

Diversidade Cooperativa com Codificação Espaço-Temporal Aplicada a uma Rede de Comunicação sem Fio Half-duplex

Jéssica Bartholdy Sanson, Natanael Rodrigues Gomes, Renato Machado

Resumo—Redes de comunicação sem fio têm se tornado populares em diversas áreas de aplicações industriais, civis e multimídia. O desempenho desses sistemas pode ser melhorado pela utilização da técnica de diversidade cooperativa. Comunicação cooperativa é uma técnica que possibilita que a diversidade espacial seja obtida mesmo em dispositivos providos de somente uma antena, e conseqüentemente, compensando o desvanecimento característico do canal sem fio. O presente trabalho apresenta duas propostas de diversidade cooperativa para uma rede sem fio *half-duplex*: O Código de Alamouti e o Esquema Clássico da Combinação de Máxima Razão na Recepção (MRRC) modificados. A ideia principal é empregar, em redes cooperativas, dispositivos ativos na rede como retransmissores (*relays*), obtendo desta forma diversidade semelhante à encontrada em dispositivos MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Os modelos apresentados foram avaliados em termos de taxas de erro de bit versus SNR através de simulações em diferentes ambientes para ilustrar os desempenhos das técnicas de diversidade cooperativa com Alamouti e MRRC comparadas com sistemas MIMO clássicos.

Palavras-Chave—Diversidade Cooperativa, Rede de Comunicação sem Fio, Codificação Espaço-Temporal.

Abstract—Wireless communications networks have become popular in many areas such as industrial, civil and multimedia. The performance of these systems can be improved by using cooperative diversity technique. Cooperative communication is a technique that explore spatial diversity - even on devices assembled with only one antenna - and consequently, helping to combat channel fading. This paper presents two proposals for cooperative diversity to a wireless network operating in half-duplex mode: The modified Alamouti code and the modified Maximum Ratio Combining (MRRC) scheme. The main idea is to perform in cooperative networks, the use of active devices in the network as relays (*relays*), thus obtaining diversity similar to that found in MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) devices. The designs presented have been evaluated in terms of bit error rates (BER) versus signal-to-noise ratio (SNR) by simulations in different environments to illustrate the performance of cooperative diversity by using modified versions of the Alamouti and MRRC compared to classical MIMO system.

Keywords—Cooperative Diversity, Wireless Communication Network, Space-Time Coding.

I. INTRODUÇÃO

Determinadas redes de comunicação sem fio possuem transmissores muito pequenos, não permitindo a instalação de múltiplas antenas, fato que pode ser um obstáculo para se explorar técnicas de diversidade espacial. Como exemplo,

Jéssica Bartholdy Sanson, Natanael Rodrigues Gomes, Renato Machado Departamento de Eletrônica e Computação, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria-RS, Brasil, E-mails: jessikbs.37@hotmail.com, natanael.rgomes@gmail.com, renatomachado@ufsm.br.

redes de sensores, transmissão de voz, etc. Para superar as limitações citadas anteriormente pode-se aplicar o conceito de comunicação cooperativa, onde o sinal transmitido pelos nós fonte são ocasionalmente recebidos por outros nós, os quais podem ser vistos como nós colaboradores (*relays*). A fonte e seus *relays* podem conjuntamente processar e transmitir a informação [1], criando assim uma rede de antenas, embora cada um desses nós esteja equipado com apenas uma única antena.

Os esquemas de comunicação cooperativa que estão sendo propostos nesse trabalho visam a utilização dos dispositivos ativos na rede como retransmissores, explorando a diversidade espacial antes somente explorada por sistemas com múltiplas antenas, e obtendo assim uma diversidade muito próxima à que existe em dispositivos MIMO.

II. CODIFICAÇÃO EM BLOCO ESPAÇO-TEMPORAL

A. O Esquema Clássico de Combinação de Máxima Razão na Recepção (MRRC)

O esquema clássico de combinação de máxima razão na recepção (MRRC) consiste na combinação dos sinais recebidos por pelo menos duas antenas no receptor. A representação em banda base do modelo clássico do MRRC para dois ramos (dois canais) é apresentada na Fig. 1. Considera-se que, em

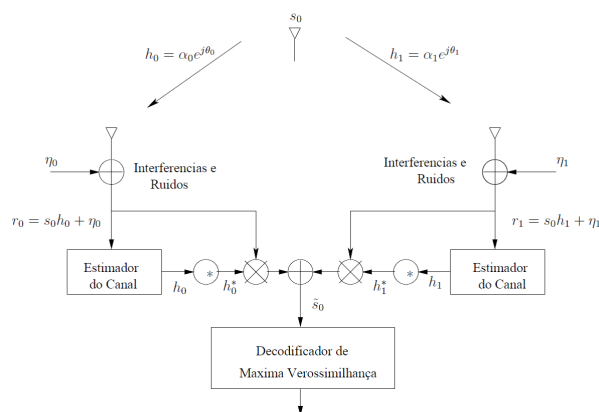


Fig. 1. O esquema clássico de combinação de máxima razão na recepção (MRRC).

um certo instante de tempo, o sinal s_0 , pertencente a uma constelação de sinais S , seja transmitido pela única antena transmissora. O ganho do canal entre a antena transmissora e

a antena receptora 0 é denotada por h_0 , e o ganho do canal entre a antena transmissora e a antena receptora 1 é denotado por h_1 [2], em que:

$$h_0 = a_0 e^{j\theta_0} \quad (1)$$

$$h_1 = a_1 e^{j\theta_1} \quad (2)$$

Ruídos são somados aos sinais nas duas antenas, resultando nos seguintes sinais recebidos em banda base:

$$r_0 = h_0 s_0 + n_0 \quad (3)$$

$$r_1 = h_1 s_0 + n_1 \quad (4)$$

em que n_0 e n_1 representam ruídos complexos, Gaussianos e estatisticamente independentes. E por fim o esquema de combinação no receptor MRRC para dois ramos é dado por:

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1^* r_1 \quad (5)$$

em que h_j^* é o conjugado complexo de h_j . O resultado de (5) é utilizado como entrada do detector de máxima verossimilhança (ML - *Maximum Likelihood*).

B. Esquema de Alamouti

O esquema de Alamouti é o primeiro código em bloco espaço-temporal a prover diversidade completa de transmissão com duas antenas transmissoras [3]. No codificador espaço-temporal de Alamouti, primeiramente cada grupo de m bits de informação é modulado, sendo $m = \log_2 M$. Então, o codificador aloca um bloco de dois símbolos modulados s_0 e s_1 em cada operação de codificação e os mapeia para serem transmitidos de acordo com uma matriz código [3], dada por:

$$S = \begin{pmatrix} s_0 & -s_1^* \\ s_1 & s_0^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

sendo as linhas da matriz referentes às antenas transmissoras e as colunas referentes aos instantes de transmissão.

As saídas do codificador são transmitidas em dois períodos de transmissão consecutivos a partir de duas antenas transmissoras. Durante o primeiro período de transmissão, dois sinais s_0 e s_1 são transmitidos simultaneamente a partir das antenas t_{x0} e t_{x1} , respectivamente. No segundo período de transmissão, o sinal $-s_1^*$ é transmitido a partir da antena t_{x0} e o sinal s_0^* a partir da antena t_{x1} , em que s_0^* e s_1^* é o conjugado complexo de s_0 e s_1 , respectivamente. Desse modo, fica claro que a codificação é feita em ambos os domínios de espaço e tempo.

A principal propriedade do esquema de Alamouti é que as sequências de transmissão provenientes das duas antenas transmissoras são ortogonais.

Admita que somente uma antena é utilizada no receptor. O diagrama de blocos do receptor para o esquema de Alamouti é mostrado na Fig. 2. Os coeficientes de desvanecimento do canal, a partir da primeira e da segunda antenas transmissoras até a antena receptora no instante de tempo t , são denotados por $h_0(t)$ e $h_1(t)$, respectivamente. Admiti-se que os coeficientes de desvanecimento são constantes entre dois períodos consecutivos de transmissão de símbolos. Os sinais recebidos em dois períodos de símbolos consecutivos, denotados por r_0

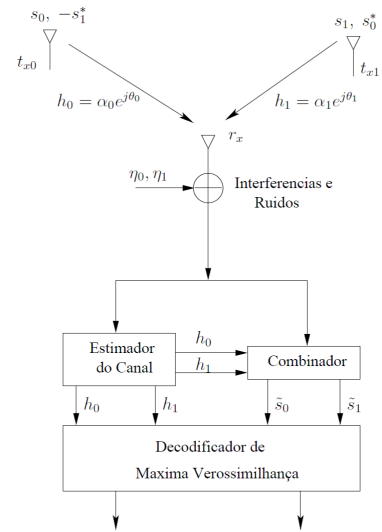


Fig. 2. O esquema de Alamouti de diversidade na transmissão com uma antena receptora.

e r_1 para o tempo t e $t + T$, respectivamente, podem ser expressos por [4] :

$$r_0 = h_0 s_0 + h_1 s_1 + n_0 \quad (7)$$

$$r_1 = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + n_1 \quad (8)$$

em que n_0 e n_1 são variáveis aleatórias, representando as amostras de ruído Gaussiano branco aditivo, nos tempos t e $t + T$, respectivamente. Se os coeficientes de desvanecimento do canal, h_0 e h_1 , puderem ser perfeitamente recuperados no receptor, o decodificador os usará como informação do estado do canal e realizará o seguinte processamento linear:

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + h_1^* r_1 \quad (9)$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - h_0^* r_1 \quad (10)$$

As quais servirão de entrada para o detector ML.

III. COMUNICAÇÃO COOPERATIVA

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 espacial pode ser explorada. Com esse foco, surgem as pesquisas em redes cooperativas, que visam a utilização dos dispositivos ativos na rede como relay (retransmissores). A idéia básica dessa técnica é obter diversidade semelhante à obtida em sistemas MIMO [5].

Um sistema de comunicação com três terminais é a unidade básica de cooperação. 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 transmitir suas informações; e a fase de cooperação, em que os nós da rede atuam como repetidores - retransmitindo para o nó destino as mensagens decodificadas de seus parceiros

durante a fase de difusão. Tal procedimento está ilustrado na Fig. 3, para uma rede com 2 nós difusores [6].

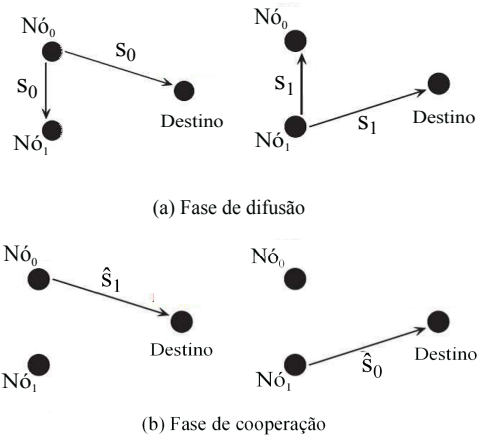


Fig. 3. Rede decodifica-e-encaminha com 2 nós transmissores e múltiplo acesso ortogonal. (a) Cada usuário difunde sua própria informação; (b) Cada usuário retransmite a informação de seu parceiro para o destino.

IV. MODELO DO SISTEMA

Considerando-se uma rede cooperativa com três nós operando no modo *half-duplex*, percebe-se que a restrição de transmissão conjunta (transmissão nos dois nós transmissores feita de forma simultânea), é necessária apenas durante a fase de difusão (Fig. 3(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. Dessa forma, neste trabalho propomos que a restrição da transmissão simultânea dos nós transmissores durante a fase de cooperação seja relaxada, de forma que os usuários sejam capazes de transmitir os seus pacotes de paridade de forma simultânea.

O esquema de transmissão cooperativo proposto consiste em 2 nós transmissores (nós parceiros) e 1 nó destino, todos equipados com uma única antena operando em modo *half-duplex*. Assume-se que os canais entre cada nó transmissor e o nó destino (diretos) estão sujeitos a desvanecimento Rayleigh plano, e que os canais entre os nós transmissores (interusuários) estão sujeitos a desvanecimento Rice. Os canais interusuários e os canais diretos são considerados totalmente independentes. Os sinais recebidos são adicionados de um ruído aditivo Gaussiano branco. Os nós transmissores, denominados nó 1 e nó 0, enviam seus símbolos de informação para o nó destino. Os nós transmissores também realizam a função de *relays* entre si, o protocolo utilizado pelos nós relays foi amplifica e encaminha (amplify-and-forward AF) como em [7].

Os coeficientes do desvanecimento h_i , associados aos canais de transmissão entre os nós $i, i = 0, 1$, e o nó receptor são modelados como variáveis aleatórias Gaussianas complexas, com média zero e variância 0,5 por dimensão complexa. Assume-se que os coeficientes dos desvanecimentos são constantes durante a transmissão de um bloco de dois símbolos

consecutivos, mudando aleatoriamente a cada novo bloco de transmissão. A potência total transmitida por período de transmissão no sistema é P .

V. ESQUEMA DE DIVERSIDADE COOPERATIVA COM O CÓDIGO DE ALAMOUTI MODIFICADO

Apresenta-se agora o emprego do código de Alamouti modificado em um esquema de comunicação sem fio cooperativo (similarmente ao que é feito em esquemas MIMO) para obtenção da diversidade cooperativa conforme mostrado na Fig. 4.

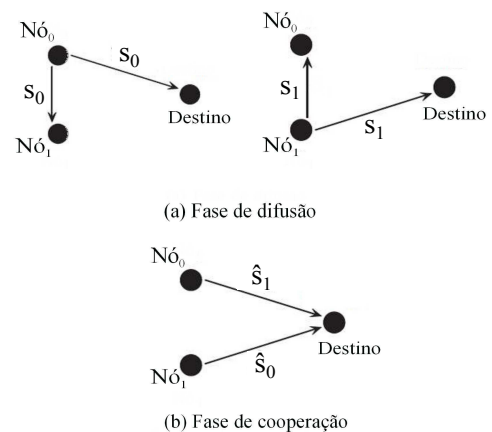


Fig. 4. Rede com Diversidade Cooperativa com o Código de Alamouti (a) Cada usuário difunde sua própria informação; (b) Cada usuário retransmite a informação de seu parceiro para o destino em um mesmo período de transmissão.

A transmissão dentro de um bloco é realizada da seguinte maneira: No primeiro período de símbolo, o nó 0 transmissor envia seu próprio símbolo de informação para o nó destino, mas este símbolo é também recebido pelo nó parceiro, que realiza sua detecção. No segundo período de símbolo o nó 1 realiza esse mesmo processo, lembrando que o fato desse processo ser realizado em dois períodos, deve-se a rede operar em modo *half-duplex*. O que possibilita que a transmissão seja feita com potência P e não $P/2$ conforme realizado com o esquema de Alamouti clássico. No terceiro período os nós transmissores realizam cooperação e retransmitem a informação recebida de seu nó parceiro, que agora ocorre na potência $P/2$, devido as duas transmissões serem simultâneas. Como é possível verificar nesse caso, a transmissão de Alamouti modificado se dá em 3 períodos, diferente de dois como na convencional, porém ainda assim é um período a menos do que a mostrada na Fig. 3, e usado em [8], que ocasiona um ganho de taxa de transmissão.

TABELA I
SÍMBOLOS ENVIADOS NO ESQUEMA DE DIVERSIDADE COOPERATIVA COM O CÓDIGO DE ALAMOUTI.

Nó	Período 1	Período 2	Período 3
0	s_0	—	$-\hat{s}_1^*$
1	—	s_1	\hat{s}_0^*

A transmissão dos símbolos desse esquema de diversidade cooperativa é mostrada na Tabela I. No terceiro período de símbolo, os nós cooperadores 1 e 2 realizam a transmissão do símbolo que foi detectado por eles. Então no nó receptor teremos os seguintes símbolos recebidos dados por:

$$y_1 = s_0 h_0 + n_0 \quad (11)$$

$$y_2 = s_1 h_1 + n_1 \quad (12)$$

$$y_3 = -\hat{s}_1^* h_0 + \hat{s}_0^* h_1 + n_3 \quad (13)$$

onde n_0 , n_1 e n_3 representam o ruído AWGN, modelados como variáveis aleatórias complexas com média zero e variância $N_0/2$ por dimensão, para os Períodos 1 e 2, respectivamente. Transformando agora para o formato de trabalho do código de Alamouti, temos:

$$y_{1,2} = s_0 h_0 + s_1 h_1 + n_4, \quad (14)$$

$$y_3 = -\hat{s}_1^* h_0 + \hat{s}_0^* h_1 + n_3 \quad (15)$$

Sendo $n_4 = n_0 + n_1$ e assim pode-se aplicar a técnica de Alamouti.

VI. ESQUEMA DE DIVERSIDADE COOPERATIVA COM O MRRC MODIFICADO

Para o esquema proposto de Diversidade Cooperativa com o MRRC modificado, realiza-se algo muito parecido com o mostrado anteriormente, aplicando o método proposto por Alamouti. O modelo do sistema é o mesmo, com apenas uma pequena mudança nos símbolos transmitidos, como pode ser visto na Tabela II abaixo:

TABELA II

SÍMBOLOS ENVIADOS NO ESQUEMA DE DIVERSIDADE COOPERATIVA ATRAVÉS DE MRRC

Nó	Período 1	Período 2	Período 3
0	s_0	—	\hat{s}_1
1	—	s_1	\hat{s}_0

Como se pode notar nesse caso, está se trabalhando com MRRC num sistema com apenas um receptor e dois transmissores, porém se realizará um processamento dos sinais recebidos, que resultará nas mesmas variáveis obtidas num sistema com dois receptores. Abaixo temos os símbolos recebidos no nó receptor, nos Períodos 1 e 2 e 3:

$$y_1 = s_0 h_0 + n_0 \quad (16)$$

$$y_2 = s_1 h_1 + n_1 \quad (17)$$

$$y_3 = \hat{s}_1 h_0 + \hat{s}_0 h_1 + n_3$$

(18)

Como é possível ver, assim como na técnica de Alamouti, existe a necessidade da transmissão se dar em 3 períodos de tempo, um período a mais do que o utilizado no MRRC original para transmitir esses dois símbolos. E também é notável que no Período 3 é possível retirar as variáveis matemáticas necessárias para realizar o MRRC. Retirando as informações do

símbolo de s_0 do sinal y_1 e s_1 do sinal y_2 através de um pré-processamento do sinal podemos trabalhar sistematicamente, dada a equação original do MRRC:

$$\tilde{s}_0 = h_0^*(h_0 s_0 + n_0) + h_1^*(h_1 s_0 + n_1) \quad (19)$$

Para o esquema proposto modificado teremos então:

$$\tilde{s}_0 = h_0^*(y_1) + h_1^*(y_3 - \hat{s}_1 h_0) \quad (20)$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^*(y_2) + h_0^*(y_3 - \hat{s}_0 h_1) \quad (21)$$

Note que \hat{s}_1 e \hat{s}_0 são obtidos através do pré processamento de y_1 e y_2 .

VII. RESULTADOS

Os resultados das simulações utilizam uma fonte de informação modulada em BPSK. As técnicas avaliadas nesse esquema de transmissão para uma rede cooperativa *half-duplex* foram: Alamouti e MRRC modificado, comparadas com o esquema de transmissão sem diversidade, e também com técnica de Alamouti e de MRRC em sistemas MIMO em termos de probabilidades de erro de bit ($P(e)$) versus SNR.

A Fig. 5 apresenta as taxas de BER versus SNR para os esquemas propostos, considerando um SNR interusuários de 20dB e um fator de Rice $K = 0dB$. Percebe-se, como previsto, que o esquema de diversidade cooperativa considerando o código de Alamouti apresenta, como esperado, um desempenho superior ao cenário sem diversidade. O mesmo ocorre com o MRRC modificado, que apresenta um desempenho ainda melhor, comparado ao sem diversidade.

Outra observação interessante que se pode verificar é que as curvas dos esquemas de diversidade cooperativa apresentadas nesse trabalho, conforme vão se aproximando do valor de SNR interusuários, vão se estabilizando, e mantendo quase o mesmo desempenho, mesmo para valores maiores de SNR no canal direto, o que deve-se ao valor limitante do SNR dessa transmissão interusuário no sistema como um todo.

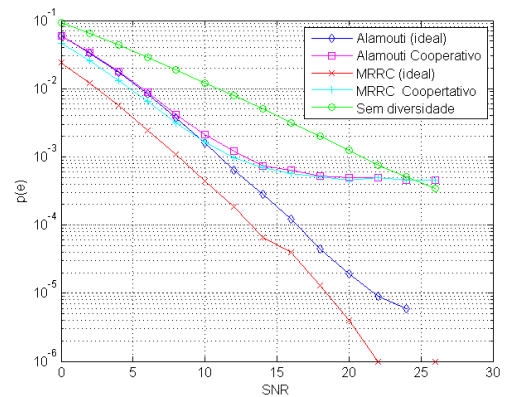


Fig. 5. Comparação entre as probabilidades de erro de bit para uma transmissão de 20 dB SNR nos canais interusuários.

Pode-se analisar também que o esquema de diversidade cooperativa com Alamouti tem um desempenho muito próximo ao Alamouti ideal, o que não ocorre tanto com o esquema de diversidade cooperativa com MRRC modificado e com o MRRC clássico, isso se ocorre devido as potências utilizadas

por cada antena durante os períodos de transmissão de cada esquema.

Pois embora ambos os esquemas de diversidade cooperativa apresentem um acréscimo de ruído provindo das retransmissões dos nós parceiros (o que não ocorre no esquema Clássico MIMO). No caso de Alamouti em sistemas MIMO, temos a transmissão para o receptor no primeiro instante ocorrer simultaneamente nas duas antenas transmissoras, limitando a potência de transmissão de cada antena a $P/2$.

O que não ocorre na diversidade cooperativa com Alamouti, uma vez que a mesma possui 3 períodos de transmissão, e os dois primeiros são realizados por uma antena de cada vez, possibilitando a potência de transmissão para os dois primeiros períodos para P em cada antena. E como esperado isso não ocorre com MRRC, ocorre o oposto, uma vez que se trabalha no MRRC ideal com a transmissão na Potência P , e no esquema proposto modificado, para o terceiro período de transmissão, se tem que trabalhar com $P/2$ em cada antena, para poder se manter a potência total transmitida por período de tempo em P .

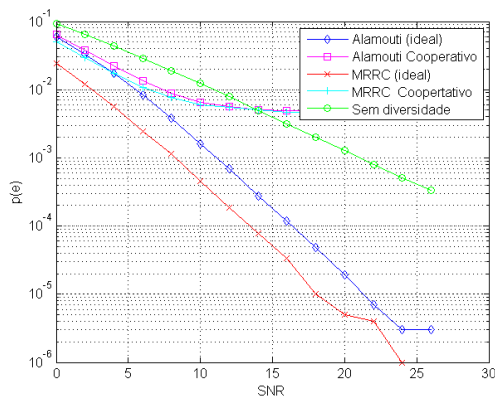


Fig. 6. Comparação entre as probabilidades de erro de bit para uma transmissão de 10 dB SNR nos canais interusuários.

Na Fig. 6, tem-se o mesmo esquema para uma transmissão considerando uma SNR interusuários de 10dB, o que torna ainda mais nítido o limitante do canal interusuário no bom rendimento desse sistema. Já para os resultados apresentados na Fig. 7 assume-se que a SNR interusuários é de 30 dB. Neste caso, os resultados obtidos em termos de $BER \times SNR$ se aproximam do esquema MIMO convencional, uma vez que a limitação imposta pelo canal interusuário é reduzida.

VIII. CONCLUSÕES

A abordagem de codificação espaço-temporal em redes cooperativa se mostrou de grande valia no combate às condições de propagação do canal rádio móvel, em sistemas que possuem transmissores muito pequenos e que não permitem a instalação de múltiplas antenas e operam em half-duplex.

Os resultados numéricos das simulação indicaram que o uso das técnicas propostas apresentam um ganho de desempenho nas taxas de erro comparados ao sistema sem diversidade como era de se imaginar. Foi observado que a qualidade da comunicação do canal interusuários tem influência direta e é

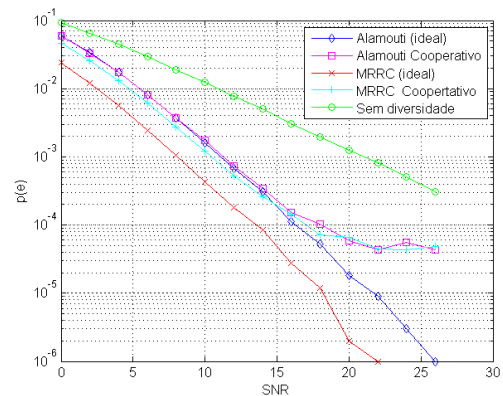


Fig. 7. Comparação entre as probabilidades de erro de bit para uma transmissão de 30 dB SNR nos canais interusuários

fator limitante no desempenho geral do sistema. Dessa forma, os desempenhos dos códigos de Alamouti e MRRC modificado cooperativos se tornam mais próximos de seus esquemas convencionais à medida que se tem melhores condições de comunicação no canal interusuários.

É relevante ressaltar que na avaliação de taxa de transmissão para as técnicas propostas, embora comparado ao sistema MIMO tem-se um acréscimo de um período (levando a diminuir a taxa de transmissão), comparado a rede cooperativa sem o uso dessas técnicas, se tem um ganho de um período. O que é algo de grande significância para o sistema de transmissão, aumentando e muito a taxa de transmissão, além disso parte das transmissões realizadas no sistema consomem metade da potência utilizada na transmissão de uma rede cooperativa sem as técnicas apresentadas, o que gera uma economia de energia.

REFERÊNCIAS

- [1] J. L. Rebelatto, *Codificação de Rede Baseada em Códigos Corretores de Erros Clássicos*. Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.
- [2] R. Machado, *Códigos Espaço-Temporais de Bloco com Seleção Híbrida Antena/Código na Transmissão*. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.
- [3] "S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," *IEEE Journal on Select Areas in Communications*, vol. 16, 1998.
- [4] Ma. P. Sousa, *Diversidade Cooperativa Adaptativa Aplicada a Redes de Sensores sem Fio*. Departamento de Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), 2009.
- [5] Á. R. C. Souza, "Wireless Cooperative Networks: Protocols, Topologies and Performance," *Seminário: Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina*, vol. 32, September 2011.
- [6] J. L. Rebelatto e B. F. Uchôa-Filho, "Codificação de Rede Aplicada a Rede Cooperativa com Múltiplo Acesso Simultâneo," *XXXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES*, 2013.
- [7] M. Hosseini e F.G. Talebi, "Alamouti Coding Scheme for Cooperative Relay Networks With Full Duplex Relaying," *Communication and Information Theory (IWCIT)*, pp.1-4, May 2013.
- [8] H.A. Suraweera e I. Krikidis, "Full-Duplex Cooperative Diversity With Alamouti Space-Time Code," *Wireless Communications Letters, IEEE*, vol.2, no.5, pp.519-522, October 2013.