical Communication*, vol. 17, pp. 128 – 148, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490715000440>
- [6] M. C. de Almeida Castro, "Taxas alcançáveis e projeto de códigos para o canal de retransmissão bidirecional," Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016. [Online]. Available: <http://tede.ufsc.br/teses/PEEL1703-T.pdf>
- [7] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [8] C. Fragouli and E. Soljanin, "Network coding applications," *Foundations and Trends® in Networking*, vol. 2, no. 2, pp. 135–269, 2008. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1561/1300000013>
- [9] D. Bharadia, E. McMillin, and S. Katti, "Full duplex radios," in *Proc. of the 2013 ACM SIGCOMM Conference*, 2013, pp. 375–386.