

Codificação de Rede Aplicada a Rede Cooperativa com Múltiplo Acesso Simultâneo

João Luiz Rebelatto e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo—Neste trabalho, elaboramos sobre o recentemente proposto esquema de codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC), relaxando a restrição de transmissão ortogonal durante a fase de cooperação. Ao permitir que os pacotes de paridade sejam transmitidos simultaneamente, mostra-se que é possível reduzir a probabilidade de *outage* (aumentar a ordem de diversidade) do sistema e/ou aumentar a taxa do código de rede utilizado, sem que o desempenho seja comprometido. Resultados numéricos são apresentados para ilustrar os resultados obtidos analiticamente.

Palavras-Chave—Codificação de rede, cooperação, múltiplo acesso.

Abstract—In this work, we elaborate on the recently proposed generalized dynamic network coding (GDNC), relaxing the orthogonal constraint during the cooperative phase. By allowing the parity packets to be transmitted simultaneously, we show that it is possible to decrease the system outage probability (increase the diversity order) and/or increase the network code rate, without harming the system performance. The outage probability is obtained analytically, and confirmed by numerical results.

Keywords—Network coding, cooperation, multiple access channel.

I. INTRODUÇÃO

Comunicação cooperativa é uma técnica que vem despertando o interesse da comunidade científica na última década [1], [2], possibilitando que diversidade espacial seja obtida mesmo em dispositivos providos de somente uma antena, e conseqüentemente auxiliando no combate ao desvanecimento característico do canal sem fio. Em sistemas que empregam o conceito de cooperação, a transmissão das informações é geralmente dividida em duas fases: a fase de *difusão*, em que os nós fontes fazem uso da propriedade difusora do canal sem fio para difundirem suas informações; e a fase de *cooperação*, em que os nós da rede atuam como repetidores, retransmitindo para o destino a(s) mensagem(s) de seu(s) parceiro(s) que foi(foram) corretamente decodificada(s) durante a fase de difusão. Tal procedimento está ilustrado na Fig. 1, para uma rede com 2 nós.

Outra técnica que se mostrou forte candidata a integrar as futuras redes de comunicação é a técnica de codificação de rede (do inglês *network coding*) [3], [4]. Em sistemas com codificação de rede, ao invés de apenas atuarem como roteadores, os nós da rede são capazes de transmitir combinações lineares de informações distintas, com coeficientes das combinações escolhidos a partir de um campo finito

João Luiz Rebelatto, CPGEI, DAELN, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba-PR, Brasil, E-mail: jlrebelatto@utfpr.edu.br.

Bartolomeu F. Uchôa-Filho, GPqCom, EEL, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis-SC, E-mail: uchua@eel.ufsc.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq e Pela Fundação Araucária de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Paraná.

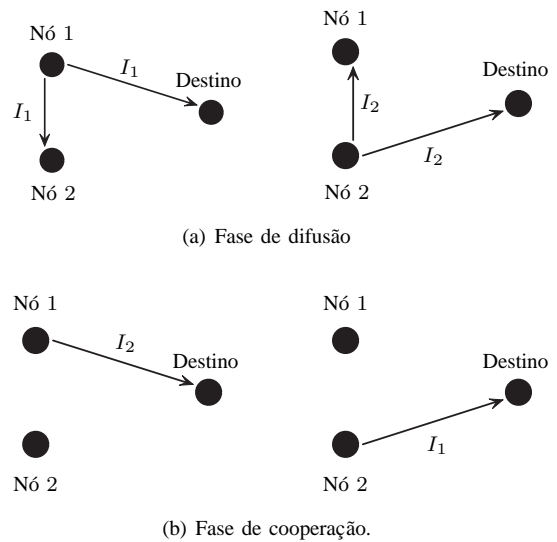


Fig. 1. Rede decodifica-e-encaminha com $M = 2$ nós e múltiplo acesso ortogonal. (a) Cada usuário difunde sua própria informação; (b) Cada usuário retransmite a informação de seu parceiro para o Destino.

de Galois $GF(q)$. Apesar de ter sido proposta por com o intuito de aumentar a vazão em redes cabeadas [3], a técnica de codificação de rede têm sido aplicada recentemente a redes sem-fio cooperativas, com o intuito de melhorar o desempenho de erro do sistema [5]–[7].

Em [5], foi proposto um esquema em que os nós da rede são capazes de transmitir a soma binária (operação exclusivo - XOR) das informações disponíveis durante a fase de cooperação, ao invés de somente retransmitirem os pacotes de informação (IF) isoladamente, como ilustrado na Fig. 1. Mostrou-se que tal procedimento é capaz de reduzir a taxa de erro do sistema, porém, nenhum benefício do ponto de vista de ordem de diversidade foi observado.

Para que a ordem de diversidade seja aumentada, mostrou-se em [6] que o campo finito em que as combinações lineares são realizadas precisa ser não-binário, de forma a garantir que o destino receba uma quantidade suficientemente grande de combinações lineares independentes. Em [7], uma generalização do esquema proposto em [6] foi apresentada, através de uma analogia entre a matriz geradora da rede e códigos corretores de erros clássicos. No esquema proposto em [7], denominado *codificação de rede dinâmica generalizada*, os nós da rede difundem uma quantidade arbitrária de k_1 pacotes de informação durante a fase de difusão, bem como k_2 pacotes de paridade na fase de cooperação. Através deste procedimento, mostrou-se que é possível atingir tanto ordem de diversidade quanto a taxa do código de rede mais elevados

que no esquema proposto em [6]. Para tal, basta utilizar como matriz de transferência da rede (coeficientes das combinações lineares), a matriz geradora de um código de bloco linear com máxima distância mínima de Hamming (código MDS, do inglês *maximum distance separable*).

Porém, de acordo com o ilustrado na Fig. 1, considerando-se que os nós da rede são *half-duplex*¹, percebe-se que a restrição de ortogonalidade assumida nos trabalhos [2], [5]–[7] é necessária apenas durante a fase de difusão (Fig. 1(a)), visto que os usuários necessitam, além de difundir as suas próprias mensagens, receber as mensagens de seus parceiros. Todavia, tal cenário não é verificado na fase de cooperação (Fig. 1(b)), uma vez que todas as transmissões são endereçadas apenas para o destino.

Dessa forma, neste trabalho propomos que a restrição de ortogonalidade durante a fase de cooperação seja relaxada, de forma que os usuários sejam capazes de transmitir os seus pacotes de paridade de forma simultânea. A probabilidade de *outage* total do esquema proposto é obtida analiticamente através da utilização de conceitos do canal de múltiplo acesso (MAC) [8], [9]. Mostra-se que, no esquema proposto, denominado MAC-GDNC, a ordem de diversidade e/ou a taxa do código de rede podem ser aumentados em comparação ao esquema GDNC tradicional.

O restante deste trabalho é organizado como se segue: A Seção II apresenta o modelo do sistema e alguns trabalhos relacionados. O esquema proposto nesse trabalho e sua análise são apresentados na Seção III. A Seção IV apresenta alguns resultados numéricos. Por fim, comentários finais são apresentados na Seção V.

II. PRELIMINARES

A. Modelo do Sistema

Este trabalho considera uma rede sem-fio em que M nós possuem informações independentes para transmitir para um destino em comum. Considera-se que os nós da rede operam no esquema *half-duplex*, não sendo capazes de transmitir e receber informações ao mesmo tempo/na mesma frequência. Um pacote é definido como sendo um vetor de comprimento N . O período de tempo correspondente à transmissão de um pacote é denominado *subslot*. Um *time slot* (TS) é definido como o período de tempo compreendendo M *subslots*, isso é, um TS corresponde a M transmissões individuais, todas elas realizadas em forma de rodízio pelos nós da rede e, ao menos que seja atestado o contrário, através de canais ortogonais no tempo.

Omitindo-se o índice do tempo por simplicidade, a palavra código em banda básica recebida pelo nó j após a transmissão pelo nó i é dada por

$$\mathbf{y}_{i,j} = \sqrt{P_i} h_{i,j} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_j, \quad (1)$$

em que $i \in \{0, \dots, M-1\}$ representa o índice do nó transmissor (e também o índice do *subslot*), $j \in \{0, 1, \dots, M\}$ o índice do nó receptor (M corresponde ao destino), P_i a potência do transmissor e $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^N$ e $\mathbf{y}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ são respectivamente

os pacotes transmitidos e recebidos, ambos de comprimento N , e $\mathbf{n}_j \in \mathbb{C}^N$ é o ruído aditivo Gaussiano de média zero e variância $N_0/2$ por dimensão, em que N_0 é a densidade espectral de potência do ruído por Hertz. O ganho de canal devido aos multipercursos é dado por $h_{i,j} \in \mathbb{C}$, cujo envelope é assumido possuir distribuição de Rayleigh com variância unitária, independente e identicamente distribuída (i.i.d.) tanto no tempo quanto em espaço, correspondendo ao modelo de desvanecimento em bloco em que o canal permanece constante durante um *subslot* de N amostras. Também considera-se que os receptores possuem conhecimento perfeito do canal (CSI), mas os transmissores não possuem CSI algum.

Dessa forma, assumindo que todos os nós da rede possuem a mesma potência de transmissão P e eficiência espectral r (em bits/s/Hz), pode-se mostrar que a probabilidade de *outage* no enlace entre os nós i e j é dada por [2], [10]

$$\mathcal{P}_o = \Pr \left\{ |h_{i,j}|^2 < \frac{2^r - 1}{\text{SNR}} \right\} = 1 - e^{-\frac{2^r - 1}{\text{SNR}}} \approx \frac{2^r - 1}{\text{SNR}}, \quad (2)$$

em que $\text{SNR} = P/(N_0 B)$ corresponde à relação-sinal-ruído para uma largura de banda B . Em (2), a aproximação é válida para a região de alta SNR.

B. Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)

Em [7], através de uma analogia entre codificação de rede e códigos corretores de erros clássicos, uma generalização do esquema de codificação de rede dinâmica (DNC) proposto em [6] foi apresentada, denominada codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC), a qual mostrou-se ser mais flexível em termos de taxa do código de rede e ordem de diversidade, podendo, inclusive, apresentar ambos os parâmetros simultaneamente maiores que nos esquemas apresentados em [2], [5], [6].

No esquema GDNC, cada usuário difunde k_1 pacotes de informação na fase de difusão, ao invés de um único pacote a exemplo do esquema DNC. Na fase de cooperação, uma quantidade arbitrária k_2 de pacotes de paridade é transmitida por usuário, compostos por combinações lineares sobre $\text{GF}(q)$ de todos os pacotes disponíveis. A fase de cooperação do esquema GDNC está ilustrada na Fig. 2(a), para uma rede com $M=2$ e $k_2=2$.

Essa expansão temporal na quantidade de pacotes transmitidos resulta em uma matriz de transferência da rede (ou ainda uma matriz geradora de um código de bloco [7]) de dimensões maiores, o que, do ponto de vista da codificação clássica, aumenta o limitante superior para a distância mínima de Hamming e consequentemente aumenta a ordem de diversidade do sistema [7].

Para a obtenção da ordem de diversidade do esquema GDNC, mostrou-se em [7] que dentre todas as combinações possíveis de *outage* nos enlaces interusuário da rede, a combinação que apresenta o pior resultado (menor ordem de diversidade) corresponde à situação em que todos os canais interusuário estão em *outage*. Nessa situação, a probabilidade de *outage* total da rede do esquema GDNC foi mostrada ser

¹Podem apenas transmitir ou receber informações ao mesmo tempo/frequência, mas não os dois.

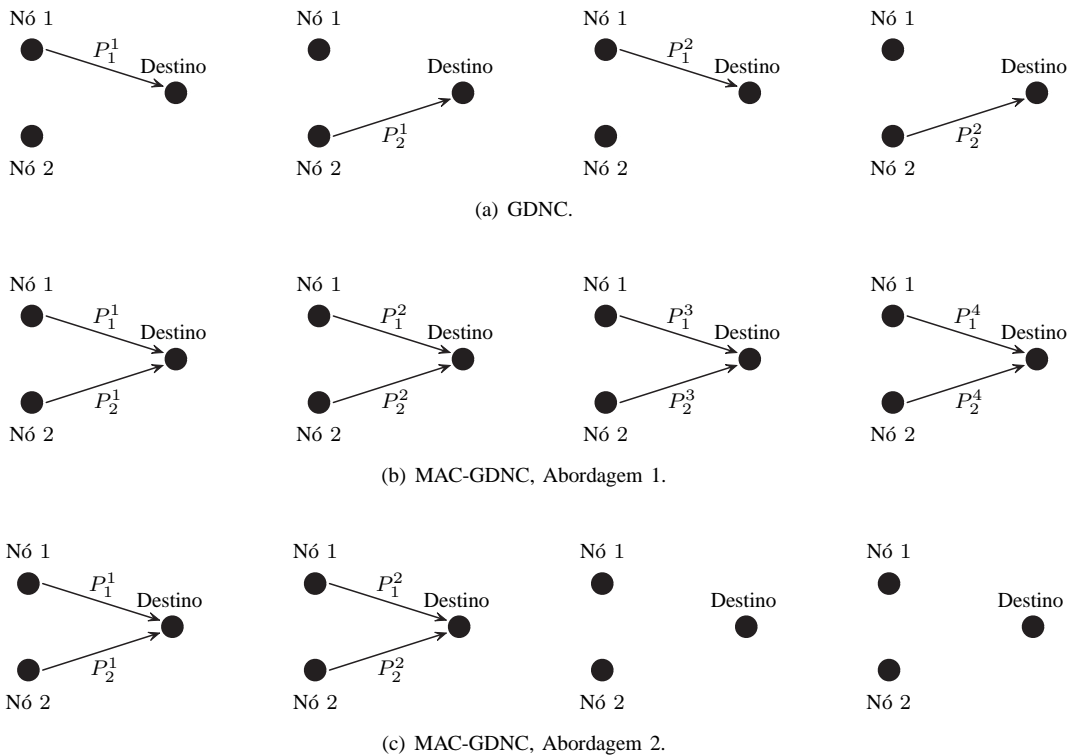


Fig. 2. Comparação entre as fases de cooperação dos esquemas GDNC e MAC-GDNC, o último para Abordagem 1 e Abordagem 2. P_i^t representa o pacote de paridade transmitido pelo nó i no time slot t .

dada por [7]:

$$\mathcal{P}_{o,\text{GDNC}} \approx \mu (\mathcal{P}_{o,ij})^{M-1} (\mathcal{P}_{o,iM})^{k_2+1} \quad (3a)$$

$$= \mu \mathcal{P}_o^{M+k_2}, \quad (3b)$$

em que $\mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2}$ corresponde ao coeficiente binomial, $\mathcal{P}_{o,ij}$ corresponde à probabilidade de *outage* no enlace entre os usuários i e j , e $\mathcal{P}_{o,iM}$ corresponde à probabilidade de *outage* entre o i -ésimo usuário e o Destino. Em [7], considerou-se que $\mathcal{P}_{o,ij} = \mathcal{P}_{o,iM} = \mathcal{P}_o$, de onde se obtém (3b).

A partir de (3b), podemos observar que a ordem de diversidade do esquema GDNC é dada por:

$$D_{\text{GDNC}} = M + k_2. \quad (4)$$

Em [7], mostrou-se que a condição necessária para que tal diversidade seja atingida é que seja utilizada como matriz de transferência da rede (coeficientes das combinações lineares) a matriz geradora de um código de bloco com máxima distância mínima de Hamming (MDS, do inglês *maximum distance separable*).

III. MAC-GDNC

De acordo com o ilustrado na Fig. 1, considerando-se que os nós da rede podem apenas transmitir ou receber informação ao mesmo tempo, mas não os dois (*half-duplex*), percebe-se que a restrição de ortogonalidade assumida nos trabalhos [2], [5]–[7] é necessária apenas na fase de difusão (Fig. 1(a)), visto que os usuários necessitam, além de difundir as suas próprias mensagens, receber as mensagens de seus parceiros. Porém,

tal cenário não é verificado na fase de cooperação (Fig. 1(b)), uma vez que todas as transmissões são endereçadas apenas para o destino.

Dessa forma, neste trabalho propomos que a restrição de ortogonalidade durante a fase de cooperação seja relaxada, de forma que os usuários sejam capazes de transmitir os seus pacotes de paridade de forma simultânea, como ilustrado na Fig. 3, para uma rede com $M = 2$ nós.

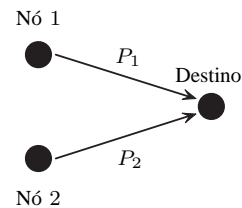


Fig. 3. Canal de Múltiplo Acesso (MAC), em que os nós são aptos a transmitir os seus pacotes de paridade simultaneamente. Note que o índice temporal está omitido.

Limitando no momento a dois o número de usuários habilitados, o sinal recebido pelo destino seria dado pela superposição dos sinais transmitidos simultaneamente:

$$\mathbf{y}_{(i_1, i_2), M} = \sqrt{P_{i_1}} h_{i_1, M} \mathbf{x}_{i_1} + \sqrt{P_{i_2}} h_{i_2, M} \mathbf{x}_{i_2} + \mathbf{n}_M, \quad (5)$$

em que $i_1, i_2 \in \{1, \dots, M-1\}$ correspondem aos índices dos dois nós transmissores. O cenário ilustrado na Fig. 3 representa um canal de múltiplo acesso (MAC) [8], [9] com dois usuários,

cuja probabilidade de *outage* é obtida através da *achievable region* apresentada na Fig. 4 [9].

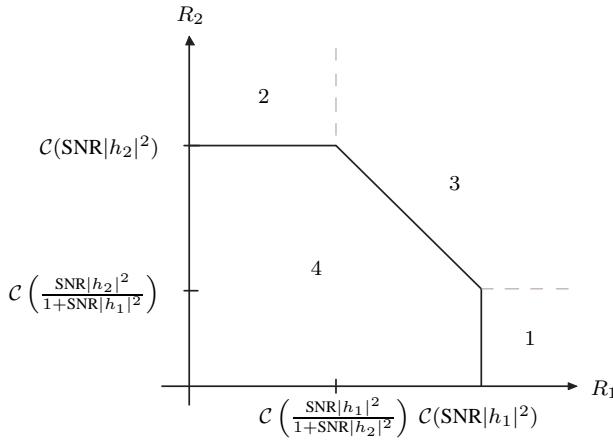


Fig. 4. *Achievable region* condicionada ao estado do canal para um canal de múltiplo acesso com 2 usuários. Note que $C(a) = \log_2(1+a)$.

Na Fig. 4, a Região 1 corresponde a um erro de decodificação da mensagem do Nó 1; todavia, a mensagem do Nó 2 pode ser corretamente decodificada nesta região uma vez que a taxa do Nó 2 é menor que a taxa limite na situação em que a transmissão do Nó 1 é considerada como ruído AWGN adicional, *i.e.*, $R_2 < \log_2[1 + \text{SNR}|h_2|^2/(1 + \text{SNR}|h_1|^2)]$. De forma similar, a Região 2 corresponde a um erro na recuperação da mensagem do Nó 2 e sucesso na decodificação da mensagem do Nó 1. Finalmente, a Região 3 corresponde a erros de decodificação das mensagens de ambos os usuários. A probabilidade de *outage* individual no destino, de cada pacote de paridade transmitido pelo Nó 1 e pelo Nó 2 são dadas respectivamente por [9]:

$$\mathcal{P}_{o,1} = \Pr(1) + \Pr(3) \quad (6a)$$

$$\mathcal{P}_{o,2} = \Pr(2) + \Pr(3), \quad (6b)$$

em que $\Pr(i)$ denota a probabilidade da Região i na Fig. 4.

Considerando todos os enlaces da rede com a mesma taxa R e assumindo desvanecimento Rayleigh, um evento de *outage* no destino para qualquer pacote de paridade transmitido pelo Usuário 1 (o mesmo resultado é válido para os pacotes de paridade transmitidos pelo Usuário 2 devido à simetria assumida na Seção II-A) ocorre com probabilidade [9]:

$$\mathcal{P}_{o,\text{PF}}(\text{SNR}) = 1 - \frac{1}{2^R} \exp\left(-\frac{2^R - 1}{\text{SNR}}\right) - \exp\left(-\frac{2^{2R} - 1}{\text{SNR}}\right) \left[1 + \frac{1}{2^R} + \frac{(2^R - 1)^2}{\text{SNR}}\right]. \quad (7)$$

Na situação em que $M > 2$, a complexidade em se obter a probabilidade de *outage* na situação em que todos os usuários transmitem seus pacotes de paridade simultaneamente também aumenta, tornando-se impraticável. Nesta situação, uma alternativa seria de que os usuários transmitam os seus pacotes de paridade aos pares, 2 de cada vez.

No que se segue, apresentamos duas abordagens para o esquema MAC-GDNC, a primeira visando aumentar o desempenho do sistema (mantendo a mesma taxa do código de rede),

e a segunda pretendendo aumentar a taxa do código de rede, sem que o seu desempenho seja comprometido.

A. Abordagem 1

Nesta abordagem, a quantidade de *time slots* reservados para a fase de cooperação é a mesma do esquema GDNC (Mk_2). Porém, visto que os usuários são aptos a transmitir seus pacotes de paridade simultaneamente, para o caso em que $M = 2$, cada usuário transmitiria agora uma quantidade $k_2^{\text{app1}} = 2k_2$ de pacotes de paridade independentes. Tal situação está ilustrada na Fig. 2(b), para o caso específico em que $k_2 = 2$.

Nesta situação, a matriz geradora vista pelo destino teria suas dimensões aumentadas de $Mk_1 \times M(k_1 + k_2)$ para $Mk_1 \times M(k_1 + 2k_2)$, resultando em um código com maior capacidade na correção de erros. Cada um destes k_2^{app1} pacotes de paridade seria formado através de uma diferente combinação linear, escolhida a partir de um código MDS.

Para que seja realizada uma comparação justa, considera-se que a potência de transmissão dos usuários nesta abordagem é dividida por 2, de tal forma que a SNR média no destino permaneça inalterada quando comparada ao esquema GDNC original. Nesta situação, a probabilidade de *outage* individual de um pacote de paridade transmitido pelo Usuário 1 (o mesmo resultado é válido para o Usuário 2 devido à simetria) se torna:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{o,\text{PF}}^{\text{app1}}(\text{SNR}) &= \mathcal{P}_{o,\text{PF}}(\text{SNR}/2) \\ &= 1 - \frac{1}{2^R} \exp\left(-\frac{2^R - 1}{\text{SNR}/2}\right) - \exp\left(-\frac{2^{2R} - 1}{\text{SNR}/2}\right) \left(1 + \frac{1}{2^R} + \frac{(2^R - 1)^2}{\text{SNR}/2}\right). \end{aligned} \quad (8)$$

1) *Probabilidade de Outage Total*: A probabilidade de *outage* da Abordagem 1 do esquema MAC-GDNC pode ser obtida a partir de (3), através dos seguintes ajustes:

- A probabilidade de *outage* dos enlaces na rede não é mais simétrica. Durante a fase de difusão e dentre os enlaces interusuário, continua sendo obtida a partir de (2). Porém, durante a fase de cooperação, é obtida a partir de (8);
- O número de pacotes de paridades transmitidos por usuário é $k_2^{\text{app1}} = 2k_2$.

Dessa forma, pode-se mostrar que a probabilidade de *outage* da Abordagem 1 do esquema MAC-GDNC é dada por:

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{o,\text{app1}} &\approx \mu \mathcal{P}_o^M \left(\mathcal{P}_{o,1}^{\text{app1}}\right)^{k_2^{\text{app1}}} \\ &\approx \mu' \mathcal{P}_o^{M+2k_2}, \end{aligned} \quad (9)$$

em que $\mu' = \mu(2^{2k_2})$. Em (9) considerou-se a aproximação para alta SNR de $\mathcal{P}_{o,\text{PF}}^{\text{app1}}$, dada por:

$$\mathcal{P}_{o,\text{PF}}^{\text{app1}} \approx \frac{2(2^R - 1)}{\text{SNR}}. \quad (10)$$

A partir de (9), pode-se perceber que a ordem de diversidade do esquema MAC-GDNC é $D_{\text{MAC-GDNC}} = M + 2k_2$, superando o esquema GDNC original.

B. Abordagem 2

Na Abordagem 2, considera-se que a quantidade de pacotes transmitidos por usuário na fase de cooperação é a mesma que no esquema GDNC, de acordo com o ilustrado na Figura 2(c). Nessa situação, a probabilidade de *outage* seria dada por

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{o,app1} &\approx \mu \mathcal{P}_o^M (\mathcal{P}_{o,PF})^{k_2} \\ &\approx \mu \mathcal{P}_o^{M+k_2}, \end{aligned} \quad (11)$$

a qual corresponde à mesma probabilidade de *outage* do esquema GDNC na situação em que a SNR é suficientemente grande. Porém, nesta Abordagem 2, a taxa do código de rede é aumentada para:

$$R_{MAC-GDNC} = \frac{k_1}{k_1 + \frac{k_2}{2}}, \quad (12)$$

resultando em um ganho de taxa de código sobre o esquema GDNC dado por

$$\begin{aligned} G_R &= \left(\frac{R_{MAC-GDNC}}{R_{GDNC}} - 1 \right) \times 100\% \\ &= \frac{k_2}{2k_1 + k_2} \times 100\%. \end{aligned} \quad (13)$$

Analisando-se (13), percebe-se que

$$\lim_{k_1 \rightarrow \infty} G_R = 0\% \quad (14a)$$

$$\lim_{k_2 \rightarrow \infty} G_R = 100\%, \quad (14b)$$

ou seja, à medida em que k_1 aumenta, o ganho de taxa do esquema MAC-GDNC sobre o esquema GDNC diminui. Todavia, à medida em que k_2 aumenta, esse ganho torna-se cada vez maior.

Percebe-se também que é possível realizar uma troca de benefícios entre taxa do código de rede e ordem de diversidade, de forma que o esquema MAC-GDNC seja capaz de apresentar ambos simultaneamente maiores que o esquema GDNC.

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção apresentamos resultados numéricos com o intuito de validar os resultados analíticos apresentados anteriormente. Consideramos os esquemas de transmissão direta (DT), GDNC (com $k_1 = k_2 = 2$) e MAC-GDNC (com $k_1 = 2$ e $k_2^{app1} = 2k_2 = 4$), de acordo com o apresentado na Abordagem 1. A Figura 5 apresenta a probabilidade de *outage* em função da SNR para esses esquemas, considerando os resultados exatos e as aproximações de alta SNR. Percebe-se que, como esperado, o esquema MAC-GDNC apresenta a maior ordem de diversidade dentre os esquemas apresentados. Pode-se perceber também que a aproximação de alta SNR do esquema MAC-GDNC realizada em (10) condiz com o resultado exato com boa precisão.

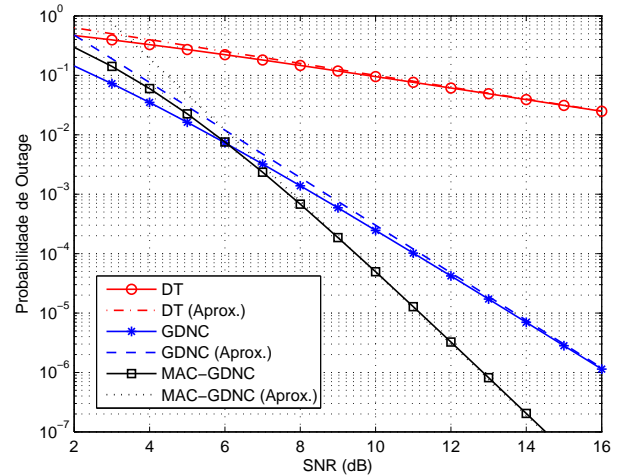


Fig. 5. Valores exatos e aproximados da probabilidade de *outage* em função da SNR para os esquemas DT, GDNC (com $k_1 = k_2 = 2$) e MAC-GDNC (com $k_1 = 2$ e $k_2^{app1} = 2k_2 = 4$).

V. COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, elaboramos sobre o esquema de codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC), relaxando a restrição de transmissão ortogonal durante a fase de cooperação. Ao permitir que os pacotes de paridade sejam transmitidos simultaneamente, mostrou-se que é possível aumentar a ordem de diversidade do sistema e/ou aumentar a taxa do código de rede utilizado, sem que o desempenho seja comprometido. Resultados numéricos foram apresentados para ilustrar os resultados obtidos analiticamente.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity: Part I and Part II," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1948, November 2003.
- [2] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, December 2004.
- [3] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204–1216, 2000.
- [4] R. Koetter and M. Médard, "An algebraic approach to network coding," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 11, no. 5, pp. 782–795, October 2003.
- [5] L. Xiao, T. Fuja, J. Kliewer, and D. Costello, "A network coding approach to cooperative diversity," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3714–3722, October 2007.
- [6] M. Xiao and M. Skoglund, "Multiple-user cooperative communications based on linear network coding," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 12, pp. 3345–3351, December 2010.
- [7] J. L. Rebelatto, B. F. Uchôa-Filho, Y. Li, and B. Vucetic, "Multi-user cooperative diversity through network coding based on classical coding theory," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 60, no. 2, pp. 916–926, February 2012.
- [8] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [9] R. Narasimham, "Individual outage rate regions for fading multiple access channels," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, ISIT'07*, Nice, France, June 2007, pp. 1571–1575.
- [10] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.