Análise da Eficiência Energética de Sistemas Cooperativos com Codificação de Rede

Ohara Kerusauskas Rayel, João Luiz Rebelatto, Richard Demo Souza e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

***Resumo*— Neste trabalho, utiliza-se a eficiência energética como métrica para avaliar o desempenho da técnica de codificação de rede, quando aplicada a uma rede sem fio cooperativa de múltiplo acesso, em que múltiplos nós possuem informações independentes para transmitir para um destino em comum. O consumo energético dos circuitos de transmissão e recepção é levado em consideração e mostra-se que a codificação de rede pode propiciar uma grande economia de energia se comparada à transmissão direta e às técnicas tradicionais de cooperação. O número ótimo de nós cooperadores que minimiza o consumo energético da rede em função da distância é obtido analiticamente, e confirmado por resultados numéricos.**

***Palavras-Chave*— Codificação de rede, comunicação cooperativa, eficiência energética, redes de múltiplo acesso.**

***Abstract*— In this paper, we consider the energy efficiency as a metric to evaluate the performance of the network coding technique when applied to a multiple access cooperative network, where multiple nodes have independent information to transmit to a common destination. The energy consumption of the transmission and reception circuits is taken into account, and it is shown that network coding can provide significant energy savings compared to direct transmission and traditional cooperation techniques. The optimal number of nodes that minimizes the energy consumption of the network as a function of the distance is obtained analytically, and confirmed by numerical results.**

***Keywords*— Cooperative communication, energy efficiency, multiple access networks, network coding.**

I. Introdução

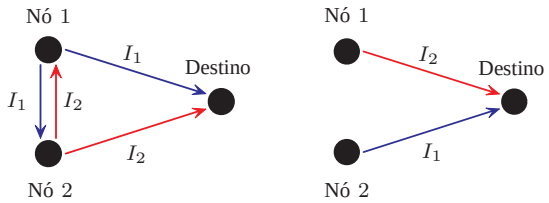
Técnicas de cooperação vêm sendo bastante utilizadas recentemente em sistemas com múltiplos nós, com o intuito de aumentar a diversidade do sistema e assim auxiliar no combate ao desvanecimento característico do canal sem fio [1]–[6]. Em sistemas cooperativos, a transmissão geralmente é dividida em duas fases: A *fase de difusão*, em que os nós difundem seus próprios dados (normalmente por canais ortogonais), e a *fase de cooperação*, em que os nós retransmitem as mensagens de seus parceiros que foram corretamente recebidas durante a fase de difusão. Tal procedimento está ilustrado na Figura 1.

A técnica de *codificação de rede* [7], [8] (do inglês *network coding*), originalmente proposta com o intuito de aumentar a vazão de redes com fio, tem sido recentemente utilizada em redes cooperativas sem fio com o objetivo de reduzir a taxa de erro do sistema [3]–[6]. Em sistemas cooperativos que utilizam codificação de rede, ao invés de somente retransmitir

Ohara Kerusauskas Rayel, João Luiz Rebelatto e Richard Demo Souza, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, Brasil, e-mails: {ohara@eletrica.eng.br, jlrebelatto@utfpr.edu.br, richard@utfpr.edu.br}

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

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq.



(a) Difusão (b) Cooperação

Fig. 1. Rede cooperativa decodifica-e-encaminha com 2 nós cooperadores. (a) Cada nó difunde sua própria informação e (b) cada nó transmite a informação de seu parceiro após decodificá-la e recodificá-la.

individualmente as informações de seus parceiros, os nós cooperadores são capazes de transmitir combinações lineares (sobre um campo finito GF(q)) das informações disponíveis.

Em [3], um esquema de *codificação de rede binária* (BNC, do inglês *binary network coding*, definido sobre GF(2)) foi proposto. Mostrou-se que a taxa de erro do sistema pode ser reduzida em relação aos esquemas sem codificação de rede, porém, para que a ordem de diversidade seja aumentada, foi mostrado em [4] que o tamanho do campo finito também deve ser aumentado. No esquema proposto em [4], denominado *codificação de rede dinâmica* (DNC, do inglês *dynamic network coding*), os nós da rede são capazes de transmitir combinações lineares sobre GF(q) de toda a informação disponível durante a fase de cooperação.

Através de uma analogia entre codificação de rede e códigos corretores de erros clássicos, uma generalização do esquema DNC, denominada GDNC (do inglês *generalized dynamic network coding*), foi proposta em [5] e posteriormente expandida em [6], a qual se mostrou ser capaz de atingir simultaneamente tanto taxa quanto ordem de diversidade mais elevados que no esquema DNC. Em [6], mostrou-se que a ordem de diversidade do sistema é equivalente à distância mínima de Hamming do código de bloco associado. Dessa forma, propôs-se a utilização como matriz de transferência da rede uma matriz geradora de um código MDS (do inglês *maximum distance separable*), dentre os quais se enquadra a bem conhecida classe de códigos Reed-Solomon (RS).

Todavia, geralmente os nós de redes sem fio são alimentados por baterias, sendo indesejável recarregá-las ou substituí-las. Nesta situação, além da preocupação em reduzir a taxa de erro do sistema, deve-se tomar cuidados para que este seja energeticamente eficiente, prolongando ao máximo a duração e a vida útil da bateria [9]–[11]. Um fator que não pode ser deixado de lado no consumo total de energia de redes sem fio é

a potência utilizada pelos circuitos transmissores e receptores dos nós que a compõem. Em [9], mostrou-se que o consumo energético de uma rede sem fio é dominado pela potência de transmissão quando os nós da rede estão relativamente distantes uns dos outros. Porém, à medida em que os nós se aproximam, o consumo dos circuitos começa a se tornar relevante. De maneira semelhante, mostrou-se em [10], [11] que, quando o consumo energético dos circuitos transmissores e receptores são levados em consideração, há situações em que cooperação pode ser menos eficiente energeticamente que a transmissão direta.

Neste trabalho, pretende-se avaliar o desempenho do esquema GDNC (e consequentemente da técnica de codificação de rede) em um cenário cooperativo, utilizando-se a eficiência energética (em Joules/bit) como métrica. Além da energia destinada à transmissão, leva-se também em consideração no cálculo do consumo energético a energia consumida pelos circuitos transmissores e receptores dos nós da rede. O número ótimo de nós cooperadores no esquema GDNC necessários para minimizar o consumo energético em função da distância é obtido analiticamente, e confirmado por resultados numéricos.

O restante deste trabalho é organizado da seguinte maneira: A Seção II apresenta o modelo do sistema e os esquemas de cooperação decodifica-e-encaminha (DF, do inglês *decode and forward*) e GDNC. Na Seção III avalia-se a eficiência energética de tais esquemas. Resultados numéricos são apresentados na Seção IV. Finalmente, a Seção V conclui o artigo.

II. Preliminares

A. Modelo do Sistema

Este trabalho considera a parte de múltiplo acesso de uma rede de comunicação sem fio cooperativa, na qual M nós possuem informações independentes para transmitir para um destino (D) em comum. Um pacote (ou *frame*/bloco) 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 através de canais ortogonais no tempo. A palavra-código em banda básica recebida pelo nó j no *subslot* i é dada por

$$\mathbf{y}_{i,j} = \sqrt{P_i \gamma_{i,j}} h_{i,j} \mathbf{x}_i + \mathbf{n}_{i,j}, \tag{1}$$

em que $i \in \{0, \cdots, M-1\}$ representa o índice do nó transmissor (e também o índice do *subslot*), $j \in \{0, 1, \cdots, M\}$ o índice do nó receptor (M corresponde ao destino), P_i a potência do transmissor, $\gamma_{i,j}$ a perda de propagação, $\mathbf{x}_i \in \mathbb{C}^N$ e $\mathbf{y}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ são respectivamente os pacotes transmitidos e recebidos, ambos de comprimento N, e $\mathbf{n}_{i,j} \in \mathbb{C}^N$ 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 $h_{i,j} \in \mathbb{C}$, e 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, do inglês *channel state information*), mas os transmissores não possuem CSI algum.

Considera-se que a perda de propagação entre os nós i e j é dada por [12]

$$\gamma_{i,j} = \frac{G\lambda^2}{(4\pi)^2 (d_{i,j})^\alpha M_t N_f}, \tag{2}$$

em que G é o ganho total das antenas transmissora e receptora, λ é o comprimento de onda, $d_{i,j}$ é a distância entre os referidos nós, α é o expoente de perda de propagação, M_t é a margem do enlace e N_f é a figura de ruído no receptor [12]. Dessa forma, a relação sinal-ruído (SNR) é definida como

$$\text{SNR}_{i,j} = \frac{P_i \gamma_{i,j}}{N_0 B}, \tag{3}$$

em que B é a largura de banda utilizada (em Hertz).

Assumindo que $\mathbf{x}_i$ seja uma variável aleatória Gaussiana i.i.d. e considerando todos os canais com a mesma SNR média, a informação mútua $\text{MI}_{i,j}$ entre $\mathbf{x}_i$ e $\mathbf{y}_{i,j}$, para uma banda de 1 Hz, é igual a

$$\text{MI}_{i,j} = \log_2(1 + |h_{i,j}|^2 \text{SNR}). \tag{4}$$

Assumindo a utilização de um código de canal poderoso o suficiente, $\mathbf{x}_i$ pode ser corretamente recuperado no nó j se $\text{MI}_{i,j} > r_{i,j}$, em que $r_{i,j}$ é a eficiência espectral (em bits/s/Hz) do enlace $i \to j$ (assumida ser a mesma para toda a rede, durante todo o tempo). Dessa forma, $\mathbf{x}_i$ não pode ser corretamente recuperado pelo nó j se

$$|h_{i,j}|^2 < g, \tag{5}$$

em que $g = \frac{2^r - 1}{\text{SNR}}$. A probabilidade de tal evento é denominada probabilidade de *outage* e ocasiona a perda do pacote transmitido no enlace $i \to j$. Para desvanecimento Rayleigh, a probabilidade de *outage* é calculada como [2], [12]

$$\mathcal{P}_o = \Pr\left\{|h_{i,j}|^2 < g\right\} = 1 - e^{-g} \approx g, \tag{6}$$

em que a aproximação é válida para a região de alta SNR.

Para evitar confusão, ressalta-se que neste trabalho P representa potência, enquanto $\mathcal{P}_o$ indica probabilidade de *outage*.

B. Cooperação (Decodifica-e-encaminha)

A Figura 1 apresenta uma rede cooperativa do tipo decodifica-e-encaminha (DF) para $M = 2$ nós cooperadores, em que, após difundir seus próprios pacotes, cada nó apenas retransmite o pacote de seu parceiro (após decodificá-lo e recodificá-lo), sem realizar processamento adicional algum. A taxa do código de rede no esquema DF é dada por

$$R_{\text{DF}} = \frac{\text{Nº de pacotes de informação}}{\text{Nº total de pacotes}} = \frac{M}{2M} = \frac{1}{2}. \tag{7}$$

Em tal cenário, considerando que todos os enlaces da rede são sujeitos a falhas, mostra-se que a probabilidade de *outage* é dada por $\mathcal{P}_{o,DF}(M{=}2) = 1.5\mathcal{P}_o^2$ [2]. Para um número de nós relativamente grande, é razoável assumir que todos os pacotes difundidos pelos M nós sejam corretamente recebidos por pelo menos um dos outros nós, que então atua como seu parceiro.

Dessa forma, em um cenário com M grande, considera-se a situação em que os canais entre os nós cooperadores são livres de erros como um limitante inferior para a probabilidade de *outage* do esquema DF, a qual pode-se mostrar como sendo

$$\mathcal{P}_{o,DF} = 0.5\mathcal{P}_o^2. \quad (8)$$

C. Codificação de Rede Dinâmica Generalizada (GDNC)

Em [6], através de uma associação entre codificação de rede e códigos corretores de erros clássicos, uma generalização do esquema DNC introduzido em [4] foi proposta, mais flexível em termos de taxa de transmissão, e que se mostrou capaz de atingir simultaneamente tanto taxa quanto ordem de diversidade mais elevados que no esquema DNC. Tal generalização, denominada *codificação de rede dinâmica generalizada* (GDNC), considera que durante a fase de difusão cada nó da rede difunde uma quantidade de k_1 pacotes de informação. Durante a fase de cooperação, cada nó transmite para o destino uma quantidade de k_2 pacotes de paridade, compostos por combinações lineares de toda a informação disponível, sobre um campo finito GF(q) suficientemente grande. A Figura 2 ilustra o funcionamento do esquema GDNC.

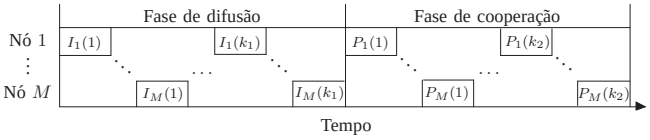


Fig. 2. Protocolo do esquema GDNC. Cada nó inicialmente difunde k_1 pacotes de informação $I_i(t)$ durante a fase de difusão e depois transmite k_2 pacotes de paridade $P_i(t')$, compostos por combinações lineares sobre GF(q) de suas próprias informações e de todos os pacotes dos parceiros que foram corretamente decodificados durante a fase de difusão.

Assim, de acordo com o ilustrado na Figura 2, a taxa do código de rede no esquema GDNC é dada por

$$R_{\text{GDNC}} = \frac{Mk_1}{Mk_1 + Mk_2} = \frac{k_1}{k_1 + k_2}, \quad (9)$$

uma vez que uma quantidade de $M(k_1 + k_2)$ pacotes é transmitida, sendo que somente Mk_1 destes efetivamente carregam nova informação. Na fase de difusão, durante cada uma das Mk_1 difusões realizadas, todos os outros M nós da rede ($M-1$ nós cooperadores mais o destino) tentam decodificar o pacote difundido, mantendo seus circuitos receptores ativos. Durante a fase de cooperação, todas as transmissões são encaminhadas somente para o destino. A Tabela I apresenta o resumo do número de transmissões e recepções realizadas pelo esquema GDNC para cada conjunto de Mk_1 pacotes de informação efetivamente transmitidos para o destino.

TABELA I
NÚMERO DE TRANSMISSÕES E RECEPÇÕES DO ESQUEMA GDNC

	# Transmissões	# Recepções
Fase de Difusão	Mk_1	M^2k_1
Fase de Cooperação	Mk_2	Mk_2
Total	$M(k_1+k_2)$	$M(Mk_1+k_2)$

Para o esquema de cooperação DF apresentado na Seção II-B, de acordo com (7), são realizadas $2M$ transmissões. Já a quantidade de recepções é dada por $M^2 + M$ (M^2 durante a fase de difusão e M durante a fase de cooperação).

1) Probabilidade de outage: Em [6], mostrou-se que a probabilidade de *outage* do esquema GDNC com parâmetros (k_1, k_2, M) é dada por:

$$\mathcal{P}_{o,\text{GDNC}} \approx \binom{k_1+k_2-1}{k_2}\mathcal{P}_o^{M+k_2} \qquad (\text{para } k_2 \geq 2), \quad (10)$$

em que $\binom{k_1+k_2-1}{k_2}$ corresponde ao coeficiente binomial. A partir de (10), percebe-se que a ordem de diversidade do esquema GDNC é $M+k_2$, a qual é atingida caso seja utilizada como matriz de transferência da rede (como coeficientes das combinações lineares) uma matriz geradora de um código com máxima distância mínima de Hamming (MDS, do inglês *maximum distance separable*), como por exemplo a bem conhecida classe de códigos Reed-Solomon [6].

III. Eficiência Energética

Em sistemas sem fio, geralmente os nós da rede são alimentados por baterias, as quais nem sempre são fáceis de serem recarregadas ou substituídas, de tal forma que a maximização de sua duração é um importante item que deve ser levado em consideração no projeto. Em [9], mostrou-se que, dependendo da distância entre os nós, a potência despendida pelos circuitos de transmissão e recepção destes nós pode exercer grande influência no consumo total da rede. Assim sendo, para uma dada taxa de transmissão $R_b = r \cdot B$ (em bits/s), e levando-se em consideração o consumo dos circuitos transmissores e receptores, o *consumo de energia* é definido como [9]

$$E = \frac{P_{\text{amp}} + P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}}{R_b} \quad [\text{J/bit}], \quad (11)$$

em que P_{tx} e P_{rx} são as potências consumidas exclusivamente pelos circuitos de transmissão e recepção, respectivamente, que de acordo com [9] dependem das potências do conversor digital-analógico (P_{DAC}), *mixer* (P_{mix}), filtros transmissores ($P_{\text{tx_filt}}$), sintetizador de frequência (P_{syn}), amplificador de baixo ruído (P_{LNA}), amplificador de frequência intermediária (P_{IFA}), filtros de recepção ($P_{\text{rx_filt}}$) e conversor analógico-digital (P_{ADC}) sendo definidas como:

$$P_{\text{tx}} = P_{\text{DAC}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{tx_filt}} + P_{\text{syn}}, \quad (12)$$

$$P_{\text{rx}} = P_{\text{syn}} + P_{\text{LNA}} + P_{\text{mix}} + P_{\text{IFA}} + P_{\text{rx_filt}} + P_{\text{ADC}}. \quad (13)$$

Em (11), $P_{\text{amp}} = \frac{\xi}{\eta}P_i$ corresponde à potência do amplificador utilizada no processo de transmissão, dependente da potência de transmissão P_i, da eficiência de dreno η do amplificador e da relação *peak-to-average* (PAR) ξ, que é igual a $\xi = 3\left(\frac{\sqrt{m}-1}{\sqrt{m}+1}\right)$ para modulações mQAM [9].

Em [13], mostra-se que, em sistemas em que a taxa de transmissão não é muito elevada (< 1 Mbps), tais como redes de sensores, o consumo de energia relacionado ao processo de codificação/decodificação de canal é irrisório no cálculo do consumo total, podendo ser desprezado.

Analisando-se (11), percebe-se que, para se minimizar o consumo de energia E, deve-se minimizar o valor da potência consumida pelo amplificador (P_{amp}), uma vez que P_{tx} e P_{rx} são fixas (dependentes do *hardware* e não da topologia da rede).

Dessa forma, pode-se obter a partir de (6) e (3) o valor mínimo de potência de transmissão necessário para se garantir uma probabilidade de *outage* alvo $\mathcal{P}_o^*$ na transmissão direta:

$$P_{i,\mathrm{DT}}^* = \frac{N_0 B(2^r-1)}{\gamma_{i,j}\mathcal{P}_o^*}. \quad (14)$$

A. Consumo energético do esquema DF

Observando-se (6) e (8), pode-se mostrar que a potência mínima exigida para se assegurar que a probabilidade de *outage* do esquema DF seja no máximo $\mathcal{P}_{o,\mathrm{DF}}^*$ é

$$P_{i,\mathrm{DF}}^* = \frac{N_0 B\left(2^{(r/R_{\mathrm{DF}})}-1\right)}{\gamma_{i,j}\sqrt{2\mathcal{P}_{o,\mathrm{DF}}^*}}. \quad (15)$$

Ressalta-se que a divisão da eficiência espectral r por R_{DF} em (15) foi realizada para que a eficiência espectral efetiva, medida em bits de informação/s/Hz, fosse mantida inalterada se comparada com a transmissão direta.

Uma vez que a quantidade de transmissões e recepções realizadas no esquema DF são, respectivamente, $2M$ e M^2+M, tem-se que o consumo energético (em Joules/bit) do esquema DF é igual a

$$E_{\mathrm{DF}} = \frac{2M\left(\frac{\xi}{\eta}P_{i,\mathrm{DF}}^*+P_{\mathrm{tx}}\right)+M(M+1)P_{\mathrm{rx}}}{MR_b/R_{\mathrm{DF}}}. \quad (16)$$

B. Consumo energético do esquema GDNC

Pode-se mostrar a partir de (6) e (10) que a potência mínima exigida para que o esquema GDNC assegure probabilidade de *outage* menor ou igual a $\mathcal{P}_{o,\mathrm{GDNC}}^*$ é

$$P_{i,\mathrm{GDNC}}^* = \frac{N_0 B\left(2^{(r/R_{\mathrm{GDNC}})}-1\right)}{\gamma_{i,j}(\mathcal{P}_{o,\mathrm{GDNC}}^*/\mu)^{\frac{1}{M+k2}}}, \quad (17)$$

em que $\mu = \binom{k_1+k_2-1}{k_2}$. De acordo com a quantidade de transmissões/recepções realizadas pelo esquema GDNC apresentadas na Tabela I, obtém-se que o consumo energético do esquema GDNC (em Joules/bit) é dado por:

$$E_{\mathrm{GDNC}} = \frac{(k_1+k_2)\left(\frac{\xi}{\eta}P_{i,\mathrm{GDNC}}^*+P_{\mathrm{tx}}\right)+(Mk_1+k_2)P_{\mathrm{rx}}}{k_1R_b/R_{\mathrm{GDNC}}}. \quad (18)$$

C. Número ótimo de nós

Ao se analisar (15)-(16) e (17)-(18) em conjunto com (2), percebe-se que o consumo de energia dos esquemas DF e GDNC é influenciado não apenas pela distância entre os nós, $d_{i,j}$, mas também pela quantidade de nós, M. Para uma dada distância $d_{i,j}$, haveria um valor ótimo M^* para o número de nós cooperadores a fim de minimizar o consumo energético? Para se obter o ponto crítico de $E_{\mathrm{GDNC}}(M)$, considere a derivada de E_{GDNC} com relação ao número de nós M:

$$\frac{dE_{\mathrm{GDNC}}}{dM} = \frac{P_{\mathrm{rx}}}{R_b} - \frac{\Psi\ln(\Omega)\Omega^{1/(M+k_2)}}{(M+k_2)^2}, \quad (19)$$

em que $\Psi = \frac{\xi N_0 B\left(2^{(r/R_{\mathrm{GDNC}}-1)}\right)}{\eta R_{\mathrm{GDNC}}R_b\gamma_{i,j}}$ e $\Omega = \mu/\mathcal{P}_{o,\mathrm{GDNC}}^*$. Fazendo-se $dE_{\mathrm{GDNC}}/dM = 0$ e isolando-se M, pode-se mostrar que o valor ótimo (que minimiza o consumo energético) para o número de nós cooperadores do esquema GDNC é dado por:

$$M^* = \max\left\{2\ ,\ \frac{\ln(\Omega)}{2W\left(\frac{1}{2}\sqrt{\frac{P_{\mathrm{rx}}\ln(\Omega)}{R_b\Psi}}\right)}-k_2\right\}, \quad (20)$$

em que $W(\cdot)$ corresponde à função Lambert-W [14] e $\max\{2,\cdot\}$ limita o número mínimo de nós cooperadores a 2. Para o esquema DF, pode-se mostrar que o número ótimo de nós que minimiza o consumo energético é $M_{DF}^* = 2$, independentemente da distância entre os nós.

IV. Resultados Numéricos

Nesta seção, alguns resultados numéricos são apresentados, com o intuito de confirmar os resultados obtidos analiticamente. Os parâmetros considerados, em conformidade com [9], estão apresentados na Tabela II, onde f_c corresponde à frequência de portadora. Para $\mathcal{P}_o^* = 10^{-3}$, pode-se mostrar que a aproximação de alta SNR realizada em (6) é válida.

TABELA II
PARÂMETROS UTILIZADOS

M_t	40	dB	f_c	2.5	GHz
N_f	10	dB	B	10	KHz
G	5	dBi	r	1	b/s/Hz
N_0	-174	dBm/Hz	α	4	
P_{tx}	97.9	mW	η	0.35	
P_{rx}	112.2	mW	$\mathcal{P}_o^*$	10^{-3}	

A Fig. 3 apresenta o consumo energético (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M=2$ nós cooperadores, considerando-se a transmissão direta, cooperação (DF) e o esquema GDNC, este com $k_1 = k_2 = 2$ (valores escolhidos para que a taxa do código de rede do esquema GDNC fosse igual à do esquema DF, e observando-se a restrição para k_2 de (10)). Percebe-se que para distâncias

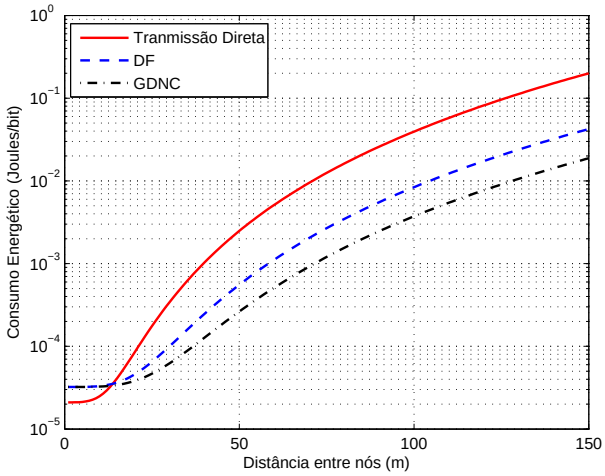


Fig. 3. Consumo de Energia (em Joules/bit) em função da distância (em metros) para uma rede com $M = 2$ nós cooperadores, considerando a transmissão direta, cooperação DF e o esquema GDNC, este com $k_1 = k_2 = 2$.

pequenas ($d \leq 14$ m, neste exemplo), a quantidade quadrática

de recepções dos esquemas DF e GDNC compromete a eficiência energética destes esquemas, sendo a transmissão direta mais eficiente. Porém, à medida que a distância entre os nós aumenta, o consumo referente à circuitaria influencia cada vez menos em (11). Nessa situação, percebe-se que o esquema GDNC é o mais eficiente energeticamente, devido à sua maior ordem de diversidade.

Na Figura 4, o consumo energético (em Joules/bit) está apresentado em função do número de nós cooperadores M, para uma distância fixa $d = 50$ m, considerando-se transmissão direta, esquema DF e o esquema GDNC com $k_1 = k_2 = 2$. Pode-se observar que, para essa distância, o esquema GDNC supera a transmissão direta quando $M < 430$, mas tende a ser menos eficiente que esta para um número muito elevado de nós. Novamente, isso deve-se à quantidade quadrática de recepções do esquema GDNC. Nota-se também ao se observar a Figura 4 que o esquema GDNC apresenta um valor ótimo para o número de nós (neste exemplo, em $M^* = 9$), para o qual o consumo energético apresenta um valor mínimo.

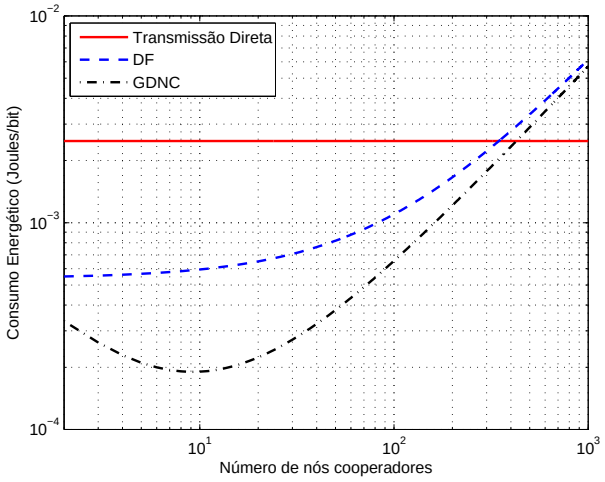


Fig. 4. Consumo de Energia (em Joules/bit) em função do número de nós cooperadores, para $d = 50$ m, considerando a transmissão direta, cooperação DF e o esquema GDNC, com $k_1 = k_2 = 2$.

A Figura 5 apresenta o valor ótimo de nós cooperadores M^* em função da distância para o esquema GDNC, obtido numericamente e analiticamente de acordo com (20). Nota-se que à medida em que a distância entre os nós aumenta, a quantidade de nós necessários para que o consumo energético do esquema GDNC seja minimizado também aumenta. Tal resultado pode ser utilizado pelo sistema na formação de "*clusters*" de cooperação. Percebe-se também que o valor analítico é suportado com grande precisão pelo valor numérico.

V. Conclusões e Comentários Finais

Neste trabalho, avaliou-se a eficiência energética de codificação de rede aplicada a uma rede de múltiplo acesso cooperativa, levando-se em consideração o consumo dos circuitos transmissores e receptores dos nós que a compõem. Percebeu-se que, de maneira semelhante à cooperação tradicional, há situações (distâncias curtas/elevado número de nós) em que cooperação com codificação de rede pode não ser energeticamente eficiente. Porém, para a grande maioria das situações,

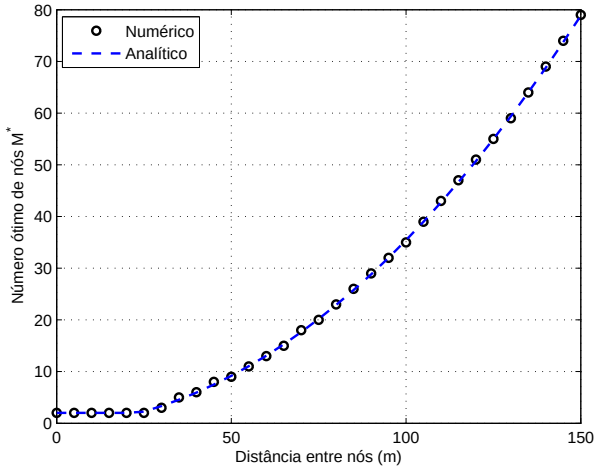


Fig. 5. Valor ótimo do número de nós cooperadores em função da distância para o esquema GDNC com $k_1 = k_2 = 2$.

utilizar codificação de rede pode reduzir consideravelmente o consumo energético da rede. O número ótimo de nós da rede (número de nós que minimiza o consumo energético) foi obtido analiticamente, e confirmado por resultados numéricos.

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 bahavior," *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, "Multiple-user cooperative communications based on linear network coding," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 58, no. 12, pp. 3345–3351, December 2010.

[5] 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.

[6] ——, "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.

[7] 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.

[8] R. Koetter and M. Médard, "An algebraic approach to network coding," *IEEE/ACM Trans. Netw.*, vol. 11, no. 5, pp. 782– 795, October 2003.

[9] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 2349 – 2360, September 2005.

[10] T. Quek, D. Dardari, and M. Win, "Energy efficiency of dense wireless sensor networks: to cooperate or not to cooperate," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 459 – 470, September 2007.

[11] G. G. O. Brante, M. T. Kakitani, and R. D. Souza, "Energy efficiency analysis of some cooperative and non-cooperative transmission schemes in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 10, pp. 2671 – 2677, October 2011.

[12] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.

[13] S. L. Howard, C. Schlegel, K. Iniewski, and K. Iniewski, "Error control coding in low-power wireless sensor networks: When is ECC energy-efficient?" *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2, pp. 1–14, May 2006.

[14] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, "On the Lambert W function," *Advances in Computational Mathematics*, vol. 5, no. 1, pp. 329–359, 1996.