

Codificação de Rede Adaptativa e Distribuída para Sistemas Cooperativos de Múltiplo Acesso

João Luiz Rebelatto e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

Resumo— Neste trabalho, um esquema de codificação de rede adaptativo e distribuído é proposto, para um canal cooperativo de múltiplo acesso. Objetiva-se aumentar a taxa de transmissão do recentemente proposto esquema de codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC), sem reduzir a sua ordem de diversidade. Para tal, a quantidade de pacotes de paridade transmitidos é escolhida de forma adaptativa com base em uma pequena quantidade de *feedback* relacionada ao sucesso/fracasso da estação-rádio-base em recuperar os pacotes de informação. A taxa média do código de rede e ordem de diversidade são obtidos de forma analítica, e simulações computacionais suportam os resultados obtidos analiticamente.

Palavras-Chave— Codificação de rede, códigos de bloco lineares, comunicação cooperativa, ordem de diversidade.

Abstract— In this work, we propose an adaptive distributed network-channel coding for a cooperative multiple access channel. The aim here is to increase the system average code rate over the recently proposed generalized dynamic-network code (GDNC) scheme without reducing its diversity order. This is done by adaptively choosing the number of parity packets transmitted based on a small amount of feedback regarding the success/failure of the base station in recovering the information packets. The average rate and the diversity order are obtained analytically, and computer simulations are shown to agree with the analytical results.

Keywords— Cooperative communication, diversity order, linear block codes, nonbinary network coding.

I. INTRODUÇÃO

Técnicas de cooperação aplicadas a sistemas de comunicação sem fio multiusuário têm sido bastante estudadas recentemente [1]–[7], devido à sua robustez contra o desvanecimento do canal. Em um sistema de comunicação cooperativo de múltiplo acesso, além de difundir sua própria informação, os usuários ajudam uns aos outros retransmitindo as informações de seus parceiros. Uma vez que a mesma informação é transmitida por canais independentes, a diversidade do sistema é aumentada [1], [2].

Outra técnica que vêm sendo aplicada a sistemas de comunicação cooperativos com o intuito de melhorar o seu desempenho de erro é a técnica de codificação de rede [8], [9], a qual foi originalmente proposta para aumentar o fluxo de dados de uma rede. Em um sistema cooperativo com codificação de rede, os usuários são aptos a realizar combinações lineares sobre um campo finito \mathbb{F}_q de sua própria informação e da informação de seus parceiros.

Em [4], [5], foi mostrado que codificação de rede binária (BNC [3], *Binary Network Coding*, com coeficientes escolhidos de \mathbb{F}_2) não é eficiente para aumentar a ordem de diversidade em sistemas multiusuário, e o esquema denominado *codificação de rede dinâmica* (DNC, *Dynamic Network Coding*) foi proposto, o qual emprega coeficientes não-binários na formação das combinações lineares.

Em [6], o projeto de códigos de rede para uma rede cujos enlaces estão sujeitos a falhas foi reconhecido como equivalente ao projeto de códigos de bloco lineares sobre \mathbb{F}_q para correção de apagamentos. Uma equivalência entre distância mínima de Hamming do código de bloco e ordem de diversidade foi provada em [7], e mostrou-se que caso uma matriz geradora de um código MDS (*maximum distance separable*) seja usada como a matriz de transferência da rede, a ordem de diversidade máxima do esquema é garantida.

No esquema proposto em [6], [7], chamado *codificação de rede dinâmica generalizada* (GDNC), o esquema DNC foi estendido, possibilitando a cada usuário difundir mais de um pacote de informação (IF, *Information Frame*), bem como transmitir um número arbitrário (mas fixo) de pacotes de paridade¹ (PF, *Parity Frame*) na fase de cooperação. No esquema GDNC, uma troca de benefícios entre taxa e diversidade pode ser realizada, de tal forma que ambos podem simultaneamente superar o esquema DNC.

Todavia, em ambos os esquemas DNC e GDNC, uma vez que o código de rede é projetado, ele permanece fixo até que a topologia da rede seja alterada e um novo código seja requisitado. Essa característica apresenta um efeito prejudicial à taxa média do código, uma vez que usuários podem estar transmitindo PFs desnecessários na situação em que a estação-rádio-base (ERB) já recuperou todos os IFs.

Neste trabalho, propõe-se um projeto de código de rede adaptativo baseado em uma pequena quantidade de informação transmitida pela ERB através de um canal de retorno. Objetiva-se aumentar a taxa média do código (e consequentemente a taxa de transmissão do sistema) sem que a ordem de diversidade seja reduzida. No denominado *Feedback-Assisted* (FA) GDNC, o número de PFs transmitido na fase de cooperação é escolhido de acordo com a informação transmitida pela ERB com relação ao seu sucesso/fracasso na recuperação dos IFs transmitidos durante a fase de difusão. A taxa média e ordem de diversidade do esquema são obtidas analiticamente, e tais resultados são suportados por simulações computacionais.

O restante deste trabalho é organizado como se segue. A próxima seção apresenta o modelo do sistema e alguns trabalhos anteriores relevantes, incluindo os esquemas DNC [4],

João Luiz Rebelatto e Bartolomeu F. Uchôa-Filho, GPqCom, EEL, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, Brasil, e-mails: {jlrebelatto,uchoa}@eel.ufsc.br

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (159777/2010-0).

¹Combinações lineares sobre \mathbb{F}_q de todos os IFs disponíveis.

[5], e GDNC [6], [7]. A Seção III apresenta o esquema proposto FA-GDNC. Resultados de simulações são apresentados na Seção IV. Finalmente, a Seção V conclui o artigo.

II. PRELIMINARES

A. Modelo do Sistema

Considera-se neste trabalho uma rede em que múltiplos usuários possuem diferentes informações para enviar a uma ERB em comum, através de canais ortogonais. A mensagem recebida pelo usuário i no *slot* de tempo t é dada por

$$y_{j,i,t} = h_{j,i,t}x_{j,t} + n_{j,i,t}, \quad (1)$$

em que $j \in \{1, \dots, M\}$ representa o índice do usuário transmissor e $i \in \{0, 1, \dots, M\}$ o índice do usuário receptor (0 corresponde à ERB). O índice t denota o *slot* de tempo. $x_{j,t}$ e $y_{j,i,t}$ são os pacotes transmitidos e recebidos, respectivamente. $n_{j,i,t}$ é o ruído Gaussiano aditivo e branco (AWGN) com média zero e variância $N_0/2$ por dimensão. O ganho de canal devido aos multipercursos é denotado por $h_{j,i,t}$, e é assumido possuir distribuição de Rayleigh independente e identicamente distribuída (i.i.d.) (no tempo e no espaço) com variância unitária.

Assumindo que os $x_{j,t}$'s são variáveis aleatórias Gaussianas i.i.d. e considerando que todos os canais possuem a mesma relação sinal-ruído (SNR) média, a informação mútua $MI_{j,i,t}$ entre $x_{j,t}$ e $y_{j,i,t}$ será [10]

$$MI_{j,i,t} = \log_2(1 + |h_{j,i,t}|^2 \text{SNR}). \quad (2)$$

Considerando que um código de canal poderoso o suficiente está sendo utilizado, $x_{j,t}$ pode ser recuperado no nó i caso $MI_{j,i,t} > r_{j,i,t}$, em que $r_{j,i,t}$ é a taxa de informação do enlace entre o Usuário j e o Usuário i no *slot* de tempo t . Considerando que todos os usuários possuem a mesma taxa de informação, $x_{j,t}$ não será recuperado pelo nó i se

$$|h_{j,i,t}|^2 < g, \quad (3)$$

em que $g = \frac{2^r - 1}{\text{SNR}}$. A probabilidade de tal evento é denominada *probabilidade de outage*. Para desvanecimento Rayleigh, a probabilidade de *outage* é calculada como [2], [10]

$$P_e = \Pr\{|h_{j,i,t}|^2 < g\} = 1 - e^{-g} \approx g, \quad (4)$$

em que a aproximação é válida para a região de alta SNR. Considerando desvanecimento em bloco, a ordem de diversidade é definida como [10]

$$D \triangleq \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{-\log P_o}{\log \text{SNR}}, \quad (5)$$

em que P_o é a probabilidade de *outage* total do sistema.

Neste trabalho, desvanecimento em bloco significa que os coeficientes de desvanecimento $h_{j,i,t}$ são variáveis aleatórias i.i.d. para diferentes blocos (pacotes), mas constantes durante o mesmo bloco.

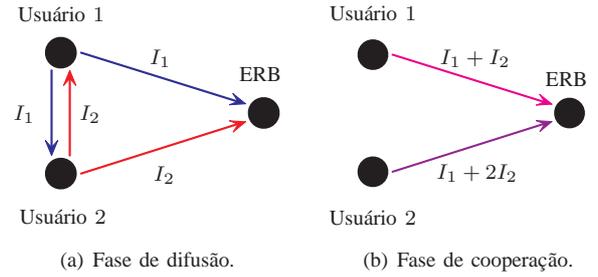


Fig. 1. Esquema DNC com $M = 2$ usuários. (a) Cada usuário difunde a sua própria informação e (b) cada usuário transmite uma combinação linear sobre \mathbb{F}_4 composta de todos os IFs disponíveis.

B. Codificação de Rede Dinâmica (DNC)

Em [4], foi mostrado que o uso de coeficientes não-binários é necessário para que a ordem de diversidade do sistema seja aumentada, e o denominado esquema DNC foi proposto. Um esquema DNC com 2 usuários está apresentado na Fig. 1.

Quando ambos os canais interusuário não estão em *outage*, pode-se ver que a ERB é capaz de recuperar os dois IFs I_1 e I_2 a partir de quaisquer 2 dos 4 pacotes recebidos. Um *outage* (para qualquer um dos IFs) somente ocorre quando pelo menos 3 pacotes não são recebidos corretamente, resultando em uma ordem de diversidade 3.

No esquema DNC com M usuários, após difundir apenas um IF, cada usuário transmite uma quantidade de $M - 1$ combinações lineares não-binárias na fase de cooperação, resultando em uma diversidade $D_{\text{DNC}} = 2M - 1$ de acordo com [4]. Todavia, essa diversidade é obtida com uma taxa baixa e fixa dada por $R_{\text{DNC}} = M/M^2 = 1/M$.

C. Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)

Em [6], o problema de projetar códigos de rede foi reconhecido como equivalente ao de projetar códigos de bloco sobre $\text{GF}(q)$ para correção de apagamentos. Em particular, para o caso em que os canais interusuário são livres de erros, mostrou-se que a ordem de diversidade se iguala à distância mínima de Hamming do código de bloco, de tal forma que a matriz de transferência da rede deveria corresponder a uma matriz de transferência de um código de bloco ótimo sob a métrica de Hamming. Dessa forma, limitantes da teoria da codificação clássica, tais como o limitante superior de Singleton [11] podem ser usados como limitantes para a ordem de diversidade.

O esquema DNC foi então estendido através da consideração de que cada usuário pode difundir uma quantidade $k_1 \geq 1$ de IFs próprios (ao contrário de somente um IF do esquema DNC) na fase de difusão, assim como transmitir um número arbitrário (mas fixo) de k_2 combinações lineares (de todos os pacotes recebidos corretamente) na fase de cooperação. Do ponto de vista de codificação de bloco, a denominada codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC) considera uma palavra-código mais longa, com mais símbolos de paridade, melhorando o limitante de Singleton.

É importante ressaltar que, assim como em [4]–[7], assume-se que a ERB possui o conhecimento de como cada PF

é formado. Isso pode resultar em algum cabeçalho extra, porém, se o IF for longo o suficiente, este cabeçalho extra é desprezível. Assim, a taxa do esquema GDNC é dada por

$$R_{\text{GDNC}} = k_1 M (k_1 M + k_2 M)^{-1} = k_1 (k_1 + k_2)^{-1}. \quad (6)$$

Aplicando (6) ao limitante de Singleton dado por $d_{\min} \leq n - k + 1$ [11], pode-se ver que a diversidade do esquema GDNC é limitada superiormente por $D_{\text{GDNC}} \leq k_2 M + 1$, valor que não pode ser atingido devido aos erros nos canais interusuário, como mostrado em [6].

1) Probabilidade de Outage e Ordem de Diversidade:

Em [6, Teorema 1] provou-se que caso um código de rede apropriadamente projetado seja utilizado como matriz de transferência da rede, a ordem de diversidade do esquema GDNC para a situação em que os canais interusuário são sujeitos a erros é dada por

$$D_{\text{GDNC}} = M + k_2. \quad (7)$$

Pode-se perceber que o esquema GDNC se reduz ao esquema DNC quando $k_1 = 1$ e $k_2 = M - 1$, com taxa $1/M$ e ordem de diversidade $2M - 1$. A partir de (6) e (7), percebe-se que uma escolha apropriada de k_1 e k_2 pode simultaneamente melhorar a taxa e a ordem de diversidade sobre o esquema DNC.

2) Sobre o Projeto do Código de Rede: Foi mostrado em [7] que a utilização de uma matriz geradora de um código MDS na forma sistemática (com distância mínima de Hamming $d_{\min} = Mk_2 + 1$) como matriz de transferência do esquema GDNC é uma condição suficiente e necessária para assegurar que a diversidade $D_{\text{GDNC}} = M + k_2$ seja atingida.

À medida em que a SNR aumenta, porém, a probabilidade de que a ERB decodifique corretamente todos os IFs recebidos durante a fase de difusão também aumenta. Neste caso, a transmissão dos PFs não seria mais necessária. Como o número de IFs transmitidos durante a fase de difusão no esquema GDNC é Mk_1 , esta probabilidade é então dada por

$$\Pr\{\text{Nenhum em outage}\} = (1 - P_e)^{Mk_1} = \overline{P}_e^{Mk_1}, \quad (8)$$

em que P_e é a probabilidade de outage de um único enlace dada em (4) e $\overline{P}_e \triangleq 1 - P_e$.

O aumento da probabilidade em (8) com a SNR está exemplificado na Tabela I, para uma rede com $M = k_1 = 2$.

TABELA I
PROBABILIDADE DE NENHUM DOS Mk_1 IFs ESTAREM EM outage EM FUNÇÃO DA SNR, PARA $M = 2$ E $k_1 = 2$.

SNR (dB)	0	4	8	12
$\Pr\{\text{Nenhum em outage}\}$	0.19	0.52	0.77	0.90

Pode-se ver que, para SNR= 12dB, por exemplo, PFs desnecessários são transmitidos em 90% dos casos, comprometendo a taxa de transmissão. No que se segue, uma versão modificada do esquema GDNC será apresentada, a qual visa aumentar a taxa de transmissão do sistema, mantendo a mesma ordem de diversidade.

III. CODIFICAÇÃO DE REDE DINÂMICA GENERALIZADA ASSISTIDA POR CANAL DE RETORNO (FA-GDNC)

Neste trabalho, o esquema GDNC é modificado através da consideração de que há um canal de retorno disponível entre a ERB e os usuários, pelo qual a ERB transmite uma pequena quantidade de informação relacionada ao sucesso/fracasso na decodificação dos IFs recebidos durante a fase de difusão. Cada mensagem transmitida pela ERB consiste em apenas um bit, denominado bit de outage (OUT). OUT = 0 significa que a ERB recebeu corretamente o IF (ou um conjunto de IFs), e OUT = 1 significa que o IF (ou parte de um conjunto de IFs) não foi corretamente decodificado.

Relembrando que no esquema GDNC [6], cada usuário difunde k_1 IFs, resultando ao todo em Mk_1 pacotes sendo difundidos por rodada de transmissão². Após receber tais pacotes (corretamente ou não), a ERB informa os usuários através do canal de retorno sobre o resultado do processo de decodificação. Daqui em diante, considera-se que a informação enviada pela ERB é limitada a somente um bit por usuário após cada fase de difusão. Se o comprimento do IF for grande o suficiente, essa quantidade de informação pode ser desprezada.

Seja $\text{OUT}_j(\tau)$ o bit de outage associado ao usuário j na rodada de transmissão τ . $\text{OUT}_j(\tau) = 0$ se todos os k_1 IFs transmitidos pelo usuário j na rodada τ foram recebidos corretamente pela ERB, e $\text{OUT}_j(\tau) = 1$ caso contrário. Dessa forma, os usuários receberão uma quantidade de M bits através do canal de retorno após cada fase de difusão.

Sabe-se que na fase de cooperação do esquema GDNC [6] o número de PFs transmitidos por usuário é fixo e igual a k_2 . Nesta nova proposta, com base na informação recebida através do canal de retorno, cada usuário é apto a escolher de forma adaptativa a quantidade de PFs que irá transmitir na fase de cooperação, de tal forma a aumentar a taxa de transmissão o máximo possível, mantendo a mesma ordem de diversidade que no esquema GDNC. Seja $k_{2,j}(\tau)$ o número de PFs transmitidos pelo Usuário j na rodada de transmissão τ . Propõe-se que $k_{2,j}(\tau)$ seja escolhido como

$$k_{2,j}(\tau) = \begin{cases} 0, & \text{se } \sum_{j=1}^M \text{OUT}_j(\tau) = 0 \\ k_2, & \text{se } \text{OUT}_j(\tau) \neq 0 \\ k'_2, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (9)$$

em que k_2 é o mesmo parâmetro do esquema GDNC e $k'_2 \in \{0, 1, \dots, k_2\}$. Caso todos os Mk_1 IFs tenham sido corretamente recebidos na ERB (a soma de todos os OUTs é igual a zero), então paridades não são mais necessárias e $k_{2,j}(\tau) = 0, \forall j$ (o que significa que um novo conjunto de Mk_1 IFs pode ser transmitido na sequência). Caso o Usuário j possua pelo menos um dos seus próprios k_1 IFs não decodificados pela ERB, então este usuário escolherá $k_{2,j}(\tau) = k_2$ PFs. Quando todos os k_1 IFs difundidos pelo usuário j forem corretamente decodificados pela ERB, mas ao menos um dos $(M - 1)k_1$ IFs difundidos pelos outros usuários está em outage, o Usuário j colaborará com somente $k'_2 \leq k_2$ PFs definindo $k_{2,j}(\tau) = k'_2$. O valor de k'_2 é um parâmetro do sistema e deve ser otimizado sujeito a manter a ordem de

²Uma rodada de transmissão é aqui definida como a composição de uma fase de difusão mais uma fase de cooperação.

diversidade do sistema igual a $M + k_2$ e aumentar a taxa o máximo possível.

3) *Análise da Taxa*: Seja T o número de rodadas de transmissão, com $\tau = 1, \dots, T$.

A quantidade total de PFs transmitidos na rodada τ é

$$k_2(\tau) = \sum_{j=1}^M k_{2,j}(\tau) \quad (10)$$

e seu valor esperado pode ser obtido como se segue:

$$\bar{k}_2(\tau) = E \left[\sum_{j=1}^M k_{2,j}(\tau) \right] = ME[k_{2,j}(\tau)] \quad (11a)$$

$$= M \sum_p \Pr\{k_2(\tau) = p\} \cdot p \quad (11b)$$

$$= Mk_2 - M\bar{P}_e^{k_1} \left(k_2 - k'_2 \left(1 - \bar{P}_e^{(M-1)k_1} \right) \right). \quad (11c)$$

A taxa média do esquema FA-GDNC é então dada por

$$\bar{R}_{FA} = Mk_1 (Mk_1 + \bar{k}_2(\tau))^{-1} \quad (12a)$$

$$= k_1 \left[k_1 + k_2 - \bar{P}_e^{k_1} \left(k_2 - k'_2 \left(1 - \bar{P}_e^{(M-1)k_1} \right) \right) \right]^{-1}, \quad (12b)$$

em que $\bar{k}_2(\tau)$ é obtido de (11c). Como $k_2 \geq k'_2$ e $0 \leq \bar{P}_e \leq 1$, pode-se perceber em (12b) que $\bar{R}_{FA} \geq R_{GDNC}$.

4) *Probabilidade de Outage e Ordem de Diversidade*: Seja $D_{j,t} \subseteq \{1, \dots, M\}$ o conjunto dos índices correspondente aos usuários que decodificaram $I_j(t)$ corretamente, o IF do Usuário j no slot de tempo t da fase de difusão. Por conveniência, inclui-se o próprio índice j em $D_{j,t}$. O número de usuários em $D_{j,t}$ é denotado por $|D_{j,t}|$, e a sua probabilidade é dada por

$$P_{D_{j,t}} = P_e^{M-|D_{j,t}|} (1 - P_e)^{|D_{j,t}|-1},$$

a qual corresponde à probabilidade de $M - |D_{j,t}|$ dentre os $M - 1$ canais interusuário estarem em *outage*.

Define-se também $Q_{j,t} \subseteq D_{j,t} \setminus \{j\}$ como o conjunto de índices dos usuários de $D_{j,t}$ cujos pacotes de informação (todos eles) foram corretamente decodificados pela ERB, com quantidade de elementos denotada por $|Q_{j,t}|$. A probabilidade condicional de $Q_{j,t}$ dado $D_{j,t}$ pode ser aproximada como

$$P_{Q_{j,t}|D_{j,t}} \approx P_e^{|D_{j,t}|-|Q_{j,t}|-1},$$

uma vez que o cenário mais provável para que $Q_{j,t}$ aconteça é quando exatamente um pacote de cada um dos $|D_{j,t}|-|Q_{j,t}|-1$ usuários em $D_{j,t} \setminus Q_{j,t}$ não é recebido corretamente pela ERB. Como $j \in D_{j,t}$ e $j \notin Q_{j,t}$, deve-se ter que

$$|D_{j,t}| - |Q_{j,t}| \geq 1. \quad (13)$$

De acordo com (9), os usuários pertencendo a $Q_{j,t}$ contribuirão com k'_2 PFs na fase de cooperação, enquanto que os usuários pertencendo ao conjunto complementar $D_{j,t} \setminus Q_{j,t}$ contribuirão com k_2 PFs. Assim sendo, tem-se que a mensagem $I_j(t)$ estará contida em $(|D_{j,t}| - |Q_{j,t}|)k_2 + |Q_{j,t}|k'_2 + 1$ pacotes (1 da parte sistemática mais $(|D_{j,t}| - |Q_{j,t}|)k_2 + |Q_{j,t}|k'_2$ como parte de paridades) transmitidos para a ERB através de canais independentes. Fixando $D_{j,t}$ e $Q_{j,t}$, pode-se

mostrar que a probabilidade da ERB não conseguir decodificar $I_j(t)$ é [7]

$$P_{o,j}(D_{j,t}, Q_{j,t}) \approx \gamma P_e^{(|D_{j,t}|-|Q_{j,t}|)k_2 + |Q_{j,t}|k'_2 + 1},$$

em que γ é a abreviação de $\gamma(k_1, k_2, D_{j,t}, Q_{j,t})$, um inteiro positivo representando o número (multiplicidade) dos padrões de *outage* que resultam na mesma probabilidade. A probabilidade de *outage* total é então dada por

$$P_{o,j} \approx \sum_{D_{j,t}} \sum_{Q_{j,t}} P_{D_{j,t}} P_{Q_{j,t}|D_{j,t}} P_{o,j}(D_{j,t}, Q_{j,t}) \quad (14a)$$

$$\approx \sum_{D_{j,t}} \sum_{Q_{j,t}} \gamma P_e^{M + (|D_{j,t}|-|Q_{j,t}|)k_2 + |Q_{j,t}|(k'_2-1)} \quad (14b)$$

$$\approx \gamma' P_e^{M+|\Delta|^*k_2} \quad (14c)$$

$$= \gamma' P_e^{M+k_2}, \quad (14d)$$

em que $|\Delta|^*$ corresponde ao valor de $|\Delta| = |D_{j,t}| - |Q_{j,t}|$ que resulta no termo de menor expoente em (14b), o qual é $|\Delta|^* = 1$ de acordo com (13), e γ' coleta a multiplicidade de todos os eventos $D_{j,t}$ e $Q_{j,t}$ para os quais $|D_{j,t}| - |Q_{j,t}| = |\Delta|^*$. Com relação ao parâmetro k'_2 em (14b), pode-se perceber que o seu menor valor de forma a manter a ordem de diversidade do esquema GDNC é $k'_2 = 1$. Quando $k'_2 = 0$, a ordem de diversidade é diminuída por um fator $|Q_{j,t}|$. Por outro lado, quando $k'_2 \geq 1$, a diversidade não excede $M + k_2$, uma vez que $Q_{j,t}$ com $|Q_{j,t}| = 0$ (i.e., o conjunto vazio) é um evento possível que resulta em $M + k_2$ como menor expoente possível. Assim, foi provado que a ordem de diversidade do esquema FA-GDNC permanece $M + k_2$.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES

Nesta seção, resultados de simulações computacionais são apresentados com o intuito de suportar os resultados obtidos analiticamente. Nas simulações, foi considerado que a taxa de informação r é igual a 0.5 bit por uso do canal³.

A Fig. 2 apresenta a taxa média do código em função da SNR (dB) para uma rede com 2 usuários adotando o esquema GDNC com $k_1 = k_2 = 2$, FA-GDNC com $k_1 = k_2 = k'_2 = 2$ e FA-GDNC com $k_1 = k_2 = 2$ e $k'_2 = 1$. A taxa do esquema GDNC independe da SNR, e para os parâmetros dados é igual a 0,5 (a exemplo dos esquemas BNC e DNC). Pode-se ver que, quando $k'_2 = 2$, a taxa é aumentada consideravelmente. Todavia, ao selecionar $k'_2 = 1$, a taxa aumenta ainda mais. Pode-se também perceber que os resultados de simulação condizem os obtidos analiticamente com grande precisão.

A Fig. 3 apresenta a taxa de apagamento de pacote (FER) em função da SNR para uma rede com 2 usuários adotando os mesmos esquemas considerados na Fig. 2 assim como os esquemas BNC e DNC (DNC sobre \mathbb{F}_4). A matriz geradora do esquema GDNC é obtida a partir de um código Reed-Solomon (RS) de taxa 4/8 sobre \mathbb{F}_8 [7]. Já a matriz geradora do esquema FA-GDNC é obtida a partir do mesmo código RS de taxa 4/8 através de funcionamento. Como esperado, o esquema FA-GDNC apresenta a mesma ordem de diversidade que o esquema GDNC, superando ambos os esquemas BNC

³Deve-se notar que a escolha da taxa de informação r é irrelevante para o propósito de obter ordem de diversidade.

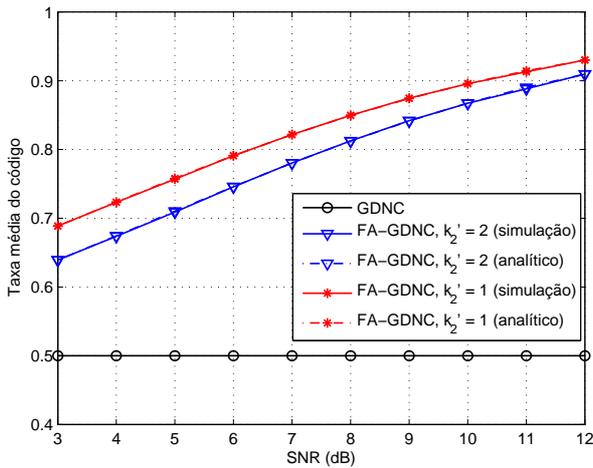


Fig. 2. Taxa média em função da SNR (dB) para uma rede com 2 usuários considerando o esquema GDNC com $k_1 = k_2 = 2$, FA-GDNC com $k_1 = k_2 = 2$ e $k'_2 \in \{1, 2\}$.

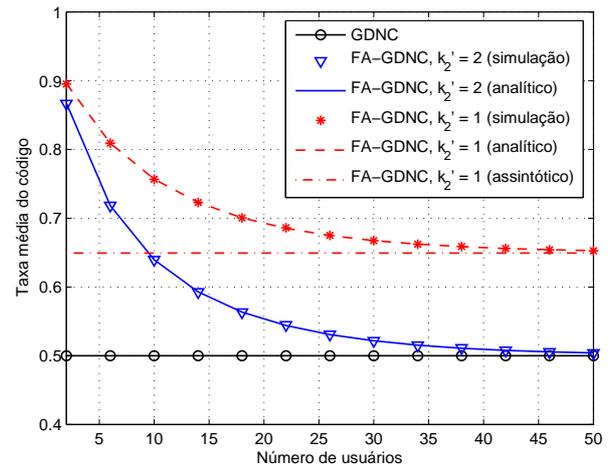


Fig. 4. Taxa média em função de M para uma rede com $k_1 = 2$ e SNR = 10 dB, considerando os esquemas GDNC com $k_2 = 2$ e FA-GDNC com $k_2 = 2$ e $k'_2 \in \{1, 2\}$.

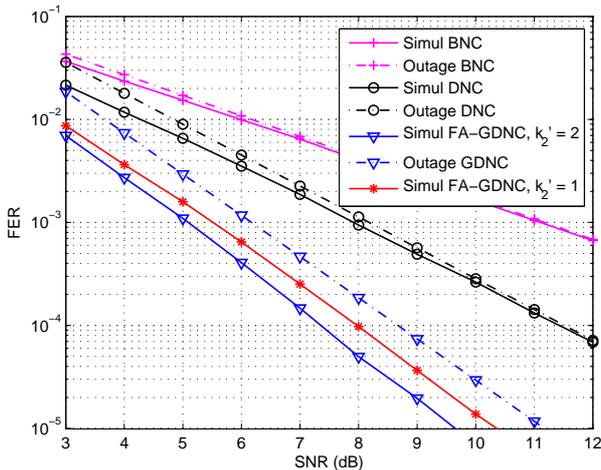


Fig. 3. FER em função da SNR (dB) para uma rede com 2 usuários, adotando os esquemas BNC, DNC (sobre \mathbb{F}_4) e FA-GDNC com $k_1 = k_2 = 2$ e $k'_2 \in \{1, 2\}$ sobre \mathbb{F}_4 . O esquema GDNC (com $k_1 = k_2 = 2$ e sobre \mathbb{F}_8) possui o mesmo desempenho que o esquema FA-GDNC com $k_1 = k_2 = k'_2 = 2$.

e DNC. Pode-se perceber que a ordem de diversidade obtida através de simulação (a inclinação da curva) condiz com o resultado analítico. Uma vez que o código gerado ao selecionar $k'_2 = 1$ contém uma quantidade menor de paridades se comparado ao código com $k'_2 = 2$, um desempenho pior em termos de ganho de código já era esperado. Porém, novamente, percebe-se que ambas as curvas possuem a mesma diversidade.

Quando o número de usuários aumenta, o comportamento assintótico do esquema FA-GDNC com $k'_2 = 2$ e $k'_2 = 1$ é diferente. Tal efeito é ilustrado na Fig. 4, em que a taxa média é traçada em função do número de usuários para uma rede adotando o esquema GDNC com $k_1 = k_2 = 2$ e FA-GDNC com $k_1 = k_2 = 2$ e $k'_2 \in \{1, 2\}$. Pode-se ver que enquanto a taxa para o caso em que $k'_2 = 2$ tende à mesma taxa do esquema GDNC, a taxa do esquema FA-GDNC com $k'_2 = 1$ tende a um valor mais elevado, confirmando as expectativas.

V. CONCLUSÕES E COMENTÁRIOS FINAIS

Neste trabalho, uma extensão do esquema de codificação de rede dinâmica generalizada (GDNC) introduzido em [6], [7] foi proposta. No esquema proposto, denominado *feedback assisted* GDNC, o projeto do código de rede capaz de atingir a máxima diversidade é realizado de forma adaptativa. O objetivo de tal procedimento é aumentar a taxa média de transmissão do sistema, com base em uma pequena quantidade de informação transmitida pela ERB através de um canal de retorno, relacionada ao sucesso/fracasso da mesma em decodificar os pacotes de informação recebidos durante a fase de difusão. Análises para a taxa e ordem de diversidade são apresentadas e suportadas por simulações computacionais.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity: Part I and Part II," *IEEE Trans. Commun.*, 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 Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, December 2004.
- [3] L. Xiao, T. Fuja, J. Kliewer, and D. Costello, "A network coding approach to cooperative diversity," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, no. 10, pp. 3714–3722, October 2007.
- [4] M. Xiao and M. Skoglund, "M-user cooperative wireless communications based on nonbinary network codes," in *Proc. IEEE Inf. Theory Workshop. ITW'09*, June 2009, pp. 316 – 320.
- [5] —, "Multiple-user cooperative communications based on linear network coding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 12, pp. 3345–3351, December 2010.
- [6] J. L. Rebelatto, B. F. Uchôa-Filho, Y. Li, and B. Vucetic, "Generalized distributed network coding based on nonbinary linear block codes for multi-user cooperative communications," in *Proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory, ISIT'10*, June 2010, pp. 943–947.
- [7] —, "Multi-user cooperative diversity through network coding based on classical coding theory," *Submitted to IEEE Trans. Signal Process.*, 2011. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1004.2757>
- [8] R. Ahlswede, N. Cai, S.-Y. Li, and R. Yeung, "Network information flow," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 46, no. 4, pp. 1204 – 1216, 2000.
- [9] R. Koetter and M. Médard, "An algebraic approach to network coding," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, no. 5, pp. 782– 795, October 2003.
- [10] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [11] F. MacWilliams and N. Sloane, *The Theory of Error Correcting Codes*. Amsterdam: North Holland, 1977.