

## AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO: MIMO X MIMO DISTRIBUÍDOS

**Leonardo Zavareze da Costa**

Aluno de Graduação do curso de Engenharia Elétrica - UFSM  
leonardozavareze@gmail.com

**Dimas Irion Alves**

Aluno de Graduação do curso de Engenharia Elétrica - UFSM  
dimasirion977@gmail.com

**Renato Machado**

Professor do curso de Engenharia Elétrica – UFSM  
renatomachado@ieee.org,

**Nelson Jorge Schuch**

Pesquisador Titular Sênior III – CRS/INPE – MCTI  
njschuch@lacsom.ufsm.br

**Resumo.** Este artigo apresenta uma avaliação para sistemas de comunicação MIMO e MIMO distribuídos. Os sistemas MIMO considerados foram: Alamouti e Combinação de Máxima Razão na Recepção (MRRC). Os sistemas cooperativos considerados foram os protocolos Amplifica-Encaminha (AF) e Decodifica-Encaminha Seletivo (SDF). São apresentados resultados avaliando a robustez e a relação custo-benefício dos sistemas.

**Palavras-chave:** Sistemas MIMO. Sistemas MIMO distribuídos. Diversidade.

### 1. INTRODUÇÃO

O conceito de diversidade explora o aumento da probabilidade de recepção correta de um símbolo, ocorrida quando o receptor recebe informações replicadas e decorrelacionadas. Existem diversas técnicas de diversidade como: diversidade temporal, espacial, em frequência e cooperativa (RAPPAPORT et al, 2009).

A possibilidade de explorar a diversidade espaço-temporal para transmissão de dados tem permitido o desenvolvimento de novos modelos para sistemas de comunicação. Sistemas como *Single-Input Single-Output* (SISO), *Single-Input Multiple-Output* (SIMO), *Multiple-Input Single-Output* (MISO) e *Multiple-Input Multiple-Output*

(MIMO) combinam diferentes sinais para encontrar a melhor maneira de realizar a transmissão de dados (GOLDSMITH et al, 2004).

Além da combinação de conjuntos de antenas, há ainda possibilidade de utilização de canais *relays*, pontos intermediários entre fonte-destino que auxiliam na transmissão dos dados (RAY LIU et al, 2009). Estes sistemas são denominados sistemas cooperativos ou sistemas MIMO distribuídos, devido ao conceito de diversidade cooperativa explorado por tais estratégias de comunicação.

Nos *relays*, pode-se realizar processamentos de sinais considerando o uso de certos protocolos. Os protocolos considerados neste trabalho são o Amplifica-Encaminha (AF) e Decodifica-Encaminha Seletivo (SDF).

### 2. MODELOS UTILIZADOS

A Fig.1 representa o modelo de sistema utilizado para os protocolos AF e SDF. Para os sistemas cooperativos, foram considerados as técnicas de transmissão TDMA (*Time Division Multiplexing Access*) e *Half-Duplex*, sendo utilizados  $N+1$  slots de tempo por símbolo transmitido (RAPPAPORT et al, 2009).

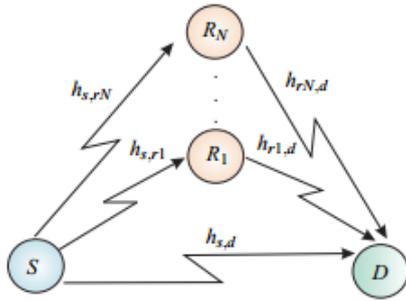


Fig. 1 – Modelo de sistema cooperativa utilizado para protocolos AF e SDF.

Os sinais recebidos pelo *relay* e destino no primeiro *slot* de tempo são definidos como:

$$y_{S,Ri} = \sqrt{P_1} s h_{S,Ri} + \eta_{S,Ri}, \quad (1)$$

$$y_{S,D} = \sqrt{P_1} s h_{S,D} + \eta_{S,D}, \quad (2)$$

em que,  $s$  é o sinal enviado,  $P$  é a potência de envio,  $h_{S,D}$  é o canal de desvanecimento entre fonte e o destino,  $h_{S,Ri}$  é o canal de desvanecimento entre fonte e o  $i$ -ésimo *relay*,  $n_{S,Ri}$  e  $n_{S,D}$  são os ruídos no receptor, no  $i$ -ésimo *relay* e no destino, respectivamente. Esses ruídos são definidos como uma variável aleatória (v.a.) complexa, que respeita a distribuição Gaussiana, com média zero e variância  $N_0$  (RAY LIU et al., 2009).

O sinal recebido pelo *relay* e destino no *slot* de tempo " $N+1$ " é definido como:

$$y_{Ri,D} = q(y_{S,Ri})h_{S,D} + \eta_{Ri,D}, \quad (3)$$

## 2.1 Protocolo AF

No protocolo AF, o *relay* amplifica o sinal  $s$  (incluindo o ruído) e o retransmite para o destino. Nele, o termo  $q(y_{S,Ri})$  da expressão (3) é alterado de modo que o sinal enviado pelo *relay* que utiliza protocolo AF é definido como:

$$y_{Ri,D} = \sqrt{\frac{P_1 P_i}{P |h_{S,Ri}|^2 + N_0}} y_{S,Ri} h_{Ri,D} + \eta_{R,D}, \quad (4)$$

em que,  $P_i$  é a potência alocada para o  $i$ -ésimo *relay* e o termo multiplicativo de  $y_{S,Ri}$  é

conhecido como fator de amplificação ( $\beta$ ) (RAY LIU et al., 2009).

## 2.2 Protocolo SDF

No protocolo SDF, se o canal fonte-*relay* está acima de um determinado *threshold*, o sinal é decodificado e encaminhado ao destino, caso contrário, o *relay* permanece inoperante. Utilizar esta verificação de *threshold* aumenta a confiabilidade da comunicação. A Equação (5) representa o sinal enviado pelo *relay* que utiliza o protocolo SDF (RAY LIU et al., 2009).

$$y_{Ri,D} = \sqrt{\hat{P}_i} s h_{Ri,D} + \eta_{Ri,D}, \quad (5)$$

em que,

$$\hat{P}_i = \begin{cases} P_i, & \text{se } P |h_{S,Ri}|^2 \geq \text{threshold}, \\ 0, & \text{se } P |h_{S,Ri}|^2 < \text{threshold}. \end{cases}$$

## 2.3 MRRC

O esquema de recepção MRRC consiste na combinação dos sinais recebidos por pelo menos duas antenas no receptor. As expressões (6) e (7) representam os sinais recebidos por cada uma das antenas separadamente e a expressão (8) representa o esquema de combinação no receptor MRRC. A Fig. 2 apresenta uma representação básica de modelos SIMO.

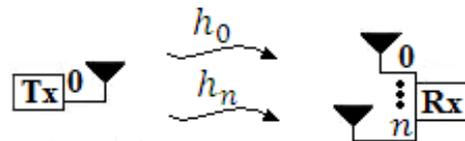


Fig. 2 – Esquema representativo para MRRC.

$$R_i = h_i s_i + \eta_i \quad (6)$$

em que  $i = 1, 2, \dots, n$ , e

$$\tilde{s}_0 = h_0^* (h_0 s_0 + \eta_0) + \dots + h_n^* (h_n s_n + \eta_n) \quad (7)$$

em que  $(.)_n$  representa os coeficientes para a  $n$ -ésima antena.

## 2.4 Alamouti

Para o esquema de Alamouti são utilizadas duas antenas transmissoras e dois *slots* de tempo para transmissão da informação. As antenas 0 e 1 enviam no primeiro *slot* de tempos sinais  $s_0$  e  $s_1$ , respectivamente. No seguinte *slot* de tempo,  $-s_1^*$  é enviado pela antena 0 e  $s_0^*$  é enviado pela antena 1, em que, \* representa o complexo conjugado do sinal. O sistema de Alamouti pode ser concatenado com diversos outros sistemas. A Fig. 3 apresenta uma representação básica do sistema de Alamouti concatenado com o MRRC (MACHADO et al, 2008).

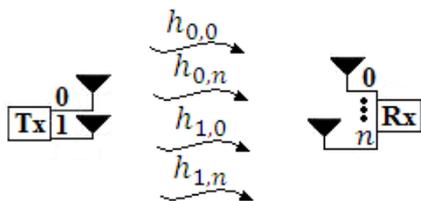


Fig. 3 – Esquema representativo para Alamouti

As Equações (9) e (10) representam o sinal recebido nos dois *slots* de tempo e as Equações (11) e (12) representam o processamento linear que o combinador dos sinais, em Rx, realiza, para o caso do receptor com uma antena.

$$r_0 = h_0 s_0 + h_1 s_1 + \eta_0 \quad (9)$$

$$r_1 = -h_0 s_1^* + h_1 s_0^* + \eta_1 \quad (10)$$

$$\tilde{s}_0 = h_0^* r_0 + r_1^* h_1 \quad (11)$$

$$\tilde{s}_1 = h_1^* r_0 - r_1^* h_0 \quad (12)$$

O processador em Rx, com (11) e (12), gera os sinais  $\tilde{s}_0$  e  $\tilde{s}_1$  que são então processados pelo Decodificador de Máxima Verossimilhança.

## 3. RESULTADOS

Nas simulações, considera-se o mapeamento de sinais em uma constelação QPSK. Os resultados foram adquiridos a partir de simulações do tipo Monte Carlo com transmissão de  $10^7$  símbolos e são expressos na forma de BER x SNR. Consideram-se que

os canais são descorrelacionados espacialmente e que os desvanecimentos são do tipo Rayleigh com variância unitária. O ruído é uma v.a. do tipo AWGN com variância unitária. (RAPPAPORT et al, 2009). Considera-se, também, que o receptor conhece os coeficientes dos canais. No caso do sistema Alamouti, os canais não variam durante a transmissão de dois símbolos consecutivos.

Para simulações com SDF, utilizou-se um valor de *threshold* igual a 8, comprovado ser o valor mais próximo do ideal (ver Fig. 4). A Fig. 5 apresenta a avaliação para os casos de diversidade 2 para os sistemas, ou seja, 1 *relay* (AF, SDF) duas antenas no transmissor e uma no receptor (Alamouti) e uma antena no transmissor e duas no receptor (MRRC).

A Fig. 6 apresenta a avaliação para os casos de diversidade 4 para os sistemas, ou seja, 3 *relays* (AF, SDF), duas antenas no transmissor e duas no receptor (Alamouti) e uma antena no transmissor e quatro no receptor (MRRC). Para o protocolo SDF ideal, considera-se que o *relay* sabe quando decodificou erroneamente a informação.

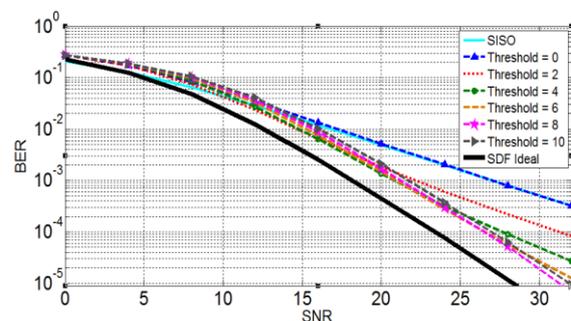


Fig. 4 – Avaliação de valores de *threshold* para protocolo SDF.

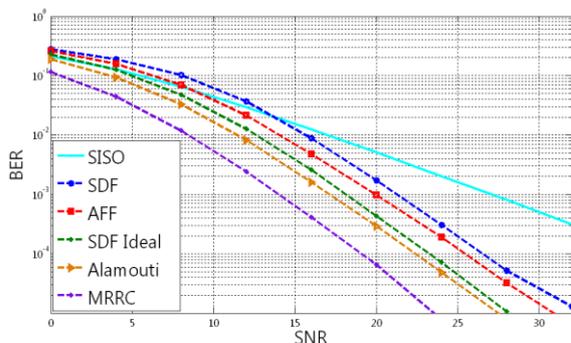


Fig. 5 – Comparação para o caso diversidade 2.

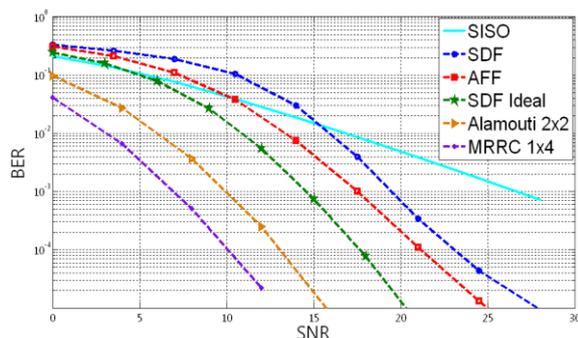


Fig. 6 - Comparação para o caso diversidade 4.

Como observado nas Fig. 5 e 6, o caso MRRC alcançou melhor desempenho, porém, este requer que sejam instaladas múltiplas antenas em pequenos dispositivos, o que dificulta que estas antenas estejam decorrelacionadas espacialmente.

O esquema de Alamouti obteve um desempenho 3dB inferior ao MRRC, entretanto, mesmo sendo mais aplicável visto a facilidade em instalar múltiplas antenas em transmissores sem sofrer com os problemas da correlação espacial de canais, o Alamouti apresenta os mesmos empecilhos que o MRRC para diversidade maior que 2 e um custo maior para a instalação das múltiplas antenas.

O protocolo SDF, por se tratar de um sistema MIMO distribuído, mostra-se uma escolha interessante para o sistema, desde que haja um processamento adequado do sinal, como, por exemplo, a utilização de códigos corretores de erros no *relay*, fazendo com que o resultado seja próximo do ideal. Se o processamento não for adequado, o sistema mostra-se inferior ao protocolo AF.

O protocolo AF mostra-se também uma solução interessante devido sua fácil implementação e reduzido custo.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para os modelos adotados no estudo, as simulações comprovaram as diferenças de resultados entre os sistemas Alamouti e MRRC e entre os protocolos AF e SDF. Utilizando o sistema MRRC, é possível obter um aumento significativo da derivada BER em relação ao SISO original. Porém, cabe ressaltar que é um sistema de maior

complexidade para instalação e maior custo. Assim, como no Alamouti, os problemas de correlação faz com que estes sistemas sejam menos viáveis de serem implementados com a utilização de protocolos (AF e SDF), por exemplo.

Entre os protocolos analisados, o SDF apresentou maior robustez. Para garantir os bons resultados deste protocolo, entretanto, necessita-se que seja realizado um processamento adequado dos sinais no *relay*. Para casos que necessitem de baixa complexidade e/ou baixo custo de implementação, o protocolo AF mostra-se uma boa escolha.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à comissão organizadora do XXV CRICTE - 2013 pela oportunidade de apresentação dos resultados deste trabalho.

## 4. REFERÊNCIAS

- RAY LIU, K.J.; SADEK, A.K.; SU, W.; KWASINSKI, A. Cooperative Communications and Networking. New York – EUA: Cambridge University Press, 2009.
- GOLDSMITH, A. Wireless Communications. Stanford University, 2004.
- RAPPAPORT, T. S. Comunicações sem fio: Princípios e Práticas. São Paulo – Brasil: Pearson Prentice Hall, 2009.
- MACHADO, R. **Códigos de dispersão linear e comunicação cooperativa em canais de comunicações sem fio com realimentação limitada.** Tese de doutorado, (Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2008. 120 p.