

Seleção de *Relays* em Esquemas Cooperativos com *Links* Bidirecionais - Uma Revisão

Relay Selection in Two-Way Cooperative Schemes - A Survey

Nathalia dos Santos Silva¹; Taufik Abrão²

Resumo

Neste trabalho são analisadas e comparadas as técnicas de seleção de *relays* em diferentes topologias, onde o objetivo do estudo é caracterizar cada método de acordo com seu desempenho. São usados *links* com canais bidirecionais para aumentar a eficiência espectral do sistema, e múltiplos *relays* combinados para aumentar a ordem de diversidade. As conclusões são feitas com base nas simulações dos diferentes cenários, mantendo o compromisso de comparar a complexidade envolvida nos cálculos de todos os métodos.

Paravras chave: Redes cooperativas. Amplifica e Transmite. Complexidade. Combinação por máxima razão. Máxima Verossimilhança.

Abstract

This paper analyses and compares *relay* selection schemes in different topologies, whose goal work is to characterize each method according to its performance. Links in two-way channels are used to increase spectral efficiency of the system, and multiple *relays* are combined to increase the diversity order. The conclusions are based on simulations in different scenarios, with the trade-off complexity versus performance in all the methods.

Keywords: Cooperative Networks. Amplify and Forward. Complexity. Maximum Ratio Combining. Maximum Likelihood.

¹ Mestre em Engenharia Elétrica e Graduada em Ciência da Computação, Universidade Estadual de Londrina; nssilva@ieee.org;

² Docente do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Estadual de Londrina - DEEL-UEL; taufik@uel.br

Introdução

Na busca por um melhor desempenho em termos de taxa de erro de bit (BER), probabilidade de *outage*¹ e otimização de recursos, há mais de uma década são usados retransmissores auxiliares nas redes sem fio, os chamados *relays* (SENDONARIS; ERKIP; AAZHANG, 2003a), (SENDONARIS; ERKIP; AAZHANG, 2003b), (LANEMAN; TSE; WORNELL, 2004), (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004).

É conhecido que quanto maior a quantidade desses *relays*, maior ordem de diversidade esse sistema alcança, e conseqüentemente maior chance de detectar o sinal corretamente ao final da transmissão. Entretanto, como esse aumento não é assintótico e tende a estabilizar, são as técnicas de seleção e combinação de *relay* que tornam a comunicação mais robusta e, ao mesmo tempo, o sistema factível (BLETSAS et al., 2006), (KRIKIDIS, 2010), (IBRAHIM et al., 2008), (LIU et al., 2009), (SILVA; ABRÃO; CIRIACO, 2013). A complexidade adicionada nesse processo é analisada, e também discutida neste trabalho.

A transmissão bidirecional, foco deste estudo, conhecida também por *two-way*, tem o objetivo de alcançar uma maior eficiência espectral, já que utiliza a mesma largura de banda no espectro para transmitir o dobro de informação que o modelo unidirecional ou *half-duplex* (JING, 2009), (NGUYEN; NGUYEN; LE-NGOC, 2011). Neste modelo a complexidade inserida se dá no momento da detecção do sinal, exigindo mais processamento no nó destino, como detalhado adiante.

Redes Cooperativas também tem sido implementadas em cenário *full-duplex*, apresentando bons resultados em termos de BER em altas SNR e com linha de visada (MACHADO; UCHOA FILHO; DUMAN, 2009).

A eficiência energética do sistema cooperativo, assim como em outras áreas, tem sido analisada pela sua importância no contexto de *green communication*, visando principalmente o melhor uso da capacidade energética da rede, de modo que os dispositivos tenham seu tempo de vida maximizado ao mesmo tempo que se garante os requisitos de QoS (SILVA, 2014).

Os padrões mais recentes de redes sem fio também tem utilizado os conceitos de *relays* nas redes cooperativas, já que com uma taxa de erro menor e um possível aumento na taxa de transferência de dados o sistema de comunicação fica mais robusto e confiável. É interessante citar o LTE (NAM et al., 2010) e o WiMAX (NIE et al., 2013).

Em seguida o trabalho é composto por mais cinco seções. Na segunda seção é descrito o modelo e os esquemas de saltos das redes sem fio usadas na simulação. Na terceira seção são apresentados os métodos de seleção de *relay* e suas formulações matemáticas. Na quarta seção, são apresentados e discutidos os resultados numéricos obtidos via simulação Monte Carlo. Na sexta e última seção, são encontradas as principais conclusões deste trabalho.

Modelo do Sistema

O cenário é composto por dois nós que se comunicam, inicialmente um primeiro nó fonte e um outro nó destino, auxiliados por um *relay* e posteriormente os dois nós atuando como fonte e destino simultaneamente, também auxiliados pelo *relay*. O canal escolhido não tem linha de visada e possui desvanecimento de larga e pequena escala, o primeiro modelado pela perda de percurso dada na equação 1, a equação de Friis:

$$Q_{ij} = \frac{G \lambda^2}{(4\pi)^2 d_{ij}^2} \cdot \frac{1}{L N_f} \quad (1)$$

¹ Situação em que o sistema não atingiu o requisito mínimo de taxas de erro ou de transferência, e é bloqueado naquele instante.

Essa equação determina que a antena utilizada para modelagem é uma antena ideal, ou um radiador isotrópico, isto é, ela irradia potência com ganho unitário uniformemente em todas as direções. A distância em metros entre os nós i e j envolvidos na transmissão é representado por d , $\lambda = 3 \cdot 10^8 / f_c$ é o comprimento de onda da portadora metros, f_c é a frequência da portadora, dado em Hertz, L é o link marginal e N_f é a Figura de ruído do receptor, que depende da frequência e do amplificador de baixo ruído (LNA). Em um cenário LOS (com linha de visada direta), o expoente da *perda de percurso* é $\nu = 2$, e este valor varia conforme as condições de densidade de construções no ambiente, por exemplo, em um cenário conhecido como *Manhattan*, denso ao máximo, $\nu = 7$. O ganho combinado entre as antenas de transmissão e recepção é $G = G_{tx} G_{rx}$.

O desvanecimento de pequena escala é decorrente do multipercurso, que afeta a amplitude do sinal seguindo a distribuição *Rayleigh* com média 0 e variância unitária, dado por h_{ij} , onde i e j podem ser nó emissor, *relay* e receptor.

Os nós envolvidos no processo possuem restrições de processamento e de consumo de energia, como essas duas características são muito comuns aos diversos sistemas de transmissão por meio não guiado, as aplicações dos conceitos deste trabalho podem ser estendidas para outros esquemas celulares e redes *ad hoc*.

Os *relays* estão dispostos de maneira aleatória na região de um círculo de diâmetro d , entre o transmissor e o receptor², esta disposição é ilustrada na Figura 1.

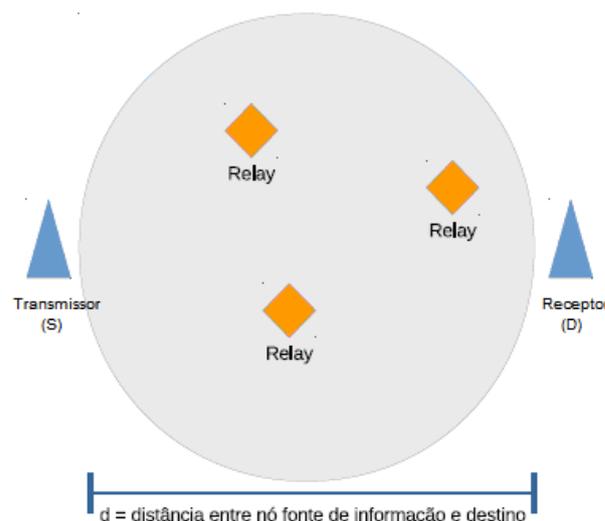
O conjunto A engloba todos os *relays* disponíveis para auxiliar na retransmissão.

Um subconjunto $C \in A$, é o conjunto de *relays* escolhidos no mesmo *hop* (salto), com o objetivo de obter diversidade.

O processo de transmissão é dividido em time slots, considerando que o *relay* não está habilitado para transmitir e receber informação ao mesmo

tempo. O *relay* conhece sua condição de canal e o destino conhece a condição de todos os canais.

Figura 1 - relays na área de cobertura, conjunto $A = 3$.



Fonte: os autores

Topologias de Rede

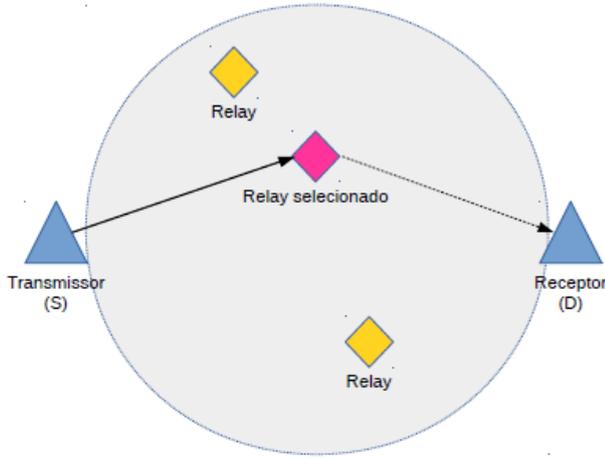
Com o objetivo de analisar o comportamento da taxa de erro dos sistemas em função da variação do número de *relays* e da disposição dos mesmos é que essa seção apresenta as diferentes topologias.

Sabe-se que com mais *relays* combinados para retransmitir simultaneamente, obtém-se maior ordem de diversidade e conseqüentemente menor taxa de erro de bit (BER), em decorrência do principal conceito de redes cooperativas, já que, observando estatisticamente os efeitos de multipercurso, é menos provável que os diversos percursos utilizados estejam todos profundamente desvanecidos.

Seleção de Relay

Single relay (SR) Selection, é a configuração mais simples de seleção de *relays* em redes cooperativas (BLETSAS et al., 2006), (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004), com 1 *relay* escolhido para atuar no percurso com 1 hop, formando 1 *link* entre emissor e receptor, como ilustrado na Figura.

Figura 2 - Cenário cooperativo - escolha de um *relay* dentre os a disponíveis.



Fonte: os autores

No primeiro slot de tempo a informação é enviada pela fonte e recebida nos a *relays* disponíveis no sistema, a informação que o *i*-ésimo *relay* recebe é:

$$r_i = \sqrt{P} \varrho_{si} h_{si} b + \eta_i \quad (2)$$

sendo P a potência de transmissão do nó fonte, ϱ_{si} o efeito da perda de percurso entre o percurso de s à i , h_{si} o coeficiente de canal entre s e i que pode ser descrito também como $h_{si} = |h_{si}| e^{j\theta_{ij}}$, sendo θ_{ij} a fase de h_{si} , η_i o ruído aditivo gaussiano no *i*-ésimo *relay*, com média zero e variância σ^2 , b a informação de um conjunto de M símbolos considerando modulação M-QAM.

O *i*-ésimo *relay* é escolhido através de um dos métodos de seleção, descritos na próxima seção. Considerando que o *i*-ésimo *relay* foi escolhido e que ele tem conhecimento do estado de canal, ele cancela o efeito da fase no sinal recebido:

$$\tilde{r}_i = r_i \cdot e^{-j\theta_{si}} = r_i \frac{h_{si}^*}{h_{si}} \quad (3)$$

Para retransmitir a informação, o *relay* amplifica o sinal através de um coeficiente α_i

$$\alpha_i = \kappa_i \cdot \frac{\sqrt{P_i}}{\sqrt{P \varrho_{si} |h_{si}|^2 + P_n}} \quad (4)$$

Consequentemente, amplifica o ruído também, e embora esta é uma desvantagem do protocolo AF, ele é um método muito utilizado na literatura (SENDONARIS; ERKIP; AAZHANG, 2003a), (JING, 2009), (NOSRATINIA; HUNTER; HEDAYAT, 2004), devido à sua simplicidade.

A variável binária κ_i indica se o *relay* transmitiu ($\kappa_i = 1$) ou não ($\kappa_i = 0$). É considerado que o *relay* transmite com potência P_i ou não transmite.

O sinal é enviado pelo *relay* e recebido no destino:

$$r_d = \alpha_i \tilde{r}_i \cdot \sqrt{\varrho_{id}} h_{id} + \eta_d \quad (5)$$

Sendo η_d o ruído no destino com distribuição gaussiana, média zero e variância σ_2 . No destino também é feita o cancelamento dos efeitos da fase com perfeita estimação de canal:

$$y = r_d \cdot e^{-j\theta_{id}} = r_d \frac{h_{id}^*}{h_{id}} \quad (6)$$

A informação é estimada através do princípio da Máxima Verossimilhança, (*Maximum Likelihood* - ML), é calculada a distância euclidiana representada por $|\cdot|$ entre o sinal recebido e todos os possíveis símbolos do conjunto da constelação S usada :

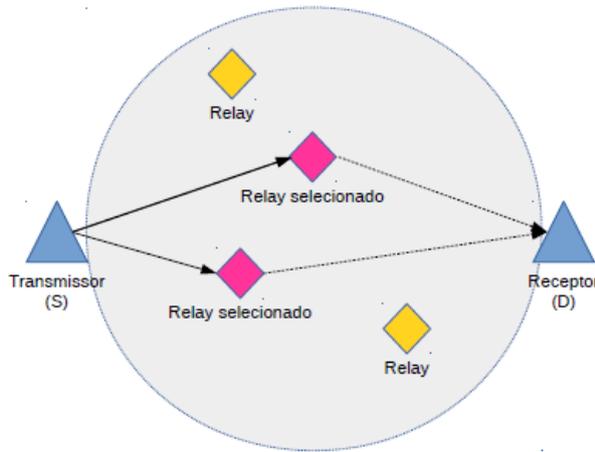
$$\hat{b} = \arg \min_{b \in S} \|y - \kappa_i |h_{id}| \sqrt{P_i \varrho_{id}} b\| \quad (7)$$

Seleção de Múltiplos Relays

Multiple relay (MR) Selection é uma estrutura de transmissão que tem por objetivo explorar a ordem de diversidade do sistema, impactando positivamente no desempenho em termos de BER.

O grupo de c relays selecionados para cooperar em paralelo, cada um criando um *link* adicional entre fonte e destino, forma o conjunto $\mathbf{C} \in \mathbf{A}$, esse esquema está ilustrado na Figura 3. Esse sistema exige c slots de tempo, uma para cada *relay*, para receber a informação da fonte e retransmiti-la ao destino.

Figura 3 - Combinação de múltiplos *relays* selecionados



Fonte: os autores

Inicialmente a transmissão de fonte para os *relays* tem a mesma descrição da equação (2). Posteriormente o *relays* cancelam a fase como na equação (3), amplificam o sinal pelo coeficiente α_i calculado como na equação (4), e retransmitem o sinal em um intervalo de tempo definido como $t \propto \gamma_{si}^{-1}$, para todos os *relays* $t = 1, 2, \dots, c$.

Assim, o sinal recebido no destino são as cópias do sinal original enviadas por cada *relay*:

$$r_{id} = \alpha_i \tilde{r}_i \cdot \sqrt{Q_{id}} h_{id} + \eta_d, \quad i \in \mathbf{C} \quad (8)$$

O destino possui todas as informações de estado de canal e pode cancelar o efeito de fase das cópias que chegaram até ele:

$$y_i = r_{id} \cdot e^{-j\theta_{id}} = r_{id} \frac{h_{id}^*}{h_{id}}, \quad i \in \mathbf{C} \quad (9)$$

Para tirar proveito da diversidade inserida pelos vários percursos é essencial combinar as cópias de forma coerente, isto é, ponderando as cópias de acordo com a energia que este sinal possui.

O fator ι_i expressa que quanto mais energia a i -ésima cópia possui, maior deve ser o peso atribuído a ela na combinação do sinal:

$$\iota_i = \frac{|\sqrt{P_i Q_{id}} h_{id}|}{\sqrt{\sum_{i=1, i \in \mathbf{C}} |\sqrt{P_i Q_{id}} h_{id}|^2}} \quad (10)$$

este fator ι_i deve ser normalizado para $\sum_{i=1}^c \iota_i = 1$, e então usado na combinação final:

$$y = \sum_{i=1, i \in \mathbf{C}} y_i \cdot \iota_i \quad (11)$$

O sinal então pode ser estimado pelo ML através da equação:

$$\hat{b} = \arg \min_{b \in \mathbf{S}} \|y - \sum_{i=1, i \in \mathbf{C}} \kappa_i \cdot |h_{id}| \sqrt{P_i Q_{id}} b\| \quad (12)$$

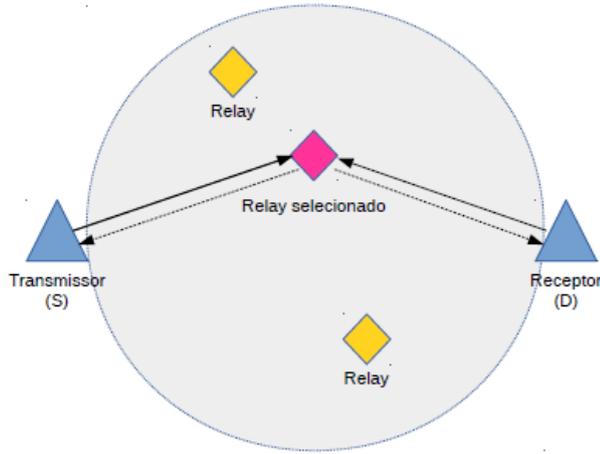
Modelo de Transmissão Bidirecional (*Two-Way*)

A transmissão bidirecional tem o objetivo de alcançar uma maior eficiência energética, aproveitando a mesma largura de banda no espectro

para transmitir o dobro de informação que o modelo unidirecional ou *half-duplex* (JING, 2009).

O mesmo relay usado anteriormente que não está habilitado para receber e enviar mensagens simultaneamente pode receber informação de duas fontes distintas e, em um *slot* de tempo seguinte, retransmitir a soma das informações para as duas fontes, estas atuando como receptoras agora.

Figura 4 - Seleção de relay com link bidirecional



Fonte: os autores

A principal diferença desse esquema de transmissão para o anterior que tinha um nó fonte e um nó destino é que agora os dois nós vão trocar informação através do *relay*, mostrado na Figura 4.

Considerando P_1 e P_2 a potência de transmissão do primeiro e do segundo usuário, respectivamente, b_1 e b_2 o símbolo enviado por eles, η_i o ruído aditivo branco gaussiano com média zero e variância σ_2 no i -ésimo *relay*, h_{1i} e h_{2i} o coeficiente de canal entre o usuário 1 e o i -ésimo *relay*, e entre o usuário 2 e o i -ésimo *relay*, respectivamente, q_{1i} e q_{2i} a perda de percurso entre o usuário 1 e o i -ésimo *relay* e entre o usuário 2 e o i -ésimo *relay*, respectivamente, assim, o sinal recebido no relay no primeiro *slot* de tempo é dado por:

$$r_i = \sqrt{P_1 q_{1i}} h_{1i} b_1 + \sqrt{P_2 q_{2i}} h_{2i} b_2 + \eta_i \quad (13)$$

O *relay*, que tem informações do seu estado de canal até o usuário 1 e 2, cancela os efeitos da fase e amplifica o sinal de acordo com as seguintes informações:

$$\tilde{r}_i = r_i \cdot e^{-j(\theta_{1i} + \theta_{2i})} \quad (14)$$

$$\alpha_i = \kappa_i \cdot \frac{\sqrt{P_i}}{\sqrt{P_1 q_{1i} |h_{1i}|^2 + P_2 q_{2i} |h_{2i}|^2 + P_n}} \quad (15)$$

Sendo P_i a potência de transmissão do relay e P_n a potência de ruído, θ_{1i} a fase de h_{1i} e θ_{2i} a fase de h_{2i} .

O sinal é enviado pelo *relay* e recebido no usuário 1 como expresso na equação (16), e recebido no usuário 2 como expresso na equação (17):

$$r_1 = \alpha_i \tilde{r}_i \cdot \sqrt{q_{1i}} h_{1i} + \eta_1 \quad (16)$$

$$r_2 = \alpha_i \tilde{r}_i \cdot \sqrt{q_{2i}} h_{2i} + \eta_2 \quad (17)$$

sendo η_1 e η_2 os ruídos com distribuição gaussiana, média zero e variância σ^2 no usuário 1 e 2 respectivamente.

Em cada destino é possível fazer o cancelamento da própria interferência:

$$y_1 = \underbrace{\sqrt{P_1 q_{1i} |h_{1i}|^2} e^{-j\theta_{2i}} e^{j\theta_{1i}} b_1 \alpha_i}_{\text{própria interferência}} + \underbrace{\sqrt{P_2 q_{1i} q_{2i} |h_{1i}| |h_{2i}|} b_2 \alpha_i}_{\text{sinal de interesse}} + \underbrace{\eta_i \sqrt{q_{1i} |h_{1i}|} e^{-j\theta_{2i}} \alpha_i + \eta_1}_{\text{ruído}} \quad (18)$$

$$y_1 = \underbrace{\sqrt{P_1 q_{1i} q_{2i} |h_{1i}| |h_{2i}|} b_1 \alpha_i}_{\text{sinal de interesse}} + \underbrace{\sqrt{P_2 q_{2i} |h_{2i}|^2} e^{-j\theta_{1i}} e^{j\theta_{2i}} b_2 \alpha_i}_{\text{própria interferência}} + \underbrace{\eta_i \sqrt{q_{2i} |h_{2i}|} e^{-j\theta_{1i}} \alpha_i + \eta_2}_{\text{ruído}} \quad (19)$$

A informação é estimada através do ML:

$$\hat{b}_2 = \arg \min_{b_2 \in S} \|y_1 - \kappa_i \alpha_i |h_{1i}| |h_{2i}| \sqrt{P_1 Q_{1i} Q_{2i}} b_2\| \quad (20)$$

$$\hat{b}_1 = \arg \min_{b_1 \in S} \|y_2 - \kappa_i \alpha_i |h_{1i}| |h_{2i}| \sqrt{P_2 Q_{1i} Q_{2i}} b_1\| \quad (21)$$

A SNR deste modelo é dada por γ_1 para o usuário 1 e γ_2 para o usuário 2:

$$\gamma_1 = \frac{P_2 P_i Q_{1i} Q_{2i} |h_{1i}|^2 |h_{2i}|^2}{P_n Q_{1i} |h_{1i}|^2 (P_i + P_1) + P_n P_2 Q_{2i} |h_{2i}|^2 + P_n^2} \quad (22)$$

$$\gamma_2 = \frac{P_1 P_i Q_{1i} Q_{2i} |h_{1i}|^2 |h_{2i}|^2}{P_n Q_{2i} |h_{2i}|^2 (P_i + P_2) + P_n P_1 Q_{1i} |h_{1i}|^2 + P_n^2} \quad (23)$$

Métodos de Seleção de Relays

Uma escolha mais imediata economiza processamento, mas não pode garantir uma maior SNR no destino, já uma escolha mais elaborada, pode contribuir diminuindo a taxa de erro, ou aumentando a vazão do sistema, ao custo de um processamento mais complexo e demorado. Esta escolha faz parte do gerenciamento da rede e é uma importante parte no projeto dos protocolos da camada MAC (ESCRIG, 2010).

Então, em geral os métodos podem ser classificados em escolhas instantâneas e melhores escolhas.

Quando se trata de economia de energia gasta na transmissão e/ou no processamento, é preciso analisar quanto existe de consumo entre as potências de circuito com a rede em repouso, em processo de escolha do *relay* e em transmissão. As soluções para otimização de energia devem ser impactantes na soma geral das potências para ser relevante sua implementação, sem interferir negativamente na qualidade de rede.

Da mesma forma, o aumento de complexidade inerente às técnicas que fazem uma busca exaustiva

nos *relays* procurando o melhor coeficiente de canal, é justificada se houver um aumento considerável nos quesitos de qualidade.

Os métodos de seleção de *relay* possuem a ordem de diversidade como característica em sua BER, é o que mostra de forma imediata como é o comportamento assintótico da taxa de erro dos métodos em relação ao aumento do número de *relays* disponíveis, em altas taxas de SNR.

Seleção Aleatória

O método mais simples de escolher o *relay* para retransmissão é de forma aleatória, conhecido como *Random relay Selection* (R-RS), a implementação é feita com uma lista de *relays* disponíveis e para a i -ésima transmissão ou o i -ésimo intervalo de tempo, é escolhido o i -ésimo *relay* da lista. Por simplificação, é admitido que o nó destino tenha conhecimento dos *relays* disponíveis através das mensagens ACK entre eles.

Esse método não faz nenhuma verificação quanto ao canal do *relay* escolhido, ou quanto à sua localização, podendo escolher um *relay* com uma SNR melhor, igual ou pior do que a transmissão não cooperativa, por isso seu desempenho é marginal, mesmo aumentando o número de *relays* sua ordem de diversidade permanece igual a 1.

Em alguns casos, considerando a sua localização, se o *relay* estiver muito longe de um dos nós, a potência usada para transmissão é muito maior que o normal, já que esta aumenta proporcionalmente ao quadrado da distância entre os nós envolvidos.

Por outro lado, como os *relays* tem a mesma probabilidade de serem escolhidos, a premissa desse método é de que os *relays* retransmitam em um mesmo número de vezes entre eles, fazendo com que a energia de todos eles diminuam igual e lentamente, evitando que um determinado *relay* com privilégio na condição de canal tenha a bateria esgotada e determine o fim da rede.

Seleção Oportunista

Esse é o algoritmo mais simples da literatura no escopo de escolhas elaboradas, que considera somente o canal do segundo *slot* de tempo para a seleção do retransmissor. A escolha consiste em aguardar a mensagem de confirmação do *relay* por um tempo t inversamente proporcional ao ganho de canal deste:

$$t \propto \frac{1}{Q_{id}|h_{id}|} \quad (24)$$

Para as transmissões em *two-way* o método oportunista não se aplica, porque para cada usuário final seria escolhido um *relay* diferente.

O nó destino envia um pedido ACK aos *relays*, estes respondem e o nó destino pode estimar a condição de cada canal e escolher o *relay* de forma oportunista, buscando o *relay* que possui, pelo menos, boa condição de canal neste trecho do caminho.

A principal desvantagem da rede é escolher sempre o *relay* privilegiado quando ao canal com o destino final, sobrecarregando este *relay* e comprometendo o tempo de vida da rede.

Os resultados do método oportunista não estão no trabalho porque este não é considerado um método ótimo de escolha de *relays*, dado que ele só os compara quanto às condições do canal até o destino.

Seleção por Maior Média Harmônica

O método de maior média harmônica, (*Maximum Harmonic Mean relay Selection*, MHM-RS), considera todos os trechos da transmissão para escolher o *relay*, diferente do método oportunista que só considera o caminho entre *relay* e destino ou do método aleatório que não considera nenhuma condição de canal.

É calculada a média harmônica entre os coeficientes de canal do primeiro trecho: nó fonte - i -ésimo *relay*, representado por h_{si} e do segundo trecho: i -ésimo *relay* - destino, representado por h_{id} para todos os i *relays* disponíveis, e é escolhido o *relay* com maior média na comparação.

A definição para o cálculo da média harmônica para números reais é o número de elementos dividido pela soma do inverso dos elementos.

A média harmônica de dois elementos é dada por: $H(u,v) = (2uv)/(u+v)$, então, para a transmissão utilizando um *relay* a média harmônica é dada por:

$$H(P_{Q_{si}}|h_{si}|^2, P_{iQ_{id}}|h_{id}|^2) = \frac{P_{Q_{si}}|h_{si}|^2 \cdot P_{iQ_{id}}|h_{id}|^2}{P_{Q_{si}}|h_{si}|^2 + P_{iQ_{id}}|h_{id}|^2} \quad (25)$$

E o k -ésimo *relay*, escolhido se este possuir a maior média harmônica é:

$$k = \arg \max_{i \in A} H(P_{Q_{si}}|h_{si}|^2, P_{iQ_{id}}|h_{id}|^2) \quad (26)$$

Para os casos em que há interesse em aumentar a diversidade do sistema são escolhidos mais *relays*, formando o conjunto $C \in A$ com os c *relays* cooperando na retransmissão da mesma informação para uma combinação coerente no destino. Desta forma, são escolhidos os c *relays* com a maior média harmônica e a equação (26) mostra como é a seleção para $c = 2$:

$$[c_1, c_2] = \arg \max_{i \in A} H(P_{Q_{si}}|h_{si}|^2, P_{iQ_{id}}|h_{id}|^2) \quad (27)$$

sendo $i = 1$ o *relay* com maior H calculado, $i = 2$ o segundo maior e sucessivamente quando houver mais *relays* escolhidos.

Para a transmissão *two-way* o método é calculado da mesma forma, com as características da transmissão bidirecional

$$H(P_1 Q_{1i} |h_{1i}|^2, P_2 Q_{2i} |h_{2i}|^2) = \frac{P_1 Q_{1i} |h_{1i}|^2 \cdot P_2 Q_{2i} |h_{2i}|}{P_1 Q_{1i} |h_{1i}|^2 + P_2 Q_{2i} |h_{2i}|} \quad (28)$$

E o processo de escolha é análogo.

Esse método MHM-RS possui ordem de diversidade máxima, isto é $D = a$, ressaltando que a é o número de *relays* disponíveis formando o conjunto \mathbf{A} para seleção. Esse método evita selecionar os *relays* que possuem disparidades entre os coeficientes de canais.

Seleção por Maximização do Pior Canal

Conhecido como *Max Min* ou (*Best Worst relay Selection*, BW-RS), o critério de maximização do pior canal seleciona o *relay* através de uma comparação entre seus percursos, como no critério da média harmônica.

É feita uma busca em cada *relay* selecionando qual a pior parte do percurso: transmissor - *relay* ou *relay* - receptor, e então é comparada a pior parte do percurso de cada *relay*, com a pior parte dos demais. É escolhido o *relay* com o melhor dos piores trechos, garantindo que a outra parte do percurso será necessariamente melhor que a escolhida, e consequentemente, melhor que as demais.

Esse método exclui os *relays* que possuem um trecho de transmissão com coeficiente de canal muito ruim, e também o *relay* que tivesse ambos os trechos em ruim estado.

A decisão de escolher o k -ésimo *relay* é:

$$k = \arg \max_{i \in \mathbf{A}} \min(P_{Q_{si}} |h_{si}|^2, P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2) \quad (29)$$

De forma semelhante, ao escolher mais *relays* para serem combinados os sinais no destino, obtém-se maior ordem de diversidade. Para o caso de $c=2$ *relays* no conjunto \mathbf{C} , a expressão é:

$$[c_1, c_2] = \arg \max_{i \in \mathbf{A}} \min(P_{Q_{si}} |h_{si}|^2, P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2) \quad (30)$$

sendo $i = 1$ o *relay* com maior H calculado, $i = 2$ o segundo maior e sucessivamente quando houver mais *relays* escolhidos.

Para a transmissão *two-way* a seleção é dada por:

$$k = \arg \max_{i \in \mathbf{A}} \min(P_1 Q_{1i} |h_{1i}|^2, P_2 Q_{2i} |h_{2i}|^2) \quad (31)$$

Esse método também atinge ordem de diversidade máxima em SNR assintótica.

Seleção por Maior Média Generalizada

A seleção por maior média generalizada, (*Maximum Generalized Mean relay Selection*, MGM-RS) é um critério que pode ser adaptado para o MHM-RS e para o BW-RS, através da alteração dos parâmetros p , w_1 e w_2 da expressão, sendo que $w_2 = 1 - w_1$ e $w_1 \in [0,1]$. Os pesos w_1 e w_2 são referentes aos canais entre transmissor e *relay*, e *relay* e destino, respectivamente.

O k -ésimo *relay* selecionado é dado por:

$$k = \arg \max_{i \in \mathbf{A}} \mu_{p, w_x}(P_{Q_{si}} |h_{si}|^2, P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2) \quad (32)$$

$$\text{sendo: } \mu_{p, w_x}(u, v) = [(w_1 u)^p + (w_2 v)^p]^{\frac{1}{p}}$$

Os valores que tornam o MGM-RS equivalente ao MHM-RS é $w_1 = w_2 = 0.5$ e $p = -1$. Em relação ao BW-RS, o valor do parâmetro é $p = -\infty$.

Análogo ao método MHM-RS, quando são selecionados 2 *relays* ou mais, são os *relays* com as maiores médias generalizadas:

$$[c_1, c_2] = \arg \max_{i \in \mathbf{A}} \mu_{p, w_x}(P_{Q_{si}} |h_{si}|^2, P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2) \quad (33)$$

sendo $i = 1$ o *relay* com maior H calculado, $i = 2$ o segundo maior e sucessivamente quando houver mais *relays* escolhidos.

Para a transmissão *two-way* a seleção é dada por:

$$k = \arg \max_{i \in A} \mu_{p, w_x} (P_1 Q_{1i} |h_{1i}|^2, P_2 Q_{2i} |h_{2i}|^2) \quad (34)$$

O método MGM-RS possui os mesmos resultados dos métodos MHM-RS e BW-RS, assim, a ordem de diversidade também é a máxima.

Seleção por Maior SNR

O método mais conceitual para seleção de *relay* é a SNR final, já que o objetivo de todos os métodos de escolha é obter um *relay* ou um conjunto deles que atinja uma maior SNR mesmo, assim, esse método também possui ordem de diversidade máxima. O k -ésimo *relay* escolhido é:

$$k = \arg \max_{i \in A} \frac{P_{Q_{si}} |h_{si}|^2 \cdot P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2}{P_{Q_{si}} |h_{si}|^2 + P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2 + P_n} \quad (35)$$

Para escolher mais *relays* e obter diversidade adicional, é análogo aos métodos anteriores:

$$[c_1, c_2] = \arg \max_{i \in A} \frac{P_{Q_{si}} |h_{si}|^2 \cdot P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2}{P_{Q_{si}} |h_{si}|^2 + P_{i Q_{id}} |h_{id}|^2 + P_n} \quad (36)$$

Para o modelo *two-way* o melhor *relay* é:

$$k = \arg \max_{i \in A} \min(\gamma_1, \gamma_2) \quad (37)$$

sendo, γ_1 e γ_2 definidos pelas equações (22) e (23) respectivamente.

Este método também alcança ordem de diversidade máxima em relação à confiabilidade

medida pela BER, assim, exceto no método de seleção aleatória, todos os métodos apresentados até então possuem o conceito de B-RS, isto é, selecionando o melhor *relay* após todas as comparações envolvidas.

Complexidade

Os algoritmos estão sendo comparados quanto ao desempenho pela ordem de diversidade, a avaliação da complexidade é importante pelo compromisso de não sobrecarregar a *hardware* e por isso tem uma sessão especial no trabalho.

Os algoritmos foram analisados quanto à quantidade e tipo de operações. As operações foram decompostas em operações básicas, operações de comparação e operações exponenciais, (KNUTH, 1981) de forma geral estas são as operações mais presentes nos métodos e as operações que os diferenciam.

Para a análise do comportamento da complexidade dos algoritmos foram consideradas variações no número de *relays* disponíveis a , e esse comportamento foi apresentado na Tabela 1 referente à quantidade de operações, da mesma forma, para simplificar a análise em termos de operações e comparar os métodos graficamente, estas foram somadas e comparadas em sua totalidade por método de seleção, como pode ser observado na Figura 5.

Tabela 1 - Complexidade dos métodos de seleção em termos de operações

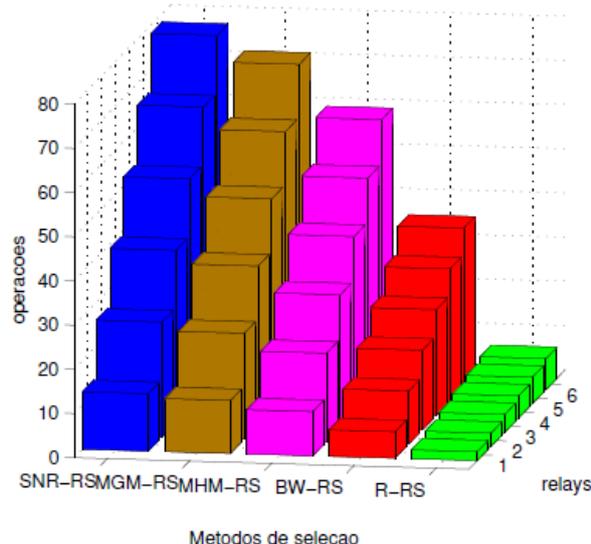
Métodos	Quantidade de operações
R - RS	$a + 1$ básicas
MHM - RS	$9 a$ básicas + a comparações
BW - RS	$4 a$ básicas + $2 a$ comparações
SNR - RS	$12 a$ básicas + a comparações
MGM - RS	$8 a$ básicas + a comp. + $3 a$ exponenciais

Fonte: os autores

Em geral os métodos possuem complexidade elevada por verificar os coeficientes de canal de todos os *relays* e compará-los, como em uma busca exaustiva. O algoritmo com menor complexidade,

como consta na literatura e na motivação inicial para o próprio, é o método aleatório, já que não faz nenhuma verificação.

Figura 5 - Complexidade dos métodos de seleção de relays em número total de operações



Fonte: os autores

Em relação à quantidade de operação dos métodos que buscam melhor ordem de diversidade d , destaca-se o BW que faz o mínimo de cálculos para escolher o relay. Suas operações de comparação podem ser consideradas de mesmo custo que operações básicas, dependendo do hardware escolhido.

O método MGM, independente do parâmetro adotado possui um grande número de operações, principalmente exponenciais, e o método SNR possui muitas operações básicas, por esse motivo esses métodos são os menos indicados para aplicações como as redes sem fio, elas requerem um esforço maior do hardware.

Resultados

Com o objetivo de mostrar a relação desempenho x complexidade dos métodos essa seção adotou diversos cenários e esquemas de transmissão, todos os descritos nas seções anteriores.

Nas primeiras simulações através de Método Monte Carlo foram adotados os parâmetros descritos na Tabela 2, típicos de uma rede com aplicação real.

Os cenários adotados para simulação compreendem situações de seleção de relays, variando o número de relays disponíveis e selecionados e o tipo de transmissão.

A potência usada é a mínima para percorrer o caminho da transmissão, no caso do nó fonte, a potência é a mínima para vencer a perda de percurso até o destino, e no caso do nó relay, é a mínima para vencer a perda de percurso da metade da distância entre nó fonte e destino (aproximação à distância dos relays distribuídos no cenário).

Exemplo: $\gamma P_n Q_{sd}^{-1}$ é o necessário entre os nós fonte e destino, e $P_i = \gamma P_n Q^{*-1}$, onde * é aproximado para $d_{sd}/2$.

Tabela 2 - Parâmetros de simulação para o esquema SR

Parâmetro	Valor
Protocolo de cooperação	AF
relays disponíveis	$a = 2, 4, 6$ e 30
relays selecionados	$c = 1$
v	3
$G = G_{tx} G_{rx}$	12 dB
C	8 dB
N_f	5 dB
Frequência da portadora	$f_c = 900$ e 1800 MHz
Distância S-D	$d = 50$ m
Distância S-R e R-D ³	$d_{sb}, d_{id} \in [2; 48]$ m
Densidade espectral do ruído	-174 dBm/Hz
Largura de banda	30 kHz
SNR média	$\gamma \in [0; 18]$
Potência do nó fonte (fixa)	$P = \gamma P_n Q_{sd}^{-1}$
Potência do relay (fixa)	$P_i = \gamma P_n Q^{*-1}$
Modulação	BPSK

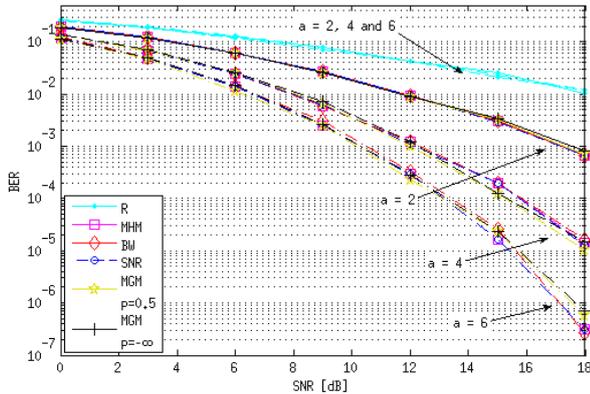
Fonte: os autores

O primeiro resultado, apontado pela Figura 6, reproduz um conceito conhecido na literatura, o de ordem de diversidade, também discutido neste trabalho.

É possível verificar como exemplo de cálculo, a curva em bege com marcador estrela, representando o método MGM com parâmetro $p = -0,5$ quando $a = 2$. A variação no eixo y do gráfico é de 6 décimos de década em logaritmo, e no eixo x de 3 pontos

de SNR em dB, assim, a ordem é $D = 6/3 = 2$, o esperando quando se tem 2 relays disponíveis para retransmissão.

Figura 6 - BER x SNR para topologia SR; $a = [2; 4; 6]$ e $c = 1$.



Fonte: os autores

Quanto aos métodos que são caracterizados por fazer uma escolha inteligente, estes atingem a ordem de diversidade teórica $D = a$ também em cenários bem realistas, como o simulado, que tem efeito da *perda de percurso*, economia de potência, densidade espectral de ruído com valor real e níveis de SNR alcançáveis, o que corrobora a intenção de utilizar técnicas de seleção de relays em redes físicas comuns e até com características modestas.

Essa ordem de diversidade teórica é alcançada até $a = 6$ em média, depois disso a variação na inclinação da curva tende a estabilizar e não evoluir mais.

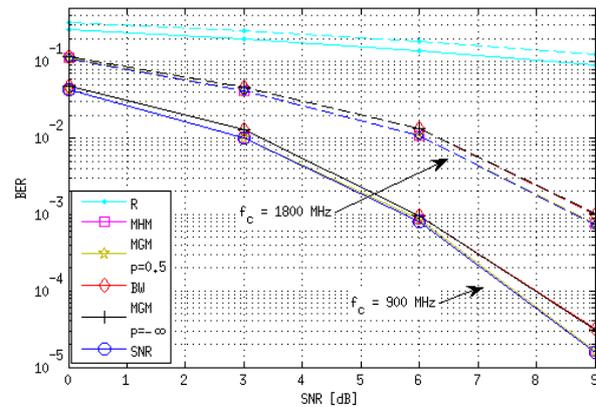
O método de seleção aleatória obtém ordem de diversidade 1 em teoria, isto é, mesmo que o número de relays disponíveis aumente ele não consegue melhorar a taxa de erro de bit, já que estatisticamente ele tem as mesmas chances de escolher caminhos melhores e piores. Como o cenário simulado é mais pessimista que o teórico o método não atinge a ordem de diversidade $D = 1$.

Em relação ao desempenho dos métodos percebe-se que eles atingem valores muito próximos tanto em BER quanto em ordem diversidade, isto é,

as curvas possuem a mesma inclinação e o mesmo deslocamento do eixo y. Isso acontece quando o número de relays disponíveis é relativamente pequeno, já que frequentemente são escolhidos os mesmos relays para retransmissão.

Para verificar de maneira mais justa a diferença de desempenho entre os métodos de seleção foi simulado um caso com $a = 30$. Adicionalmente, a frequência da portadora também foi alterada, para $f_c = 1800$ MHz, sendo esse mais realista que $f_c = 900$ MHz adotado ao longo do trabalho, assim, foi possível verificar o comportamento dos métodos em situações com mais opções de escolha, e de maneira ainda factível em cenário real, como ilustrado na Figura 7.

Figura 7 - BER x SNR para topologia SR; $a = 30$ e $c = 1$.



Fonte: os autores

Analisando os resultados conforme a mudança da frequência de operação da portadora, percebe-se que o resultado tende a ser pior, em ambos os métodos de melhor escolha, o que já era esperado e pode ser compensado com o uso de técnicas de codificação, por exemplo. Ao longo do trabalho foi mantida $f_c = 900$ MHz por simplificação, e como esta alcança uma maior margem de desempenho, a comparação dos outros quesitos fica mais expressiva.

As curvas de desempenho dos métodos, para a mesma portadora, estão mais separadas, o que

permite dizer que o método SNR, MHM e MGM com $p = 0.5$ apresentam os melhores resultados. Foi visto anteriormente que o BW tem o menor número de operações, então para uma diferença marginal de desempenho, cerca de um décimo de década em alta SNR, este ainda é o método mais indicado para seleção.

Na simulação seguinte foram adotados os parâmetros de simulação referente ao esquema de seleção MR, como é visto na Tabela 3.

Tabela 3: Parâmetros de simulação para o esquema MR

Parâmetro	Valor
Protocolo de cooperação	AF
relays disponíveis	$a = 3$
relays selecionados	$c = 1$ e $c = 2$
v	3
$G = G_{tx} G_{rx}$	12 dB
C	8 dB
N_f	5 dB
Frequência da portadora	$f_c = 900$ e MHz
Distância S-D	$d = 50$ m
Distância S-R e R-D ⁴	$d_{sr}, d_{rd} \in [2; 48]$ m
Densidade espectral do ruído	-174 dBm/Hz
Largura de banda	30 kHz
SNR média	$\gamma \in [0; 25]$
Potência do nó fonte (fixa)	$P = \gamma P_n Q_{sd}^{-1}$
Potência do relay (fixa)	$P_i = \gamma P_n Q_s^{-1}$
Modulação	BPSK

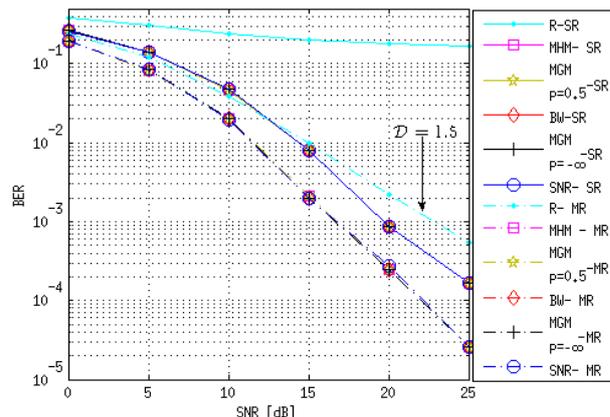
Fonte: os autores

O objetivo agora é comparar a seleção de um relay com a seleção de múltiplos relays. Importante ressaltar que para deixar o cenário com mais adversidades foi aumentado o diâmetro da área de comunicação de 50 para 100 metros e a potência que era a mínima para vencer a perda de percurso foi ponderada por 0,5, de modo ao uso de 2 relays gastar a mesma potência que o uso de um só. Como esperado, ao aumentar a quantidade de cópias do sinal que chegam ao receptor, a BER do sistema diminui.

Uma análise interessante ao se fazer da Figura 8 é a melhora significativa na BER do método aleatório ao combinar o sinal de dois relays, evidenciada pela ordem de diversidade, que passou de $D = 1$

para $D = 1,5$, em vez de 3 décadas de diferença de desempenho quanto aos outros métodos possui um pouco mais de uma década.

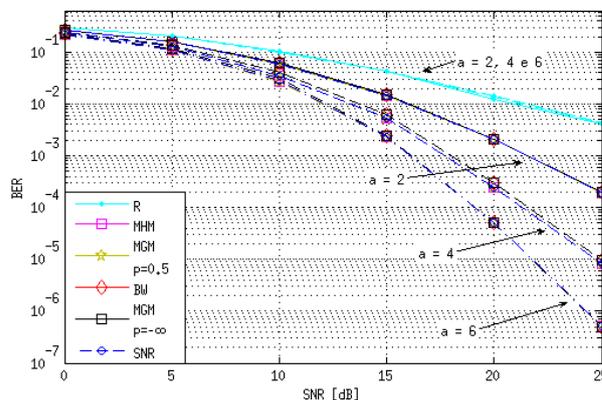
Figura 8 - BER x SNR para topologias SR e MR; $a = 3$, $c = 1$ e $c = 2$.



Fonte: os autores

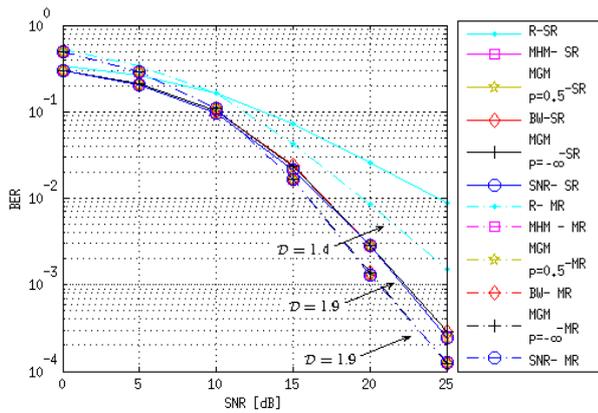
A Figura 9 mostra os resultados da simulação para seleção SR em cenário *two-way*, e a Figura 10 mostra os resultados da simulação que compara a BER em seleção SR e MR em cenário *two-way*.

Figura 9 - BER x SNR para topologia SR *two-way*; $a = [2; 4; 6]$ e $c = 1$.



Fonte: os autores

Figura 10 - BER x SNR para topologias SR e MR *two-way*; $a = 3$, $c = 1$ e $c = 2$.



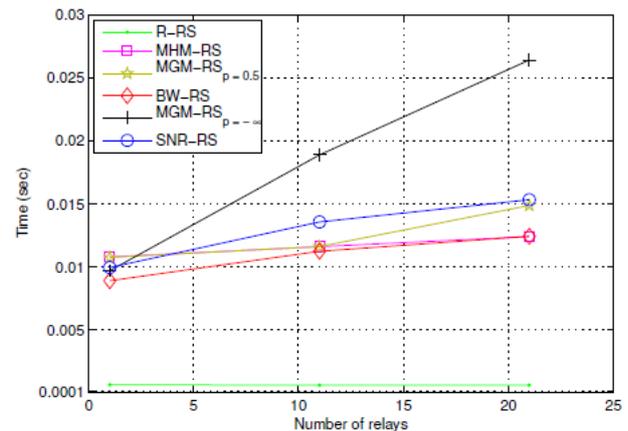
Fonte: os autores

Quando comparada a mesma situação de seleção de um *relay* em *link* unidirecional e em modo *two-way* é esperado que a curva da BER esteja deslocada à direita, isto é, necessitando de uma SNR maior para atender aos mesmos requisitos de QoS, com a vantagem de ter o dobro de taxa líquida entre os nós. Esse cenário fica sendo o mais indicado, pois muito tem se discutido sobre eficiência energética na área. A ordem de diversidade do sistema não é a mesma alcançada, pois ao anular a própria interferência o móvel ainda tem que estimar a informação recebida do outro, o que pode conter mais erros na detecção.

Até então os métodos de seleção de *relays* apresentaram resultados relativamente próximos uns dos outros, mesmo em cenários distintos, esse trabalho enfatiza a importância do cálculo da complexidade de cada método, e a partir disso e do conhecimento da arquitetura a ser implementada tomar a decisão sobre qual método usar.

O gráfico a seguir, na Figura 11 complementa a análise de complexidade dos métodos de seleção, já que uma quantidade de operações são realizadas de forma mais rápida ou não, dependendo do tipo delas. É visível pela quantidade de operações e pelo tempo de realização que o método BW-RS atinge um resultado ótimo com o menor tempo.

Figura 11 - Tempo médio de execução da rotina de cada método de seleção de *relay*, em função do número de *relays* disponíveis.



Fonte: os autores

A simulação foi feita em *software* MatLab, onde é conhecido que existem funções otimizadas para comparação de vetores e matrizes, mas mesmo quando comparamos o número de operações que é uma medida justa para arquiteturas mais modestas, o método BW-RS ainda é o melhor.

O método MGM é factível de implementação quando é usado o parâmetro $p = 0.5$, equivalente ao método MHM-RS, porém quando $p = \infty$ o tempo de realização das operações exponenciais cresce muito, tornando-o inviável para aplicações de tempo real.

Conclusões

Esse trabalho comparou o desempenho e a complexidade dos métodos de seleção de *relay*, foi mostrado por simulação que o desempenho dos métodos é similar, exceto o aleatório, e bem próximo do valor teórico, deixando então a escolha do melhor método depender mais da complexidade de cada um deles.

Sabendo que cada arquitetura de processamento de sinais possui funções específicas otimizadas, por exemplo operações exponenciais ou operações de comparação é possível definir o método com o melhor compromisso desempenho e complexidade.

Para os casos testados nestes cenários apresentados o método melhor avaliado foi o BW-RS. Foi mostrado também que o número de *relays* disponíveis e selecionados interfere até certo limiar na BER, o que comprova que seria desperdício adotar um número muito grande de *relays*, aqui o limite na variação de melhora foi 6.

Referências

- BLETSAS, A.; KHISTI, A.; REED, D.; LIPPMAN, A. A simple cooperative diversity method based on network path selection. *IEEE Jour. Sel. Areas in Comm.*, v. 24, n. 3, p. 659-672, March 2006.
- ESCRIG, B. Optimal cooperative mac protocol with efficient selection of relay terminals. In: PROCEEDINGS OF THE 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON MOBILE AD-HOC AND SENSOR NETWORKS. San Francisco, CA: IEEE Computer Society, 2010. (MSN '10), p. 576-581.
- IBRAHIM, A.; SADEK, A.; SU, W.; LIU, K. Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with? *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, v. 7, n. 7, p. 2814-2827, 2008.
- JING, Y. A relay selection scheme for two-way amplify-and-forward relay networks. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON WIRELESS COMMUNICATIONS SIGNAL PROCESSING, 2009. *Nanjing*, China: IEEE, 2009. (WCSP' 09). p. 1-5.
- KNUTH, D. E. *The art of computer programming*. Second. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley, 1981. 3 v.
- KRIKIDIS, I. Relay selection for two-way relay channels with mabc df: a diversity perspective. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 59, n. 9, p. 4620-4628, nov. 2010.
- LANEMAN, J. N.; TSE, D. N. C.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior. *IEEE Transactions of Information Theory*, v. 50, n.12, p. 3062-3080, 2004.
- LIU, K. J. R.; SADEK, A. K.; SU, W.; KWASINSKI, A. *Cooperative communications and networking*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2009.
- MACHADO, R.; UCHOAFILHO, B. F.; DUMAN, T. M. Performance analysis of a full-duplex cooperative diversity scheme with partial channel knowledge at the cooperating nodes. *Journal of Communication and Information Systems (Online)*, v. 24, p. 30-39, 2009.
- NAM, Y.-H.; LIU, L.; WANG, Y.; ZHANG, C.; CHO, J.; HAN, J.-K. Cooperative communication technologies for lte-advanced. In: *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS SPEECH AND SIGNAL PROCESSING (ICASSP)*. Dallas, Texas, USA: IEEE, 2010. p. 5610-5613.
- NGUYEN, H.; NGUYEN, H.; LE-NGOC, T. Diversity analysis of relay selection schemes for two-way wireless relay networks. *Wireless Personal Communications*, Springer US, v. 59, p. 173-189, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11277-009-9911-0>>. Acesso em:
- NIE, C.; LIU, P.; KORAKIS, T.; ERKIP, E.; PANWAR, S. S. Cooperative relaying in next-generation mobile wimax networks. *IEEE Transaction Vehicular Technology*, v. 3, n. 62, p. 1399-1405, 2013.
- NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 42, n. 10, p. 74-80, 2004.
- SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity - part i: System description. *IEEE Transactions on Communications*, v. 51, p. 1927-1938, 2003a.
- SENDONARIS, A.; ERKIP, E.; AAZHANG, B. User cooperation diversity - part ii: Implementation aspects and performance analysis. *IEEE Transactions on Communications*, v. 51, p. 1939-1948, 2003b.
- SILVA, N. S. *Desempenho-complexidade em redes cooperativas amplifica e transmite com seleção de relays*. 2014. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

SILVA, N. S.; ABRÃO, T.; CIRIACO, F. Relay selection methods for wireless sensor networks: performance-complexity tradeoff. In: *SIMPOSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES*, 31., 2013. Fortaleza. Anais... Fortaleza: SBRT, 2013. p. 1-5.

*Recebido em 6 Maio 2014- Received on May 6, 2014.
Aceito em 4 Março, 2015 - Accepted on March 4, 2015.*