

# Modelo de Canal Relay 3-hop com Realimentação para Sistemas de Altas Taxas

João Luiz Rebelatto e Bartolomeu F. Uchôa-Filho

**Resumo**— O modelo de canal *relay* introduzido por Meulen, no qual uma fonte e um *relay* cooperam para enviar a mensagem a um destino, pode gerar um aumento de capacidade quando comparado à transmissão direta em sistemas de comunicação sem fio. Por outro lado, seleção de *relay* também vem sendo empregada, gerando aumento de capacidade e ganhos de diversidade. Neste trabalho, é proposto um modelo de canal *relay* 3-hop ao invés do tradicional 2-hop, com seleção dupla de *relay*, com o intuito de explorar as melhores condições para a transmissão em ambos os links fonte-*relay* e *relay*-destino. O esquema proposto considera *relays* do tipo *full duplex* e múltiplo acesso por superposição. É mostrado através de simulações computacionais que o esquema 3-hop com dupla seleção proposto pode operar em uma região mais elevada de capacidade que o tradicional modelo 2-hop.

**Palavras-Chave**— Canal *relay*, capacidade ergódica, comunicação cooperativa, múltiplos usuários.

**Abstract**— The relay channel model introduced by Meulen, in which a source and relay cooperate to send information to a destination, can provide a capacity increase compared to direct transmission in wireless communication systems. Moreover, relay selection has also been used, generating capacity increase and diversity gains. In this paper a three-hop relay channel model with double relay selection is proposed instead of the traditional two-hop, in order to exploit the best transmission conditions in both source-relay and relay-destination links. The proposed scheme considers full duplex relaying and superposition multiple access. It is shown through computer simulations that the proposed three-hop scheme with double selection can operate in a higher capacity region than the traditional two-hop.

**Keywords**— Relay channel, ergodic capacity, cooperative communication, multiple users.

## I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação sem fio vêm apresentando um imenso crescimento nos últimos anos. A convergência da tecnologia sem fio com outras tecnologias (como a internet, por exemplo) promete como resultado produtos inovadores e serviços que irão revolucionar vida e trabalho. Associado a isso, a busca por técnicas que aumentem a capacidade dos sistemas de comunicação sem fio vem sendo alvo de uma grande quantidade de pesquisas [1]–[20]. Nesses sistemas sem fio, devido à natureza hostil e aleatória do canal, o emprego de técnicas que melhorem o seu desempenho de erro é de fundamental importância. É também desejável que a taxa de transmissão seja a mais próxima possível da capacidade de canal.

Um modelo de canal introduzido por Van der Meulen [1], denominado canal *relay*, pode gerar um aumento na capacidade dos sistemas de comunicação. Este canal é composto por

três nós: A fonte de informação, o destino e o nó *relay*, cuja função é cooperar com a transmissão da fonte para o destino, aumentando a sua confiabilidade ou gerando redução na sua potência. Isso se deve ao fato de que geralmente tanto o canal fonte-*relay* quanto o canal *relay*-destino apresentam melhores condições (normalmente menores distâncias) para transmissão que o canal fonte-destino. Os *relays* podem ser utilizados em diversas aplicações, tais como sistemas celulares, redes *ad-hoc* sem fio e redes de sensores.

Em [2], Cover e El Gamal derivaram expressões exatas para a capacidade do canal *relay full duplex* sob certas condições e apresentaram limitantes inferiores e superiores para a sua taxa de informação. Outros trabalhos de cunho teórico relacionados a canal *relay* podem ser destacados [3]–[11]. Estes trabalhos foram desenvolvidos para diferentes cenários: canais Gaussianos [2], [5]–[7], canais de comunicação sem fio ergódicos [4], [7]–[10] e não ergódicos [8], [9], [11], *relay* do tipo *half duplex* [8]–[11] e *full duplex* [2]–[8], e sistemas de comunicação com canal de realimentação [2], [5], [8] e sem canal de realimentação [2]–[4], [9]–[11].

Com o intuito de se aproximar das capacidades apresentadas em [2]–[11], estratégias práticas de codificação e processamento de sinais com *relay* vêm sendo propostas [12]–[20], inclusive considerando sistemas multiusuário [12]–[15] ou esquemas de seleção (que pressupõe a existência de um canal de realimentação) com uma quantidade maior de *relays* [18]–[20], baseados, por exemplo, na aptidão ou não destes para decodificar a mensagem recebida da fonte sem que ocorram erros. Porém, uma característica comum a todos estes trabalhos é o fato de considerarem modelos 2-hop, ou seja, somente um *relay* é selecionado para auxiliar a transmissão a cada instante de tempo, seguindo o modelo de 3 terminais proposto em [1].

Neste trabalho, partindo do modelo de canal *relay* 3-hop (com 4 terminais) [21, Cap. 10], ou seja, com a utilização de dois *relays* capazes de se comunicar entre si, e supondo a existência de um canal de realimentação, é introduzida uma seleção dupla dos dois *relays* dentre todos os *relays* disponíveis, de tal forma que sejam extraídas as melhores condições para transmissão tanto no link fonte-*relay* quanto no link *relay*-destino. Esta comunicação extra entre os *relays* caracteriza o modelo 3-hop. Através de simulações computacionais, mostra-se que o modelo proposto, baseado em *relays* do tipo *full duplex* [2]–[8] e múltiplo acesso por superposição [22], é capaz de atingir uma região mais elevada de capacidade se comparado com o seu equivalente 2-hop.

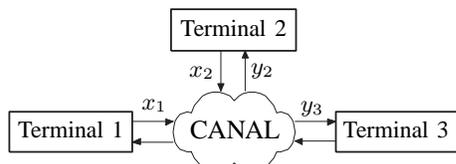
O restante do trabalho é organizado como se segue. A Seção II apresenta os principais conceitos do canal *relay*, assim como os limitantes para sua capacidade, os quais foram expandidos através de conceitos de teoria da informação e obtidos de

forma gráfica através do método de Monte Carlo [23]. Um modelo de canal *relay* 3-hop é proposto na Seção III, e são apresentadas suas taxas de informação atingíveis. A Seção IV apresenta resultados de simulações que mostram a eficiência do modelo proposto. Por fim, a Seção V apresenta as conclusões e comentários finais.

## II. PRELIMINARES

### A. Canal relay

A Figura 1 apresenta o modelo de canal *relay* definido por Meulen [1].



$$(A_1 \times A_2, P(y_2, y_3|x_1, x_2), B_2 \times B_3)$$

Fig. 1. Modelo de canal *relay* definido por Meulen [1].

Este modelo é composto por 4 conjuntos,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_2$  e  $B_3$ , e uma quantidade de funções densidade de probabilidade  $p(\cdot, \cdot|x_1, x_2)$  sobre  $B_2 \times B_3$ , uma para cada  $(x_1, x_2) \in A_1 \times A_2$ . Interpreta-se  $x$  como sendo a entrada e  $y$  como sendo a saída.

Um exemplo de canal *relay* *full duplex* e com múltiplo acesso por superposição está apresentado na Figura 2.

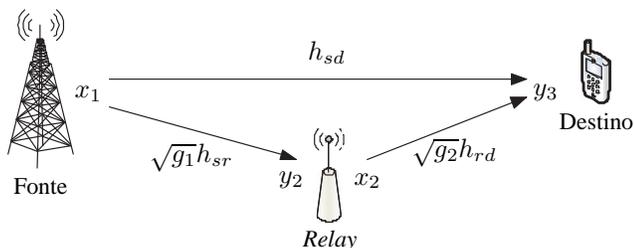


Fig. 2. Exemplo de canal *relay* *full duplex*.

Neste modelo, os sinais recebidos no *relay* e no destino serão, respectivamente:

$$y_2 = \sqrt{g_1} \cdot h_{sr} \cdot x_1 + z_2 \quad (1a)$$

$$y_3 = h_{sd} \cdot x_1 + \sqrt{g_2} \cdot h_{rd} \cdot x_2 + z_3 \quad (1b)$$

em que  $x_1$  e  $x_2$  são os símbolos transmitidos pela fonte e pelo *relay*, respectivamente.  $z_2$  e  $z_3$  representam o ruído Gaussiano, modeladas como variáveis aleatórias complexas i.i.d. com distribuição Gaussiana de média zero e variância  $N_0/2$  por dimensão.  $g_1$  e  $g_2$  são os ganhos relativos do canal fonte-*relay* e *relay*-destino sobre o canal fonte-destino.  $h_{sd}$ ,  $h_{sr}$ ,  $h_{rd}$  são os coeficientes de desvanecimento do canal, modelados como variáveis Gaussianas complexas de média zero e variância unitária. Considera-se que os parâmetros do enlace são conhecidos no destino correspondente, mas não no transmissor.

A cada instante de transmissão, a fonte transmite a sua própria informação. O *relay* a recebe e, simultaneamente, transmite símbolos baseados na informação recebida da fonte no bloco anterior (depois de decodificá-la e recodificá-la), utilizando a mesma faixa de frequência. O nó destino recebe uma superposição dos sinais da fonte e do *relay*, esquema mostrado ser mais eficiente que os ortogonais [22].

O canal *relay* combina um canal de radiodifusão (fonte transmitindo para *relay* e destino) e um canal de múltiplo acesso (fonte e *relay* transmitindo para o destino). Além do canal *relay*, pode-se destacar dois métodos de transmissão mais simples: A transmissão direta e a transmissão *multihop*. Na transmissão direta, há somente um percurso direto entre a fonte e o destino, isto é, sem nenhuma ajuda do nó *relay*; na transmissão *multihop*, há o nó *relay*, mas a transmissão direta não é considerada. Estas duas maneiras de transmissão mais simples podem servir como referência para avaliar a eficiência do canal *relay*.

### B. Capacidade do canal relay

Em [2], Cover e El Gamal derivaram limitantes para a capacidade do canal *relay* *full duplex*:

$$C \leq \max_{p(x_1, x_2)} \min\{I(X_1, X_2; Y_3), I(X_1; Y_3, Y_2|X_2)\} \quad (2a)$$

$$C \geq \max_{p(x_1, x_2)} \min\{I(X_1, X_2; Y_3), I(X_1; Y_2|X_2)\} \quad (2b)$$

Caso a entrada seja considerada independente e uniformemente distribuída (i.u.d.), a capacidade se reduz à denominada *taxa de informação*:

$$I \leq \min\{I(X_1, X_2; Y_3), I(X_1; Y_3, Y_2|X_2)\} \quad (3a)$$

$$I \geq \min\{I(X_1, X_2; Y_3), I(X_1; Y_2|X_2)\} \quad (3b)$$

As taxas de informação apresentadas em (3a) e (3b) podem ser claramente visualizadas em dois termos, correspondentes à parte de radiodifusão (BC) e à parte de múltiplo acesso (MAC).

### C. Cálculo da taxa de informação (Monte Carlo)

Utilizando as propriedades de entropia e informação mútua [24], as taxas de informação apresentadas em (3) podem ser expandidas. Considerando a parte MAC, a expansão da sua taxa de informação resulta em:

$$\begin{aligned} I_{MAC} &= I(X_1, X_2; Y_3) \\ &= H(Y_3) - H(Y_3|X_1, X_2) \\ &= H(Y_3) - H(Z_3). \end{aligned} \quad (4)$$

Já para a parte BC:

$$\begin{aligned} I_{BC} &= I(X_1; Y_3, Y_2|X_2) \\ &= I(X_1; Y_3|X_2) + I(X_1; Y_2|Y_3, X_2) \\ &= H(Y_3|X_2) - H(Y_3|X_1, X_2) \\ &\quad + H(Y_2|Y_3, X_2) - H(Y_2|Y_3, X_1, X_2) \\ &= H(Y_3|X_2) - H(Z_3) + H(Y_2, Y_3|X_2) \\ &\quad - H(Y_3|X_2) - H(Z_2) \\ &= H(Y_2, Y_3|X_2) - H(Z_3) - H(Z_2). \end{aligned} \quad (5)$$

Utilizando-se o método de Monte Carlo, de acordo com o apresentado em [23], considerando-se uma grande quantidade de realizações  $N$ , a entropia de uma variável aleatória  $W$  pode ser calculada como sendo:

$$H(W) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \log_2 p(w_i), \quad (6)$$

em que  $p(w)$  é a distribuição de probabilidade da variável aleatória  $W$ . A entropia de uma variável Gaussiana com variância  $N_0/2$  é conhecida [24] e dada por  $H(Z) = \log_2(\pi e N_0)$ .

A Figura 3 apresenta a taxa de informação (em bits/uso do canal) em função da relação sinal-ruído (em dB) para o sistema com transmissão direta e canal *relay*, considerando  $g_1 = \infty$  (sem erro de decodificação no *relay*) e  $g_2 = 1$ . A potência na transmissão direta foi ajustada de forma que a comparação com o sistema *relay* pudesse ser feita de maneira justa.

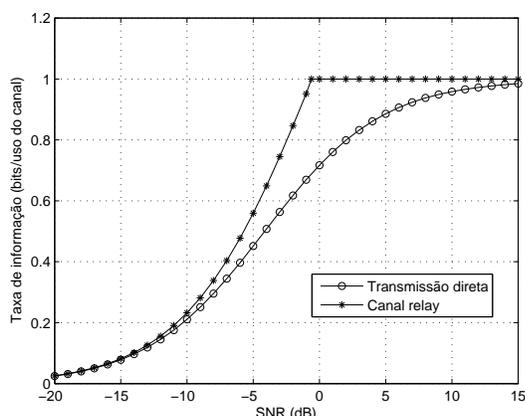


Fig. 3. Taxa de informação (em bits/uso do canal) versus relação sinal-ruído, para transmissão direta e canal *relay*, considerando  $g_1 = \infty$  e  $g_2 = 1$ .

A Figura 4 apresenta uma situação mais realista em que  $g_1 = 12$  dB e  $g_2 = 4$  dB. Percebe-se que o canal com *relay* continua apresentando taxa de informação maior que os outros esquemas.

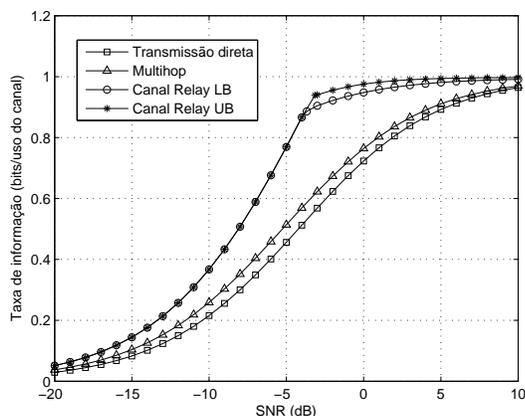


Fig. 4. Taxa de informação (em bits/uso do canal) versus relação sinal-ruído, para transmissão direta, transmissão *multihop* e limites inferior (LB) e superior (UB) do canal *relay*, considerando  $g_1 = 12$  dB e  $g_2 = 4$  dB.

#### D. Sistema com $n$ relays

De uma forma mais geral, um sistema pode possuir uma quantidade maior de *relays*, de acordo com o apresentado na Figura 5. A escolha adequada do(s) *relay*(s) que será(ão) utilizado(s) na transmissão pode gerar ganhos consideráveis de taxa de transmissão.

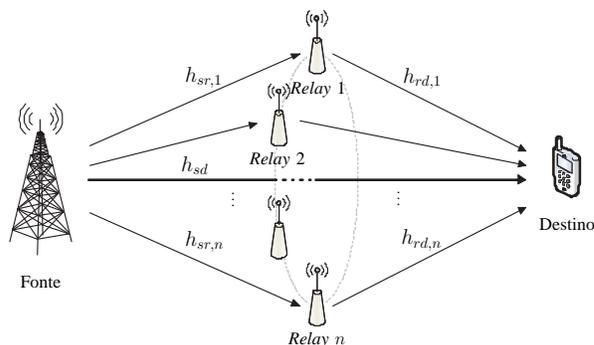


Fig. 5. Modelo de canal com  $n$  relays equidistantes da fonte e transmissão direta.

O ganho de taxa de informação gerado pela escolha adequada do *relay* utilizado na transmissão está ilustrado na Figura 6, para diferentes números de relays  $n$ . É feita a consideração de que todos os relays são do tipo DAF (*decode-and-forward*), e o selecionado para a transmissão é o que apresentar melhor canal *relay*-destino.

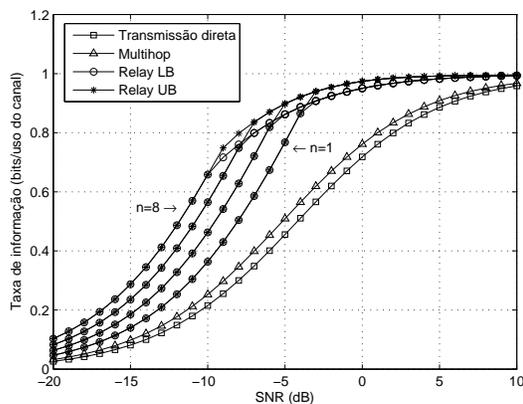


Fig. 6. Taxa de informação (em bits/uso do canal) versus relação sinal-ruído, para transmissão direta, transmissão *multihop* e limites inferior (LB) e superior (UB) do canal *relay*, considerando  $g_1 = 12$  dB e  $g_2 = 4$  dB e número de relays  $n = \{1, 2, 4 \text{ e } 8\}$ .

Percebe-se que a taxa de informação cresce com  $\log_2 n$ , o que já era esperado devido à analogia deste sistema com sistemas de múltiplas antenas [22].

#### III. SISTEMA *Relay* 3-hop

Em um modelo 2-hop, há a seleção de somente um *relay* para auxiliar na transmissão a cada instante de tempo. Independente do critério que seja utilizado nesta seleção, o *relay* selecionado muito provavelmente apresentará um dos links (fonte-*relay* ou *relay*-destino) em condições que não sejam as melhores possíveis para a transmissão.

Com o intuito de explorar as melhores condições dos canais fonte-relay e também do canal relay-destino, é proposto o modelo de canal 3-hop com dupla seleção apresentado na Figura 7.

O esquema proposto considera relays do tipo *full duplex*, os quais, embora ainda possuam restrições de aplicação prática, estão sendo considerados em vários trabalhos [2]–[8], e por apresentar um desempenho (no que diz respeito à capacidade) melhor que os relays do tipo *half duplex*, devem ser analisados visando aplicações futuras.

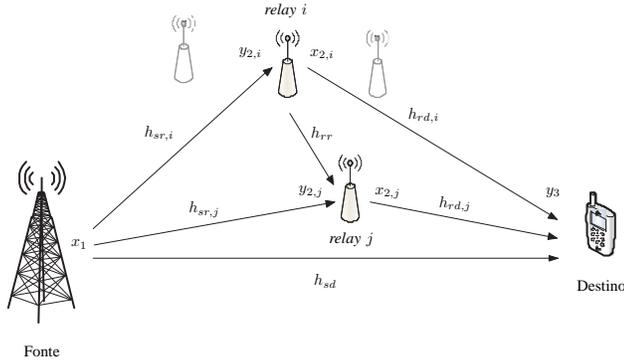


Fig. 7. Modelo de canal relay 3-hop proposto.

No esquema proposto, a fonte difunde a informação simultaneamente para o destino e para os relays  $r_i$  e  $r_j$ , com os melhores canais fonte-relay e relay-destino, respectivamente, ou seja:

$$r_i = \arg \max_{\eta=1,\dots,n} |h_{sr,\eta}|^2,$$

$$r_j = \arg \max_{\eta=1,\dots,n} |h_{rd,\eta}|^2.$$

em que  $n$  é o número de relays e  $h_{sr,\eta}$  e  $h_{rd,\eta}$  são os coeficientes do canal entre a fonte e o  $\eta$ -ésimo relay e entre  $\eta$ -ésimo relay e o destino, respectivamente, ambos com distribuição Rayleigh, compostos por Gaussianas complexas de média zero e variância unitária.

O sinal recebido no relay  $r_i$  é dado por:

$$y_{2,i} = \sqrt{g_1} \cdot h_{sr,i} \cdot x_1 + z_{2,i}, \quad (9)$$

em que  $g_1$  é o ganho relativo do canal fonte-relay sobre o canal fonte-destino,  $h_{sr,i}$  é o melhor dentre os  $n$  canais fonte-relay,  $x_1$  é o sinal transmitido pela fonte e  $z_{2,i}$  é o ruído Gaussiano no relay  $r_i$ , com média zero e variância  $N_0/2$  por dimensão. No instante seguinte, o relay  $r_i$  transmite o sinal relativo à mensagem recebida no instante anterior simultaneamente para o destino e para o relay  $r_j$ . O sinal recebido no relay  $r_j$  será a superposição do sinal transmitido pela fonte e pelo relay  $r_i$ :

$$y_{2,j} = \sqrt{g_1} \cdot h_{sr,j} \cdot x_1 + \sqrt{g_r} \cdot h_{rr} \cdot x_{2,i} + z_{2,j}. \quad (10)$$

em que  $g_r$  é o ganho do link  $r_i \rightarrow r_j$  sobre o link de transmissão direta e  $h_{rr}$  é o coeficiente do canal entre os relays.

No terceiro instante,  $r_j$  transmite para o destino o sinal relativo à mensagem recebida de  $r_i$  no instante anterior (relativo à transmitida pela fonte dois instantes de tempo

atrás). A mensagem recebida no destino seria composta pela superposição de três sinais distintos:

$$y_3 = h_{sd} \cdot x_1 + \sqrt{g_{2,i}} \cdot h_{rd,i} \cdot x_{2,i} + \sqrt{g_{2,j}} \cdot h_{rd,j} \cdot x_{2,j} + z_3, \quad (11)$$

em que  $x_1$ ,  $x_{2,i}$  e  $x_{2,j}$  são os símbolos transmitidos pela fonte e pelos relays  $r_i$  e  $r_j$ , respectivamente.  $z_3$  representa o ruído Gaussiano no destino, com média zero e variância  $N_0/2$  por dimensão.  $g_{2,i}$  e  $g_{2,j}$  são os ganhos relativos do canal relay  $i$ -destino e relay  $j$ -destino sobre o canal fonte-destino.  $h_{sd}$ ,  $h_{rd,i}$  e  $h_{rd,j}$  são os coeficientes do canal.

Como  $x_{2,j}$  é uma função de  $x_{2,i}$  no instante anterior, e supondo que o relay  $r_i$  conhece o esquema de codificação adotado no relay  $r_j$ , a interferência que  $x_{2,j}$  causa no relay  $r_i$  é conhecida e pode, portanto, ser removida. Por essa razão, o canal  $r_j \rightarrow r_i$  é desconsiderado no modelo.

#### A. Taxa de informação do modelo 3-hop proposto

De acordo com a teoria de *max-flow min-cut* [25], para o modelo 3-hop proposto há 4 “cortes”, os quais estão apresentados na Figura 8.

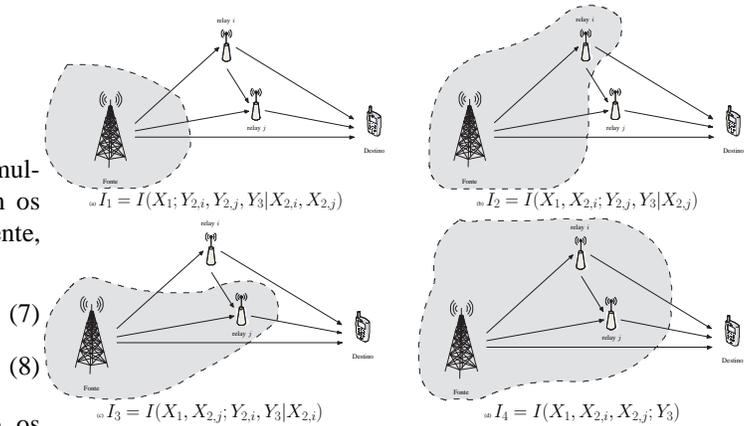


Fig. 8. *Max-flow min-cut* do modelo 3-hop proposto.

A taxa de informação do sistema será obtida de maneira semelhante à apresentada em [21]:

$$I = \min\{I_1, I_2, I_3, I_4\}. \quad (12)$$

Expandindo a taxa de informação do primeiro corte através de conceitos de teoria de informação, obtém-se:

$$\begin{aligned} I_1 &= I(X_1; Y_{2,i}, Y_{2,j}, Y_3 | X_{2,i}, X_{2,j}) \\ &= H(Y_{2,i}, Y_{2,j}, Y_3 | X_{2,i}, X_{2,j}) \\ &\quad - H(Y_{2,i}, Y_{2,j}, Y_3 | X_1, X_{2,i}, X_{2,j}) \\ &= H(Y_{2,i}, Y_{2,j}, Y_3 | X_{2,i}, X_{2,j}) \\ &\quad - H(Z_{2,i}) - H(Z_{2,j}) - H(Z_3). \end{aligned} \quad (13)$$

De maneira semelhante, pode-se obter a taxa de informação dos outros cortes, que são dadas por:

$$\begin{aligned} I_2 &= I(X_1, X_{2,i}; Y_{2,j}, Y_3 | X_{2,j}) \\ &= H(Y_{2,j}, Y_3 | X_{2,j}) - H(Z_3) - H(Z_{2,j}). \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} I_3 &= I(X_1, X_{2,j}; Y_{2,i}, Y_3 | X_{2,i}) \\ &= H(Y_{2,i}, Y_3 | X_{2,i}) - H(Z_3) - H(Z_{2,i}). \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 I_4 &= I(X_1, X_{2,i}, X_{2,j}; Y_3) \\
 &= H(Y_3) - H(Y_3|X_1, X_{2,i}, X_{2,j}) \\
 &= H(Y_3) - H(Z_3).
 \end{aligned} \tag{16}$$

Ressalta-se que diferentemente do esquema com 2 *relays* proposto em [21], o esquema proposto neste trabalho considera os canais fonte- $r_i$  e  $r_j$ -destino como sendo *order statistics*, e que para este tipo de canal, não foi encontrado na literatura trabalhos que utilizem 2 ou mais *relays*.

#### IV. RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Na Figura 9 está apresentado o limitante superior para a taxa de informação atingível com o modelo *3-hop* proposto, aplicando-se o método de Monte Carlo às equações (12)-(16) e considerando uma quantidade de  $n = 4$  *relays*,  $g_1 = 12$  dB e  $g_{2,i} = g_{2,j} = 4$  dB. Além disso, a Figura 9 também apresenta o limitante superior para a taxa de informação do modelo de canal *2-hop* com  $n = 4$  *relays* (apresentada inicialmente na Figura 6). Para que fosse realizada uma comparação justa, a potência de transmissão da fonte e dos *relays* do modelo *3-hop* proposto foram reduzidas por um fator  $2/3$ , de tal forma que a potência total de transmissão de ambos os esquemas, assim como da transmissão direta e *multihop*, fosse a mesma.

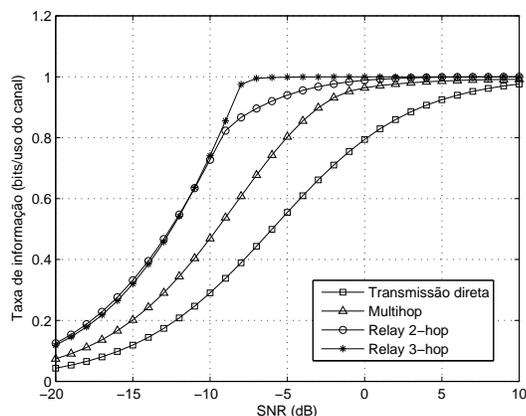


Fig. 9. Taxa de informação versus SNR, para  $g_1 = 12$  dB e  $g_{2,i} = g_{2,j} = 4$  dB, considerando a transmissão direta, transmissão *multihop*, canal *relay 2-hop* e o modelo *3-hop* proposto, ambos para  $n = 4$  *relays*.

Deve-se notar que, para altas taxas ( $>0,85$ ), o ganho de SNR é significativo. Por exemplo, para uma taxa de 0,9 bits/uso do canal, o ganho é de aproximadamente 2,5 dB em relação ao esquema *relay 2-hop*.

Quando o número de *relays*  $n$  torna-se maior, maior também é o ganho obtido em altas taxas pelo sistema *3-hop* em relação ao *2-hop*, de acordo com o apresentado nas Figuras 10 e 11, considerando  $n = 32$  e  $n = 512$ , respectivamente.

Para  $n = 32$  *relays*, o ganho obtido com o sistema *3-hop*, considerando uma taxa de 0,9 bits/uso do canal é de aproximadamente 4 dB. Se considerarmos  $n = 512$ , esse ganho sobe para mais de 5 dB.

Deve-se levar em consideração que o sistema *3-hop* apresenta uma latência (atraso) maior que o *2-hop*, uma vez que a mensagem transmitida pela fonte em dado instante demorará

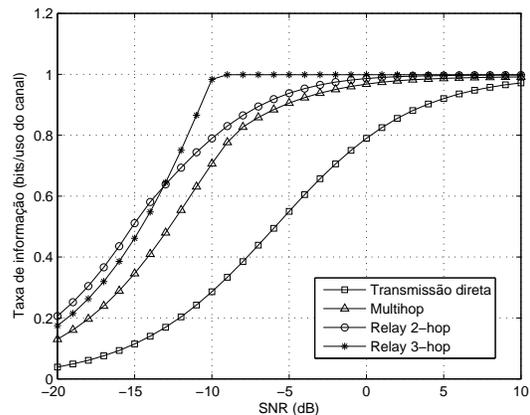


Fig. 10. Taxa de informação versus SNR, para  $g_1 = 12$  dB e  $g_{2,i} = g_{2,j} = 4$  dB, considerando a transmissão direta, transmissão *multihop*, canal *relay 2-hop* e o modelo *3-hop* proposto, ambos para  $n = 32$  *relays*.

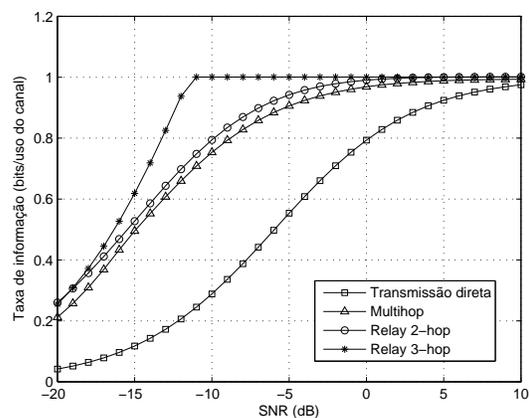


Fig. 11. Taxa de informação versus SNR, para  $g_1 = 12$  dB e  $g_{2,i} = g_{2,j} = 4$  dB, considerando a transmissão direta, transmissão *multihop*, canal *relay 2-hop* e o modelo *3-hop* proposto, ambos para  $n = 512$  *relays*.

um instante de tempo (aqui tratado como o tempo necessário para a transmissão de um bloco de símbolos, ou *frame*) a mais para estar completamente disponível no destino.

#### V. CONCLUSÕES

Um esquema de canal *relay* com realimentação capaz de atingir uma taxa de informação mais elevada foi apresentado. O esquema proposto é baseado em um modelo *3-hop* ao invés do tradicional *2-hop*. O modelo se aplica à situação prática em que um nó fonte transmite informação a um nó destino distante e, em uma região geográfica intermediária,  $n$  nós *relays* encontram-se próximos entre si e disponíveis para cooperar. Mostrou-se através de simulações que ganhos maiores que 5 dB podem ser obtidos com o esquema proposto. Com o intuito de aproximar a taxa de informação obtida na prática dessas taxas de informação teóricas, estratégias de codificação de canal baseadas em códigos turbo e LDPC, na linha de [26]–[28], serão elaboradas na seqüência do trabalho e associadas ao modelo *3-hop* proposto.

## REFERÊNCIAS

- [1] E. C. van der Meulen, "Three-terminal communication channels," *Advanced Applied Probability*, vol. 3, pp. 120–154, 1971.
- [2] T. M. Cover and A. E. Gamal, "Capacity theorems for the relay channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 25, no. 9, pp. 572–584, Setembro 1979.
- [3] P. Vanroose and E. van der Meulen, "Uniquely decodable codes for deterministic relay channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-38, no. 4, pp. 1203–1212, Julho 1992.
- [4] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 9, pp. 3037–3063, Setembro 2005.
- [5] L. L. Xie and P. R. Kumar, "An achievable rate for the multiple-level relay channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1348–1358, Abril 2005.
- [6] A. Reznik, S. R. Kulkarni, and S. Verdú, "Degraded gaussian multirelay channel: Capacity and optimal power allocation," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 10, pp. 3037–3046, Dezembro 2004.
- [7] B. Wang, J. Zhang, and A. Host-Madsen, "On the capacity of MIMO relay channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 1, pp. 29–43, Janeiro 2005.
- [8] A. Host-Madsen and J. Zhang, "Capacity bounds and power allocation for wireless relay channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 51, no. 6, pp. 2020–2040, Junho 2005.
- [9] R. U. Nabar, H. Bölcskei, and F. W. Kneubühler, "Fading relay channels: Performance limits and space-time signal design," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 22, no. 6, pp. 1099–1109, Agosto 2004.
- [10] G. Farhadi and N. C. Bealieu, "On the capacity of wireless relaying systems over rayleigh fading channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4462–4467, Novembro 2008.
- [11] H. Bölcskei, R. U. Nabar, O. Oyman, and A. J. Paulraj, "Capacity scaling laws in MIMO relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 5, no. 6, pp. 1433–1444, Junho 2006.
- [12] 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, Novembro 2003.
- [13] 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, Dezembro 2004.
- [14] T. E. Hunter and A. Nosratinia, "Cooperative diversity through coding," in *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory, ISIT'02*, Lausanne, Switzerland, Julho 2002, p. 220.
- [15] A. Stefanov and E. Erkip, "Cooperative coding for wireless networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 52, no. 9, pp. 1470–1476, Setembro 2004.
- [16] —, "Cooperative space-time coding for wireless networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1804–1809, Novembro 2005.
- [17] Z. Liu, V. Stankovic, and Z. Xiong, "Wyner-ziv coding for the halfduplex relay channel," in *Proc. IEEE International Conference on ASSP*, Philadelphia, PA, Março 2005, pp. 1113–1116.
- [18] Y. Zhao, R. Adve, and T. J. Lim, "Improving amplify-and-forward relay networks - optimal power allocation versus selection," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 8, pp. 3114 – 3123, Agosto 2007.
- [19] E. Beres and R. Adve, "On selection cooperation in distributed networks," in *Proc. IEEE Conference on Information Sciences and Systems. CISS'06*, Março 2006, pp. 1056–1061.
- [20] Y. Li, B. Vucetic, Z. Chen, and J. Yuan, "An improved relay selection scheme with hybrid relaying protocols," in *Proc. IEEE Global Telecommunications Conference. GLOBECOM '07*, Novembro 2007, pp. 3704 – 3708.
- [21] G. Kramer, *Topics in Multi-User Information Theory*. Foundations and Trends® in Communications and Information Theory, 2008.
- [22] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [23] D. Arnold and H.-A. Loeliger, "On the information rate of binary-input channels with memory," in *Proc. IEEE International Conference on Communications. ICC'01*, vol. 9, Junho 2001, pp. 2692–2695.
- [24] T. M. Cover and J. A. Tomas, *Elements of Information Theory*. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1991.
- [25] L. R. Ford and D. R. Fulkerson, "Maximal flow through a network," *Canadian Journal of Mathematics*, vol. 8, pp. 399–404, 1956.
- [26] Z. Zhang and T. M. Duman, "Capacity approaching turbo coding and iterative decoding for relay channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 53, no. 11, pp. 1895–1905, Novembro 2005.
- [27] —, "Capacity approaching turbo coding for half duplex relaying," in *Proc. IEEE International Symposium on Information Theory. ISIT'05*, Adelaide, Australia, Setembro 2005, pp. 1888–1892.
- [28] J. Hu and T. M. Duman, "Low Density Parity Check codes over wireless relay channels," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 9, pp. 3384–3394, Setembro 2007.