

# Análise da Eficiência Energética de Estratégias de Transmissão para uma Rede Com Retransmissor Multidirecional

Marcio Henrique Doniak

**Resumo**—Uma rede com retransmissor multidirecional é usada em uma rede de sensores sem fio para que os nós possam trocar suas informações entre si de forma mais eficiente. Neste trabalho, analisamos a eficiência energética de três estratégias de transmissão. Estas estratégias diferem entre si na forma como os nós transmitem: numa é em pares; noutra todos transmitem juntos; e na terceira a metade transmite simultaneamente. A análise revela que a estratégia na qual todos os nós transmitem juntos tem a melhor eficiência energética quando a taxa efetiva máxima é considerada. Ao relaxar essa condição, as demais se mostram mais eficientes.

**Palavras-Chave**—Rede com retransmissor multidirecional, eficiência energética, rede de sensores sem fio.

**Abstract**—A network with a multidirectional relay is used in a wireless sensor network so that nodes can exchange their information with each other more efficiently. It assumes three distinct transmission strategies previously defined. They differ in the way the nodes transmit, one is in pairs, the other is all together and in the third half transmits simultaneously. An analysis of the energy efficiency of these strategies was carried out. The one where all the nodes transmit together had the best energy efficiency when the maximum effective rate was considered. By relaxing this condition, the others proved to be more efficient.

**Keywords**—Multiway relay network, Energy efficiency, Wireless sensor networks.

## I. INTRODUÇÃO

As redes com retransmissor multidirecional (mRNs) fazem parte de redes de comunicação que usam um terminal retransmissor para ajudar os seus usuários a trocarem suas informações entre si. As mRNs vêm sendo um importante tópico de pesquisa com aplicações em diversas redes de comunicação, tais como: wireless sensor networks (WSNs) [1], redes de satélite [2] e redes veiculares (VANETs) [3]. O uso do retransmissor proporciona vários benefícios para a rede de comunicação, tais como: prover uma melhor eficiência energética, expandir o alcance dos usuários, elevar as taxas de transferência de informação e melhorar a coordenação das transmissões [1].

Em uma mRN, cada usuário transmite sua informação para o retransmissor, e este, por sua vez, compartilha-a com todos os usuários da rede. Desta forma, a troca de informações em uma mRN ocorre em duas etapas. A primeira é chamada de etapa de múltiplo acesso (MAC) e a segunda, de difusão (BC) [1]. Durante a etapa MAC, os usuários transmitem suas

informações para o retransmissor. E durante a etapa de BC o retransmissor transmite as informações recebidas para todos os usuários.

Em um modelo de mRN, pode-se aplicar a estratégia em que cada usuário transmite sua informação ao retransmissor e, posteriormente, este encaminha cada informação recebida a todos os usuários. Portanto, se a mRN tiver quatro usuários, serão necessário oito intervalos de tempo (TS) para concluir a troca de informações. Para tornar esse processo mais eficiente, diversas estratégias de transmissão para um sistema mRN vêm sendo propostas. As mais comuns envolvem: todos os usuários transmitindo simultaneamente em apenas um TS; dois usuários transmitindo simultaneamente no mesmo TS.

A grande maioria dos sistemas mRN propostos consideram o acesso ao canal *full-duplex*. Entretanto, alguns deles excluem a comunicação direta entre os usuários [1]. Já outros modelos relaxam essa condição, permitindo aos usuários transmitir para o retransmissor e para os demais usuários da rede [4], [5]. Quando múltiplos usuários transmitem simultaneamente no mesmo TS, existe um ganho de multiplexação que melhora a taxa de transmissão [6]. Outro modelo, que tem como objetivo reduzir a complexidade de muitos usuários transmitindo simultaneamente, considera apenas dois usuários transmitindo a cada TS [7], [8]. O foco desses trabalhos é melhorar a relação entre o desempenho e a taxa de transferência escolhendo o par ideal de usuários nos quais a transmissão é realizada.

Para poder comparar os diferentes modelos de sistemas propostos, foi proposta uma mRN generalizada (g-mR) em [3]. Na g-mRN, os usuários são agrupados em *clusters* e *subclusters*. Aqueles usuários que conseguem transmitir diretamente uns para os outros são agrupados no mesmo *subcluster*. E todos os usuários que desejam trocar informação uns com os outros são agrupados no mesmo *cluster*.

Além do g-mRN, três estratégias de transmissão foram propostas em [3]. Estas foram apresentadas por meio de um exemplo com um *cluster* e dois *subclusters*. O objetivo desse trabalho foi a análise da taxa efetiva de cada estratégia de transmissão proposta, considerando diferentes valores da taxa de mensagem, em uma VANET. Esta também é válida para uma WSN. Entretanto, a WSN possui algumas particularidades que são importantes de serem analisadas para cada estratégia de transmissão, e uma delas é a eficiência energética [13]. Em WSNs, os usuários são chamados de nós.

A importância da eficiência energética, para diversas topologias, em uma WSN está no fato da fonte de energia de cada nó vir de uma bateria [9], [10], [13], que tem um tempo de

vida limitado. E quando acaba a bateria, troca-se o nó por inteiro, porque esta prática é mais barata do que trocar apenas a bateria [10], [13]. Portanto, quanto mais tempo de vida tiver um nó, menor será o custo da rede.

Este artigo apresenta a eficiência energética para as estratégias de transmissão apresentadas em [3]. Os mesmos parâmetros, considerações e resultados obtidos em [3] serão também considerados para que este trabalho seja uma extensão em termos de eficiência energética daqueles já obtidos. A análise da eficiência energética será apresentada em termos da taxa efetiva por potência consumida. Dentre os resultados obtidos, destacam-se: ao considerar a eficiência energética na taxa efetiva máxima [3], a estratégia de transmissão *massive*-mRN é a que apresenta o melhor desempenho; mas para taxas de mensagem fixas [3], considerando as distâncias mais curtas, a estratégia *partial*-mRN obtém os melhores resultados; e para as distâncias mais longas ( $d \geq 10\text{m}$ ) foi a *pairwise*-mRN que se destacou pela eficiência energética.

## II. ESTRATÉGIAS DE TRANSMISSÃO

Esta seção apresenta resumidamente as três estratégias de transmissão definidas em [3]. A quantidade de TS usada por cada estratégia considera que todas as transmissões foram bem-sucedidas. Assumiu-se que o retransmissor usa a técnica decodifica-e-encaminha [11]. E a estratégia de transmissão do retransmissor envolve o uso das técnicas de codificação de rede (NC) em GF(2) [12].

As três estratégias de transmissão adotam a mesma forma de encaminhamento das mensagens pelo retransmissor. Assim, na fase BC, o retransmissor seleciona duas mensagens para encaminhar a todos os nós do *cluster* simultaneamente. As mensagens selecionadas precisam ser de *subclusters* diferentes. Ele combina as duas mensagens usando as técnicas de NC. Desta forma, os nós dos dois *subclusters* envolvidos conseguem separar e decodificar as mensagens transmitidas [3]. Já a fase MAC é a que diferencia uma estratégia da outra, como pode ser visto a seguir:

- ***pairwise*-mRN**: os nós transmitem em pares, sendo cada nó pertencente a *subclusters* diferentes. Os nós recebem a mensagem de seu vizinho de *subcluster*, e o retransmissor recebe a soma das duas mensagens transmitidas.
- ***massive*-mRN**: todos os nós do *cluster* transmitem simultaneamente no primeiro TS. Cada nó recebe a soma das mensagens de seus vizinhos de *subcluster*. E o retransmissor recebe a sobreposição das mensagens de todos os nós do *cluster*.
- ***partial*-mRN**: metade dos nós do *cluster* transmitem no primeiro TS e o restante no TS seguinte, sendo que devem ser selecionados aproximadamente a metade dos nós de cada *subcluster* para transmitir em cada TS.

### A. Taxa efetiva

Assume-se que todos os nós compartilham a mesma quantidade de bits de informação ( $B$ ). Os bits de informação são divididos em  $K$  pacotes, com  $k = \frac{B}{K}$  [bits/pacote]. Esses pacotes de informação são codificados, resultando em pacotes

com  $n$  símbolos complexos, com uma taxa de mensagem:  $r = \frac{k}{n} \left[ \frac{\text{bits de informação}}{\text{símbolos complexos}} \right]$  [3].

A taxa efetiva é definida como a taxa de bits de informação do ponto de vista do usuário considerando as possíveis perdas de transmissão:  $R = \frac{B}{n \cdot E[N]} \left[ \frac{\text{bits de informação}}{\text{símbolos complexos}} \right]$  [3], em que  $E[\cdot]$  representa o valor esperado e  $N$  é o número total de pacotes transmitidos até que os  $B$  bits de informação sejam decodificados com sucesso por todos os nós.

Como  $N$  depende da qualidade do estado do canal, ela é uma variável aleatória. Assim, se  $p$  é a probabilidade de sucesso dos pacotes transmitidos, então  $E[N] = \frac{K}{p}$ . Em um canal ponto-a-ponto:  $p = p(r) = P(r < C)$ , em que  $C$  representa a capacidade instantânea do canal. Portanto, a taxa efetiva é reescrita como:  $R(r) = p(r) \cdot r$ . Os detalhes são encontrados em [3], [11].

A taxa efetiva de cada estratégia de transmissão pode ser resumida como [3]:

$$\begin{aligned} \bullet R_{\text{pairwise}} &= \frac{2}{\frac{1}{R_{\text{mac}}} + \frac{1}{R_{\text{bc}}}}, \\ \bullet R_{\text{massive}} &= \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{mac}}} + \frac{M}{2R_{\text{bc}}}}, \\ \bullet R_{\text{partial}} &= \frac{2}{\frac{1}{R_{\text{mac}}} + \frac{M}{2R_{\text{bc}}}}, \end{aligned}$$

em que,  $R_{\text{mac}}$  é a taxa efetiva da fase MAC para a estratégia escolhida, e  $R_{\text{bc}}$  é a taxa efetiva da fase BC, ambas adotando a mesma taxa de mensagem.

## III. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Para definir a eficiência energética em função da taxa efetiva, é necessário relacionar a energia gasta com a troca de mensagens entre os nós da rede. Sabe-se que a taxa efetiva é uma função da qualidade do estado do canal. Logo, dependendo da condição do canal é possível que uma retransmissão seja necessária, resultando em um aumento do consumo de energia. Com isso em mente, defini-se a eficiência energética,  $E$ , como:

$$E = \frac{R}{P_{\text{tot}}} \left[ \frac{\text{bit}}{\text{J}} \right], \quad (1)$$

em que,  $R$  representa a taxa efetiva e  $P_{\text{tot}}$  a potência total consumida por um nó durante uma transmissão.

### A. Consumo de potência

A potência total consumida,  $P_{\text{tot}}$ , é aquela usada nos circuitos de transmissão e recepção junto com a potência do amplificador de transmissão. Lembrando que para ter sucesso, todos os nós devem trocar suas mensagens uns com os outros. Logo, considera-se a energia total consumida por cada nó e pelo retransmissor durante a troca de mensagens. Desta forma, a potência total consumida é:

$$P_{\text{tot}} = (M + 1) \cdot (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}) \text{ [W]}, \quad (2)$$

em que  $M$  é a quantidade de nós da rede, o valor 1 representa o retransmissor,  $P_{\text{tx}}$  é a potência total no transmissor e  $P_{\text{rx}}$  é

potência total no receptor. A potência total de transmissão é dividida em duas fontes de potência, a do amplificador ( $P$ ) e a dos circuitos de transmissão ( $P_{\text{ctx}}$ ):

$$P_{\text{tx}} = (1 + \alpha)P + P_{\text{ctx}} \quad [\text{W}], \quad (3)$$

em que  $\alpha$  representa a eficiência do amplificador [6].

### B. Consumo de potência das estratégias de transmissão

A potência total de cada estratégia de transmissão é diferenciada na fase MAC, uma vez que a fase BC é igual para todas. A potência na fase BC é definida como:

$$P_{\text{bc}} = \frac{M}{2} \cdot (P_{\text{tx}} + M \cdot P_{\text{rx}}). \quad (4)$$

O retransmissor usa  $\frac{M}{2}$  TS para encaminhar as  $M$  mensagens para todos os nós.

Na estratégia *pairwise*-mRN dois nós transmitem simultaneamente, portanto, sua fase MAC dura  $\frac{M}{2}$  TS. A cada transmissão, há  $(M - 2)$  nós mais o retransmissor recebendo os sinais transmitidos. Logo, a potência total é:

$$P_{\text{pairwise}_{\text{mac}}} = M \cdot P_{\text{tx}} + \left( \frac{M}{2} (M - 1) \right) \cdot P_{\text{rx}}. \quad (5)$$

Na estratégia *massive*-mRN todos os nós transmitem simultaneamente e recebem os sinais de seus vizinhos. O retransmissor recebe a soma das mensagens de todos os nós. Assim, a potência total é:

$$P_{\text{massive}_{\text{mac}}} = M \cdot P_{\text{tx}} + (M + 1) \cdot P_{\text{rx}}. \quad (6)$$

Na *partial*-mRN a quantidade de nós recebendo os sinais transmitidos varia dependendo do número de nós de cada *subcluster* [3]. Assume-se que  $M$  é par, com os nós igualmente divididos entre os dois *subclusters*. Para  $M = 4$ , enquanto 2 nós transmitem, os outros 2 recebem juntamente com o retransmissor. No caso de  $M = 6$ , no primeiro TS, dois nós de um *subcluster* transmitem e todos os três recebem, já no outro *subcluster*, apenas um nó transmite e os outros dois recebem. No segundo TS a situação é mesma, mas trocando os *subclusters*. No caso de  $M \geq 8$ , todos os nós recebem nos dois TS, enquanto que a metade dos nós do *cluster* está transmitindo em cada TS. Portanto, a potência total é:

$$\begin{aligned} P_{\text{partial}_{\text{mac}}} &= M \cdot P_{\text{tx}} + \left( \frac{M}{2} (M - 1) \right) \cdot P_{\text{rx}}, \quad M = 4, \\ P_{\text{partial}_{\text{mac}}} &= M \cdot P_{\text{tx}} + 2M \cdot P_{\text{rx}}, \quad M = 6, \\ P_{\text{partial}_{\text{mac}}} &= M \cdot P_{\text{tx}} + 2(M + 1) \cdot P_{\text{rx}}, \quad M \geq 8. \end{aligned} \quad (7)$$

A potência total será dada pela soma nas fases MAC e BC para cada estratégia. Logo, a potência total é definida como:

$$P_{\text{tot}} = P_{\text{mac}} + P_{\text{bc}} \quad [\text{W}], \quad (8)$$

em que  $P_{\text{mac}}$  representa a potência durante a fase MAC para a estratégia de transmissão selecionada.

### C. Potência de transmissão

Até o momento foi apresentado o cálculo da potência total em uma WSN usando mRN. Entretanto, precisa calcular os valores de  $P_{\text{tx}}$  e  $P_{\text{rx}}$  de cada nó. Os valores de potência gasta nos circuitos transmissor e receptor podem ser estimados, uma vez que esses valores não mudam significativamente. Porém, a potência de transmissão ( $P$ ) depende do ruído e da perda do canal.

O primeiro passo é definir uma largura de banda (BW) para obter a taxa efetiva em termos de bits por segundo (bps). Assim, limita-se o ruído para essa BW. Logo, a relação sinal-ruído (SNR) será:  $\text{SNR} = \frac{P_{\text{tx}}}{N}$ , em que  $N$  representa a potência do ruído, dada por:  $N = N_f + N_0 + \text{BW}_{\text{dB}}$  [dB].  $N_f$  é a figura de ruído e  $N_0$  é a densidade espectral de potência do ruído aditivo Gaussiano branco (AWGN).

Do ponto de vista computacional, a SNR varia em uma faixa de nível de ruído estimado, como por exemplo, os níveis apresentados em [10]. Desta forma, obtêm-se os valores de potência recebida para essa variação da SNR.

A potência de transmissão ( $P_t$ ) também pode variar com a distância, ou seja, quanto mais distante um nó estiver do outro, maior será a potência transmitida para manter a SNR. Neste artigo, assume-se que todos os nós de cada *subcluster* estão equidistantes uns dos outros e do retransmissor. E será usado o modelo de perda simplificado, conforme definido em [6]. Desta forma, a potência de transmissão será:

$$P_t(d) = L(d) \cdot P_{\text{tx}} \cdot M_1 \quad [\text{W}], \quad (9)$$

em que,  $M_1$  representa a margem conforme definido em [9],  $L = K \cdot \left( \frac{d}{d_0} \right)^\gamma$  é a perda de percurso, que varia com a distância,  $K = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{\lambda}{4\pi d_0} \right)$ ,  $\gamma$  é o expoente de perda de percurso e  $\lambda$  é o comprimento de onda [6].

Assim, a potência total de transmissão, inicialmente dada na equação (3), pode ser reescrita como:

$$P_{\text{tx}}(d) = (1 + \alpha) \cdot P_t(d) + P_{\text{ctx}} \quad [\text{W}]. \quad (10)$$

Dada uma mesma SNR, a potência total de transmissão varia com a distância pois, o modelo de perda do canal também apresenta tal dependência.

## IV. RESULTADOS

Para calcular a eficiência energética, apresentada na equação (1), foram usados os resultados da taxa efetiva apresentados em [3]. Com esses os resultados, a eficiência energética pode ser obtida analiticamente, aplicando o equacionamento apresentado na Seção III. Portanto, as mesmas considerações e quantidade de nós usadas em [3] foram aplicadas neste trabalho.

Assume-se que todos os nós possuem o mesmo consumo de potência em seus circuitos de transmissão e recepção. A mesma taxa de mensagem é usada em todos os nós e em ambas as fases, MAC e BC. A Tabela I apresenta os parâmetros de valores utilizados para obter os resultados que serão apresentados na sequência.

A Figura 1 mostra a variação da eficiência energética com a SNR, considerando: distâncias de 2 e 10 m;  $M = \{4, 6, 8\}$

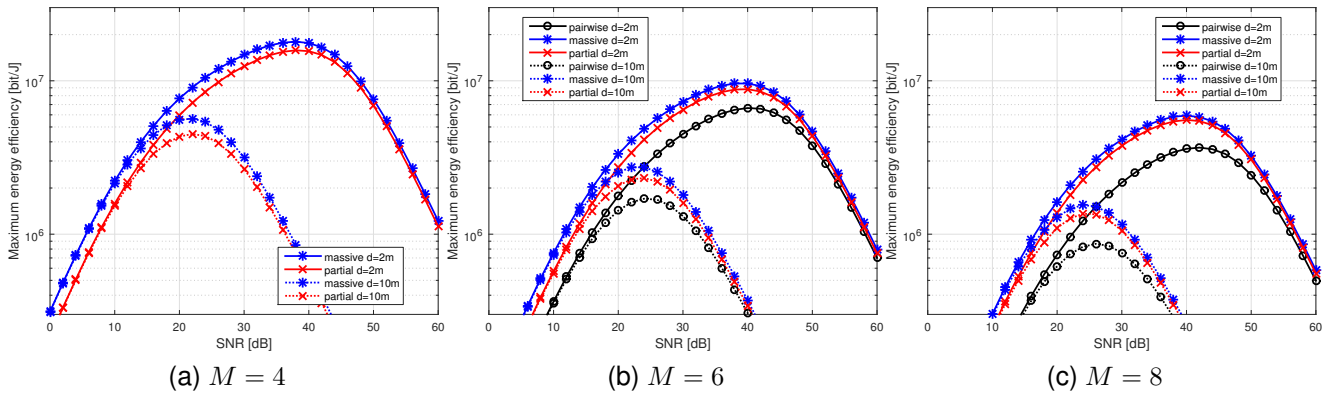


Fig. 1. Eficiência energética para as distâncias de 2 e 10 m, considerando a taxa efetiva máxima.

 TABELA I  
 CONSIDERAÇÕES PARA AS SIMULAÇÕES

Parâmetro	Valor
BW	1 MHz
Frequência de transmissão ( $f_c$ )	2.5 GHz
Faixa de SNR	[0, 60] dB
$N_f$	4.4 dBm
$N_0$	-204 dBm
$M_l$	30 dB
$\gamma$	3
$\alpha$	0.5
Faixa de distância( $d$ )	[1, 30] m
$d_0$	1 m
$P_{ctx}$	11.2 mW
$P_{rx}$	16.6 mW

nós; taxa efetiva máxima. Esses resultados têm dois destaques principais. O primeiro está na maior eficiência energética para a distância mais curta ( $d = 2\text{m}$ ). Este resultado mostra que para uma distância maior é necessário uma potência de transmissão maior, logo haverá uma piora na eficiência energética. O segundo destaque confirma o desempenho esperado da estratégia *massive*-mRN ter a melhor eficiência energética das três. Este resultado era esperado porque, como foi apresentado em [3], essa estratégia tem o melhor desempenho de taxa efetiva máxima, além de (1) ser diretamente proporcional à taxa efetiva.

Outro resultado observado na Figura 1 é a queda da eficiência energética à medida que a quantidade de nós na mRN aumenta. Este resultado corrobora com o fato de ter sido considerado que o sucesso na troca de mensagens é obtido quando todos os nós recebem as mensagens de todos os demais, então ao aumentar quantidade de nós haverá um maior gasto energético para completar a troca de mensagens. Portanto, a eficiência energética diminui.

Até aqui assumiu-se o uso da taxa efetiva máxima no cálculo da eficiência energética, ou seja, usando a taxa de mensagem ótima para computar a taxa efetiva máxima [3]. Agora, será considerado o caso em que a taxa de mensagem é fixa. A Figura 2 mostra a eficiência energética de uma mRN com 6 nós, para taxas de mensagem fixas,  $r = \{1, 2, 3, 4\}$ . Também é apresentada a eficiência energética para a taxa de mensagem ótima, porque ela representa o limiar da máxima eficiência

energética de cada estratégia. Para cada distância é apresentada a eficiência energética dada a SNR que maximizou o seu valor.

A Figura 2 apresenta alguns aspectos importantes para serem analisados. O primeiro mostra que a eficiência energética da estratégia *massive*-mRN diminui significativamente com o aumento da taxa de mensagem. Essa diminuição não é tão expressiva com a estratégia *partial*-mRN. Na estratégia *pairwise*-mRN para distâncias curtas ( $d \leq 10\text{m}$ ), a eficiência energética é melhor para taxas de mensagem maiores. Mas com o aumento da distância, a eficiência energética muda, sendo melhor para taxas de mensagem menores. Como foi apresentado em [3], sabe-se que uma taxa de mensagem maior significa que mais bits de informação estão sendo transmitidos por pacote. Associado a isso, assumiu-se um sucesso quando todos os nós trocaram suas mensagens entre si. Então, se há uma falha, considerou-se necessário repetir o processo, gastando mais energia. Logo, enquanto a distância é curta, permitindo melhores condições de SNR, é possível ter um desempenho melhor para valores de taxa de mensagem maiores. E foi isso que aconteceu com a estratégia *pairwise*-mRN. No caso da *massive*-mRN, precisa de uma SNR muito elevada para usar as taxas de mensagem mais altas, como é apresentado em [3]. Observando a Figura 2, nota-se que a eficiência energética da estratégia *partial*-mRN é melhor do que a da *pairwise*-mRN para  $r \leq 3$ . Já para  $r \geq 4$ , o melhor desempenho é o da estratégia *pairwise*-mRN.

Outro destaque importante é o fato da estratégia *partial*-mRN, para os menores valores de taxas de mensagem,  $r = \{1, 2\}$ , a eficiência energética foi próxima a daquela para a taxa de mensagem ótima, ou seja, a máxima. Mas tanto para a estratégia *partial*-mRN quanto para a *pairwise*-mRN, considerando  $d \leq 10\text{m}$ ,  $r \leq 2$  e faixa de SNR apresentada na Tabela I, a eficiência energética está distante do valor máximo, pois nessas condições é possível obter um valor de taxa efetiva que se aproxima da máxima para valores de taxa de mensagem maiores, como pode ser visto em [3]. Logo, a eficiência energética será melhor nesses casos, porque a transmissão será mais rápida. No caso de distâncias maiores, se a potência não varia, então começará a haver mais perdas para as taxas de mensagem maiores, implicando em mais retransmissões, conseqüentemente, levando mais tempo para completar a troca de mensagens entre os nós. Nesta situação,

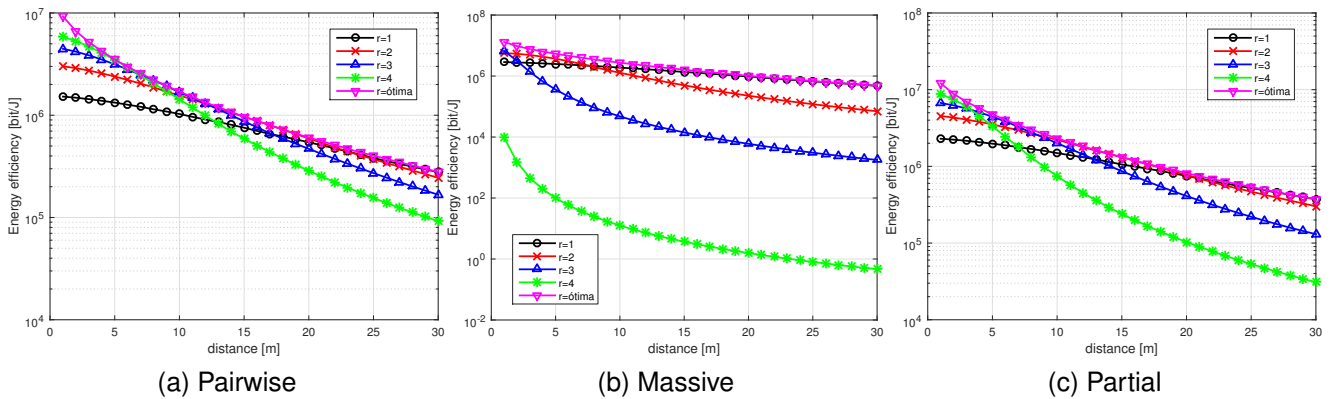


Fig. 2. Eficiência energética considerando algumas taxas de mensagem fixa, para  $M = 6$  nós.

o desempenho de eficiência energética da *pairwise*-mRN é levemente inferior do que a *partial*-mRN.

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise de eficiência energética em termos de bits de informação por Joule. Para esta análise foram aplicados os dois cenários apresentados em [3], que considerou duas condições de taxa efetiva, uma para a taxa de mensagem ótima e outra para valores fixos. Na primeira condição, a estratégia *massive*-mRN apresentou o melhor desempenho, por usar menos TS para os nós trocarem suas mensagens entre si e, conseqüentemente, eles consomem menos energia. E como foi apresentado em [3], a *massive*-mRN foi a estratégia com melhor desempenho de taxa efetiva máxima. Portanto, este resultado está de acordo com o esperado.

Quando fixa-se a taxa de mensagem ( $r = \{1, 2, 3, 4\}$ ), observa-se a eficiência energética da estratégia *pairwise*-mRN próxima daquela com a taxa de mensagem ótima, que é a eficiência energética máxima. Já a eficiência energética da estratégia *massive*-mRN não obteve um bom desempenho para  $r = \{3, 4\}$ . Isso ocorreu porque, nesta situação, esta estratégia precisa realizar muitas retransmissões para atender o requisito de ter muitos bits de informação transmitidos por pacote. Quando a metade dos nós transmitem simultaneamente, o caso da estratégia *partial*-mRN, o desempenho se mantém próximo do seu valor máximo para  $r \leq 3$ . Pois, quanto maior o número de nós transmitindo simultaneamente, menor será a taxa de mensagem ótima [3].

Em uma WSN, o desempenho de eficiência energética é igualmente importante ao de taxa efetiva, porque quanto melhor for a eficiência energética maior será a vida útil da mRN.

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento desta pesquisa contou com importantes contribuições e sugestões. O autor agradece os pesquisadores Prof. Bartolomeu F. Uchôa-Filho, PhD. e Prof. Dr. Richard Demo Souza pelas suas importantes diretrizes ao longo desta pesquisa.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. Gündüz and A. Yener and A. Goldsmith and H. V. Poor, *The Multiway Relay Channel*. IEEE Transactions on Information Theory, doi: 10.1109/TIT.2012.2219156, ISSN=0018-9448, v. 59, no. 1, pp. 51–63, 2013.
- [2] L. Ong and S. J. Johnson and C. M. Kellett, *An optimal coding strategy for the binary multi-way relay channel*, IEEE Communications Letters, doi=10.1109/LCOMM.2010.04.092427, ISSN=1089-7798, v.14, no. 4, pp. 330–332, 2010.
- [3] M. H. Doniak, R. D. Souza, and B. F. Uchôa-Filho, *Generalized multiway relay network: Proposition and effective rate analysis*, Journal of Communication and Information Systems, v. 33, no. 1, pp. 113–123, doi: 10.14209/jcis.2018.12, 2018.
- [4] Y. Su, Y. Li, G. Song, and L. Liu, *Achievable rate regions of multi-way relay channel with direct links*, IET Communications, v. 9, no. 7, pp. 947–959, doi: 10.1049/iet-com.2014.0622, 2015.
- [5] A. Savard and C. Weidmann, *On the gaussian multiway relay channel with intra-cluster links*. EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, v. 2016, no. 1. doi:http://dx.doi.org/10.1186/s13638-016-0763-5, 2016
- [6] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. New York, NY, USA: Cambridge University Press, ISBN: 9780511841224. doi: https://doi.org/10.1017/CB09780511841224, 2005.
- [7] S. N. Islam, S. Durrani, and P. Sadeghi, *A novel user pairing scheme for functional decode-and-forward multi-way relay network*, Physical Communication, v. 17, pp. 128 – 148. Online: www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490715000440. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.phycom.2015.08.009, 2015
- [8] R. R. Borujeny, M. Noori, and M. Ardakani, *Maximizing data rate for multiway relay channels with pairwise transmission strategy*, IEEE Transactions on Wireless Communications, v. 16, no. 3, pp. 1609–1618, doi: 10.1109/TWC.2017.2649521, 2017.
- [9] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, *Energy-constrained modulation optimization*, IEEE Transactions on Wireless Communications, v. 4, no. 5, pp. 2349–2360, 2005.
- [10] O. K. Rayel, J. L. Rebelatto, R. D. Souza, B. F. Ucha-Filho, and Y. Li, *Energy efficiency of network coded cooperative communications in nakagami-m fading*, IEEE Signal Processing Letters, v. 20, no. 10, pp. 960–963, 2013.
- [11] M. C. de Almeida Castro, *Taxas alcançáveis e projeto de códigos para o canal de retransmissão bidirecional*, Tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina. Online: http://www.bu.ufsc.br/teses/PEEL1703-T.pdf, 2016.
- [12] C. Fragouli and E. Soljanin, *Network coding applications*, Foundations and Trends in Networking, v. 2, no. 2, pp. 135–269, doi: 10.1561/13000000013, 2008.
- [13] T. Rault, A. Bouabdallah and Y. Challal, *Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down survey*, Computer Networks Journal, vol. 67, pp. 104–122, doi: https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.03.027, julho de 2014.