

Eficiência Energética em Redes de Sensores

Two-Way com Seleção de *Relays*

Nathalia dos Santos Silva, Lucas Dias Hiera Sampaio, Taufik Abrão

Resumo—Neste artigo é analisada a relação entre eficiência energética e probabilidade de *outage* em redes de sensores com seleção de *relays*. Através de critérios para melhor utilização dos recursos disponíveis na rede, como espectro e energia, é possível decidir, em cenários práticos, se a seleção de um único *relay* apresenta melhor desempenho versus compromisso ou se a seleção de múltiplos *relays* é mais oportuna. São derivadas e adaptadas expressões analíticas, e os resultados numéricos são corroborados de forma gráfica e por simulação computacional. Finalmente, apontamentos acerca do melhor esquema de transmissão, conforme características da própria rede, são oferecidos.

Palavras-Chave—Max Min, Redes Cooperativas, Probabilidade de *Outage*, Eficiência Energética, Redes Sem Fio de Sensores

Abstract—This paper analyses the dependence between outage probability and energy efficiency in wireless sensors networks with relay selection procedures. Considering different criteria like the best use of network resources such as spectrum and energy, it is possible to imply which relay selection scheme is the most appropriate for each practical scenario, if a single relay or multiple relays is more suitable. Our numerical expressions for the associated outage probability and energy efficiency are presented while numerical results obtained through computational simulations corroborate the mathematical expressions. Finally, implications about the best transmission scheme are offered for each network configuration discussed.

Keywords—Max Min, Cooperative Networks, Outage Probability, Energy Efficiency, Wireless Sensors Network

I. INTRODUÇÃO

Explorando a diversidade espacial e a combinação coerente de sinais, redes cooperativas aumentam a confiabilidade do sistema, a qual pode ser mensurada pela taxa de erro de bit (BER) ou probabilidade de *outage*. Uma vez que a potência usada na transmissão não cooperativa, em geral, tende a ser maior para vencer a perda de percurso, pois este efeito não é linear, a eficiência energética (EE) do sistema pode ser melhorada substancialmente através da diversidade espacial.

A garantia na melhoria da eficiência energética é obtida pelo algoritmo de seleção de *relay*, o qual realiza o compromisso entre desempenho e recursos disponíveis (essencialmente energia e banda), já que não é interessante usar o número máximo de *relays* disponíveis, pois o ganho na ordem de diversidade é limitado de acordo com o número ideal de *relays* selecionados para cada esquema de transmissão.

No contexto de redes de sensores, os objetivos têm sido o aumento do tempo de vida de rede, a redução da BER,

bem como o incremento na tolerância à falhas [1], o que garante uma maior confiabilidade em aplicações que exigem resposta em tempo real e lidam com situações de emergência, segurança, desastres naturais, entre outros. Na discussão sobre as arquiteturas e as tecnologias mais propícias para aplicação nos sistemas 5G de redes internas e externas de comunicação sem fio [2] destacam-se: MIMO denso, comunicação energeticamente eficiente, redes de rádios cognitivos e comunicação com linha de visada (LOS). Redes cooperativas aumentam a eficiência energética do sistema, e ainda podem formar um arranjo virtual de antenas para implementar MIMO denso e/ou prover linha de visada.

Por sua vez, o uso mais racional da energia tem sido intensamente explorado no contexto das telecomunicações, pois é mais útil conhecer a maior razão entre a quantidade de informação transmitida por unidade de energia que pode ser utilizada, i.e., maior eficiência energética, do que estabelecer o ponto de operação do sistema correspondente ao menor consumo de energia. Neste trabalho propõe-se determinar os melhores pontos de operação para os esquemas de seleção de *relay*, relacionando os níveis de potência que ponderam qualidade e desempenho em termos de EE.

Um nó de uma rede de sensores ter sua bateria esgotada pode significar a queda de toda a rede; assim, EE tem sido objeto de intenso estudo nos últimos anos, principalmente em aplicações de redes de sensores e redes sem fio [3]; por exemplo, em [4] buscou-se esquemas energeticamente eficientes sob parâmetros realistas, e foram constatados resultados diferentes dos encontrados na literatura até então.

A seguir, a seção II descreve o modelo do sistema; a probabilidade de *outage* é analisada na seção III. A seção IV discute a eficiência energética como métrica de QoS; resultados numéricos de simulação são analisados na V; as conclusões são apresentadas na seção VI.

II. MODELO DO SISTEMA

O cenário adotado para análise é composto por 2 nós denominados *source* e *sink* (ou *destination*), representados respectivamente pelos subscritos¹ *s* e *d*, sendo que a comunicação entre estes nós é bidirecional, caracterizando uma comunicação *two-way*. Essa comunicação é auxiliada pelo nó *relay*, escolhido dentre os *relays* disponíveis na área de cobertura circular entre *source* e *sink*. Todos os nós envolvidos no processo de transmissão sofrem com efeitos de desvanecimento de pequena e larga escala.

Nathalia dos Santos Silva, Lucas Dias Hiera Sampaio e Taufik Abrão Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina-PR, Brasil, E-mails: nssilva@gmail.com, taufik@uel.br, lucas.dias.sampaio@gmail.com.

¹visando manter a nomenclatura tradicionalmente usada em redes cooperativas

A. Modelo de Canal

Na perda de percurso entre os nós i e j será usada a variável determinística ϱ_{ij} , descrita pela equação [5]:

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

sendo $G = G_{tx}G_{rx}$ o ganho combinado das antenas de transmissão e recepção, respectivamente, G_{tx} e G_{rx} ; o comprimento de onda da portadora em metros é dado por $\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{f_c}$, a frequência da portadora f_c é dado em Hertz; d_{ij} é a distância em metros entre os nós i e j envolvidos na transmissão, ν é o expoente da perda de percurso, o qual caracteriza a densidade de construção do ambiente, \mathcal{L} é a margem de enlace e N_f é a figura de ruído do receptor, que depende da frequência e do amplificador de baixo ruído (LNA) empregado.

Para o efeito de multipercurso é considerado um canal plano, lento e NLOS, modelado em sua amplitude por uma distribuição estatística de *Rayleigh* e em sua fase por uma distribuição uniforme, representado pela variável aleatória (v.a.) complexa h_{ij} . Nas descrições dos símbolos ao longo do trabalho os índices i e j podem representar nós *relays*, nó transmissor ou nó receptor.

B. Esquemas de Transmissão

Os esquemas de transmissão utilizados envolvem um ou mais *relays* que atuam como retransmissores. Nenhum *relay* está apto para receber e enviar informação simultaneamente, portanto a transmissão é realizada em 2 *slots* de tempo.

1) *Single Relay Selection (SR)*: No esquema mais simples, com a seleção de um *relay*, denominado de *single relay selection* (SR), é escolhido o melhor *relay* para atuar na retransmissão a partir do critério Max-Min. Neste esquema o *relay* recebe informação do usuário 1 e do usuário 2, amplifica o sinal resultante destas duas informações e as retransmite para os 2 usuários. Cada usuário recebe então a informação que enviou, que se torna uma interferência, e a informação enviada pelo outro, que é a de interesse. Uma vez que cada nó conhece sua própria informação, procede-se de forma imediata o cancelamento do sinal. A SNR para este modelo é dada por γ_{12} para o usuário 1 e γ_{21} para o usuário 2:

$$\gamma_{12} = \frac{P_2 P_i \varrho_{1i} \varrho_{2i} |h_{1i}|^2 |h_{2i}|^2}{P_n \varrho_{1i} |h_{1i}|^2 (P_i + P_1) + P_n P_2 \varrho_{2i} |h_{2i}|^2 + P_n^2} \quad (2)$$

$$\gamma_{21} = \frac{P_1 P_i \varrho_{1i} \varrho_{2i} |h_{1i}|^2 |h_{2i}|^2}{P_n \varrho_{2i} |h_{2i}|^2 (P_i + P_2) + P_n P_1 \varrho_{1i} |h_{1i}|^2 + P_n^2} \quad (3)$$

2) *Multiple Relay Selection (MR)*: Com o objetivo de agregar confiabilidade ao sistema, através do aumento da diversidade, foi proposta a utilização de mais *relays* atuando de forma redundante para retransmitir as informações de interesse, sendo que estes *relays* também são escolhidos através do método Max-Min e retransmitem a informação em seu *timeslot*. O que garante que a ordem de diversidade deste sistema seja maior é a combinação coerente das cópias no destino, isto é, ponderar o peso das cópias conforme a intensidade dos sinais que chegam no nó d após passar pelos canais com desvanecimentos. As SNRs para este modelo são

dadas pelas equações (4) e (5), considerando \mathcal{G} o conjunto dos g *relays* selecionados para colaborar na transmissão.

$$\gamma_{12} = \sum_{i=1, i \in \mathcal{G}}^g \frac{P_2 P_i \varrho_{1i} \varrho_{2i} |h_{1i}|^2 |h_{2i}|^2}{P_n \varrho_{1i} |h_{1i}|^2 (P_i + P_1) + P_n P_2 \varrho_{2i} |h_{2i}|^2 + P_n^2} \quad (4)$$

$$\gamma_{21} = \sum_{i=1, i \in \mathcal{G}}^g \frac{P_1 P_i \varrho_{1i} \varrho_{2i} |h_{1i}|^2 |h_{2i}|^2}{P_n \varrho_{2i} |h_{2i}|^2 (P_i + P_2) + P_n P_1 \varrho_{1i} |h_{1i}|^2 + P_n^2} \quad (5)$$

III. PROBABILIDADE DE OUTAGE EM CANAIS RELAYS

Probabilidade de interrupção ou *outage* em comunicações (*outage probability*) é uma medida de desempenho ou mesmo de QoS alternativa à BER, cuja ocorrência é determinada pela condição instantânea do canal, obtida pela SNR instantânea abaixo de um limiar γ_{th} . Assim, toda vez que ocorrer $SNR < \gamma_{th}$ diz-se que a comunicação do sistema foi interrompida [5], [6]. De forma equivalente, o sistema de comunicação entrará em *outage* toda vez que a informação mútua associada ao canal de comunicação² for menor do que a taxa de dados mínima requerida pelo sistema [7], [8].

$$I < R \quad (6)$$

Para cada cenário de transmissão há uma expressão analítica para probabilidade de *outage* associada, e algumas expressões são computacionalmente custosas, dessa forma, visando uma abordagem prática com tempo de execução factível serão utilizadas neste trabalho expressões aproximadas da probabilidade de *outage* obtidas analiticamente, desenvolvidas em [9], [10] e adaptadas ao cenários de interesse e detalhadas em [11].

A. Probabilidade de Outage com Seleção de Relay (SR)

Aqui, a expressão da aproximação da P_{out} do trabalho de [10] foi adaptada para esquemas com um número a de *relays* disponíveis e seleção de um único relay para cooperação com protocolo AF. Uma vez que a transmissão é *two-way*, o sistema pode entrar em *outage* sempre que a taxa atingida em uma das vias de transmissão for menor que uma taxa mínima³ R associada ao QoS. Este conceito é equivalente ao conceito do método de seleção Max-Min, descrito analiticamente por:

$$\Pr[I_{SR} < R] = \prod_{\iota=1}^a \Pr[\min(\gamma_{12\iota}, \gamma_{21\iota}) < 2^{2R} - 1], \quad \iota \in \mathcal{A} \quad (7)$$

sendo ι o *relay* escolhido dentre a *relays* do conjunto \mathcal{A} de *relays* disponíveis. A aproximação desenvolvida em [10], para o mesmo cálculo é adaptada neste trabalho, resultando:

$$\Pr[I_{SR} < R] \approx \left(\frac{P}{P_n}\right)^{-a} \cdot \prod_{i=1}^a \left[6 \left(\frac{1}{\sigma_{1i}^2} + \frac{1}{\sigma_{2i}^2}\right) 2^{2R} - 1\right], \quad (8)$$

$$\text{sendo} \quad \frac{P}{P_n} = \frac{(P_1 + P_2 + P_i) \sqrt{\varrho_{1i}} \sqrt{\varrho_{2i}}}{N_0 B} \quad (9)$$

²Em nosso caso de interesse, o canal cooperativo *two-way*.

³Mesmo com o auxílio do melhor *relay* disponível.

B. Probabilidade de Outage com Seleção de Múltiplos Relays (MR)

A partir da expressão da aproximação da P_{out} obtido em [10], deriva-se uma expressão para a P_{out} no método MR, com a relays disponíveis e g selecionados. Assim, a comunicação entre fonte e destino entrará em *outage* se nenhum dos g relays selecionados resultar em uma SNR aceitável. Utilizando o conceito do método de seleção Max-Min, e sabendo que a SNR resultante é a soma das SNRs dos g relays escolhidos, obtida em (4) e em (5), a expressão para P_{out} pode ser descrita por:

$$\Pr[I_{\text{MR}} < R] = g \cdot \prod_{i=1}^a \Pr[\min(\gamma_{12i}, \gamma_{21i}) < 2^{2R} - 1] \quad (10)$$

sendo i os índices dos relays escolhidos a partir do conjunto \mathcal{A} de relays disponíveis e combinados no subconjunto \mathcal{G} de relays selecionados, contendo a relays. Desta forma, a aproximação desenvolvida em [10] é adaptada ao contexto deste trabalho de acordo com a equação:

$$\Pr[I_{\text{MR}} < R] \approx \left(g \cdot \frac{P}{P_n}\right)^{-a} \cdot \prod_{i=1}^a \left[6 \left(\frac{1}{\sigma_{12i}^2} + \frac{1}{\sigma_{21i}^2}\right) 2^{2R} - 1\right] \quad (11)$$

IV. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Matematicamente, pode-se definir EE pela razão entre a quantidade de informação recebida corretamente e a respectiva quantidade de energia total despendida neste processo de transmissão, ou de forma mais imediata, EE é a relação entre a taxa média líquida de bits corretamente recebidos por segundo pela potência total média utilizada [12]:

$$\xi_e = \frac{r}{P_t} \left[\frac{\text{bits}}{\text{Joule}} \right], \quad \text{sendo} \quad (12)$$

r : a taxa de transmissão, em bits/s;

P_t : potência total do sistema utilizada na viabilização da transmissão, composta pela potência de rádio frequência para transmissão e a potência de circuito do nó transmissor e dos relays retransmissores.

Esse modelo de consumo de potência é frequentemente usado por autores da área [13], [12] pois é razoável admitir uma composição do consumo de energia total em potência fixa de circuito e potência variável de transmissão associada à rádio frequência.

1) *Confiabilidade \times Eficiência Energética*: Neste trabalho, a análise de melhor ponto de operação na rede cooperativa é feita sob o ponto de vista de P_{out} e EE, sendo que o objetivo é identificar a região de operação da rede que atenda simultaneamente à confiabilidade, dada por um limiar de probabilidade de *outage* aceitável $QoS^{P_{\text{out}}}$, e de eficiência energética próxima à maxEE, i.e., dada uma certa tolerância em torno da maxEE⁴, quantificada pelo indicador QoS^{tol} .

Desta forma o processo de otimização neste trabalho tem como entrada parâmetros reais de aplicação de redes sem

⁴Em termos práticos, não é necessário que a rede opere estritamente no ponto de máxima Eficiência Energética, mas em uma região próxima ao ponto de ótimo; essa otimização deve ser flexível tendo em vista atender limitações físicas/práticas ou tipológicas da rede.

fiu: distância entre nós, descrição do canal quanto aos desvanecimentos de pequena e larga escala e ruído de fundo etc. Como dados de saída desse processo sistemático obter-se-á uma resposta à questão pertinente no gerenciamento de uma rede de sensores: qual esquema ou modo de operação atinge simultaneamente maxEE e confiabilidade aceitável de transmissão?

Sendo assim, a média de bits enviados corretamente no contexto da métrica EE pode ser aproximado através da P_{out} e da taxa de transmissão do sistema:

$$\xi^{P_{\text{out}}} = \frac{(1 - P_{\text{out}}) \cdot r}{P_t} \left[\frac{\text{bits}}{\text{Joule}} \right], \quad (13)$$

Assim, a expressão da eficiência energética gerada a partir da aproximação de P_{out} com seleção de relay SR pode ser escrita:

$$\xi^{P_{\text{out}}} = \left(1 - \left(\frac{P}{P_n}\right)^{-a} \cdot \prod_{i=1}^a \left[6 \left(\frac{1}{\gamma_{12i}} + \frac{1}{\gamma_{21i}}\right) 2^{2R} - 1\right]\right) \cdot \frac{2r}{P_t} \quad (14)$$

sendo P_t a potência total consumida pelo sistema, dada por:

$$P_t = P_1 + P_2 + P_i + P_1^c + P_2^c + P_i^c + a \cdot P_o^c, \quad (15)$$

sabendo que P_1 , P_2 e P_i são as potências de rádio frequência para transmissão dos usuários 1 e 2 e do relay, respectivamente; P_1^c , P_2^c e P_i^c são as potências de circuito dos mesmos; P_o^c é a potência de circuito dos nós disponíveis para seleção de relay (escolhido ou não).

De forma equivalente, a expressão da Eficiência Energética para os cenários com seleção de múltiplos relays é:

$$\xi^{P_{\text{out}}} = \left(1 - \left(g \cdot \frac{P}{P_n}\right)^{-a} \cdot \prod_{i=1}^a \left[6 \left(\frac{1}{\gamma_{12i}} + \frac{1}{\gamma_{21i}}\right) 2^{2R} - 1\right]\right) \cdot \frac{2r}{P_t} \quad (16)$$

sendo a potência total utilizada pelo sistema dada por:

$$P_t = P_1 + P_2 + g \cdot P_i + P_1^c + P_2^c + g \cdot P_i^c + a \cdot P_o^c, \quad (17)$$

A fim de determinar a maxEE em redes cooperativas sujeito às restrições de energia máxima disponível ($\mathcal{P} \cdot T$) e taxa mínima de dados a ser alcançada em cada nó o seguinte problema de otimização é apresentado:

$$\begin{aligned} &\text{maximize} && \xi^{P_{\text{out}}} = \frac{(1 - P_{\text{out}}) \cdot r}{P_t} && (18) \\ &\text{sujeito a} && P_t \leq \mathcal{P} \\ &&& r = \min\{R_{\kappa,i}\} \geq R, \kappa \in \{(1,2), (2,1)\}, i \in \mathcal{G} \end{aligned}$$

sendo R a mínima taxa líquida de dados a ser transferida entre os usuários 1 e 2; P_{out} é a probabilidade de *outage* e depende diretamente topologia da rede; e \mathcal{P} é a máxima potência disponível na rede. A solução pode ser obtida através de métodos já conhecidos de otimização ou como o proposto neste trabalho, através da combinação gráfica das curvas na figura de mérito.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A Tabela I sumariza os parâmetros fixos de simulação, obtidos conforme aplicações existentes, buscando representar um modelo de rede de sensores realístico; já a Tabela II organiza os parâmetros tendo em vista a análise das expressões

TABELA I
 PARÂMETROS FIXOS DE SIMULAÇÃO

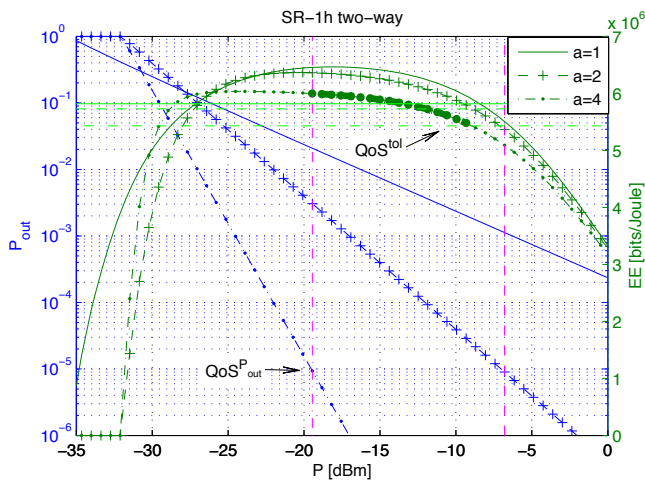
Parâmetro CoopNet	Valor
Modulação	BPSK
Taxa de transmissão	$R = 10$ $\frac{\text{kbits}}{\text{s}}$
PSD AWGN	$N_0 = -114$ $\frac{\text{dBm}}{\text{Hz}}$
Largura de banda	$B = 20$ kHz
Ganho combinado das antenas	$G = G_{\text{tx}}G_{\text{rx}} = 12$ dB
Frequência da portadora	$f_c = 900$ MHz
Protocolo de retransmissão	AF
Realizações	$\mathcal{I} = 10^7$
Método de Seleção	Max Min
Distância entre S-D	$d = 50$ [m]
Expoente da perda de percurso	$\nu = 4,0$
Margem de Enlace	$\mathcal{L} = 8$ dB
Figura de ruído	$N_f = 5$ dB
QoS ^{P_{out}}	$P_{\text{out}} < 10^{-5}$
QoS ^{tol} em relação à max(EE)	10 %

TABELA II

PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO ESPECÍFICOS PARA SR E MR

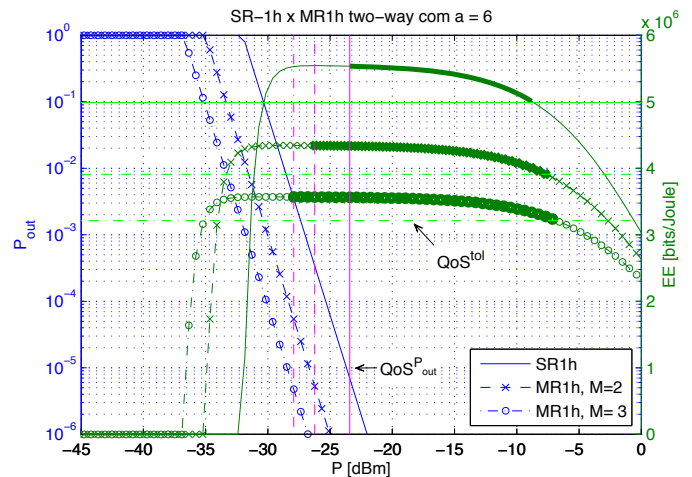
Parâmetros do SR	Valor
Potência de Tx, nó 1 e 2	$P \in [-34; 5]$ [dBm]
Potência de Tx, nó relay	$P \in [-34; 5]$ [dBm]
Intervalo de SNR	$\text{SNR} \in [37; 76]$ [dB]
Pot. circuito, nó selec.	$P_1^c = P_2^c = P_i^c = 1$ [mW]
Pot. circuito, nó não-selec.	$P_o^c = 0,1$ [mW]
Relays disponíveis	$a = \{1, 2, 4\}$
Relays selecionados	$c = 1$
Parâmetros do MR	Valor
Potência de Tx, nó 1 e 2	$P \in [-44; 5]$ [dBm]
Potência de Tx, nó relay	$P \in [-44; 5]$ [dBm]
Intervalo de SNR	$\text{SNR} \in [27; 76]$ [dB]
Pot. circuito, nó selec.	$P_1^c = P_2^c = P_i^c = 1$ [mW]
Pot. circuito, nó não-selec.	$P_o^c = 0,1$ [mW]
Relays disponíveis	$a = 6$
Relays selecionados	$c = \{1, 2, 3\}$

de EE e P_{out} , variáveis conforme o esquema SR e MR. As Figuras 1 e 2 apresentam a região de operação desejável como solução do problema de otimização em (18). Na prática, define-se o intervalo de potência de transmissão que satisfaça simultaneamente aos dois requisitos de QoS (P_{out} e maxEE), sendo a mínima potência delimitada pela linha vertical na cor rosa, correspondente à máxima P_{out} aceitável, e a máxima potência aquela que consegue manter o sistema com 90 % do valor da maxEE alcançável, delimitada pela linha horizontal na cor verde.


 Fig. 1. Desempenho em EE e P_{out} com Seleção de Relay (SR) em Canais Two-way.

A Fig. 1 ilustra a EE e a P_{out} em função da potência de transmissão; nota-se que a ordem de diversidade aumenta

conforme o número de relays disponíveis a seja incrementado (1, 2 e 4), com seu valor aproximando-se do valor teórico⁵ quando $P \rightarrow \infty$. Entretanto, o valor de maxEE atingível não apresentou variação substancial em função do número de relays disponíveis, pois há uma melhora na quantidade de bits corretos em contrapartida há um aumento da energia total consumida. Para todos os casos analisados, a potência de circuito soma no mínimo 3 mW, um valor muito maior que a potência de transmissão disponível, cerca de 10^{-4} mW. Assim, a potência que exerce maior influência no cálculo da EE para valores de potência de transmissão menores que -10 dBm é a potência fixa de circuito. Por esse motivo também, o formato das curvas tem uma leve alteração conforme a variação de relays disponíveis. A máxima EE é atingida quando a taxa de informação líquida é maior, combinado à mínima potência de transmissão para tal, o que acontece em cerca de $P \approx -18$ dBm para $a = 1$, -23 dBm para $a = 2$ e -28 dBm para $a = 3$. Para potências de transmissão menores, o sistema não atinge taxas de dados adequadas (determinada pela P_{out}), e para potências de transmissão maiores, o ganho em P_{out} não compensa a substancial redução na EE provocada pelo aumento da potência de transmissão. Como a maior taxa de dados líquida é determinada pelo QoS^{P_{out}}, quando há mais relays disponíveis o ponto de máxima EE será deslocado para a esquerda, por exemplo, um ponto notável no gráfico é quando $P = -27$ dBm, a P_{out} para $a = 2$ e $a = 1$ é a mesma, e a EE para $a = 2$ é ligeiramente menor que para $a = 1$, isso porque para manter um relay a mais disponível, há um consumo adicional de potência de circuito em modo espera (standby) de $P_o^c = 0,01$ mW.


 Fig. 2. Desempenho em EE e P_{out} com Seleção de Múltiplos Relays (SR e MR) em Canais Two-way.

A Fig. 2 compara SR e MR em canais Two-way; percebe-se que com o aumento do número de relays selecionados g , a confiabilidade do sistema melhora ainda mais, como era esperado, a curva da P_{out} se desloca à esquerda, o que também faz com que a rede requiera menos potência de transmissão (início da curva de EE) para atingir os mesmos 3×10^6 [bits/J] em EE. Obviamente, ao se combinar mais relays utiliza-

⁵A ordem de diversidade é a taxa de inclinação do gráfico da BER ou P_{out} , e teoricamente o coeficiente angular da reta (em condições de SRN assintóticas) aproxima-se do número de relays disponíveis para seleção.

se mais P_t , entre potência de transmissão e de circuito, o que faz diminuir os valores de máxima EE alcançável de aproximadamente $5,6 \times 10^6$ para $3,6 \times 10^6$. Note-se que o objetivo deste trabalho é manter uma certa confiabilidade de operação da rede com sob maxEE; uma vez que o aumento da potência afeta substancialmente a maxEE alcançável, para os valores adotados de P_i^c e P_i , a rede de sensores sem fio neste contexto opera com melhor compromisso EE \times P_{out} sob o esquema SR.

Mantendo os mesmos parâmetros do sistema, fez-se uma análise em relação ao *throughput* da rede sem fio e sua respectiva eficiência energética; o resultado pode ser observado na Fig. 3. Uma vez que exige-se a garantia de um mínimo de QoS, o *throughput* é o mesmo atingido para todas as configurações distintas de a e g, impactando obviamente na potência mínima necessária para se atingir aquele *throughput* total, alterando-se por conseguinte o ponto de max EE.

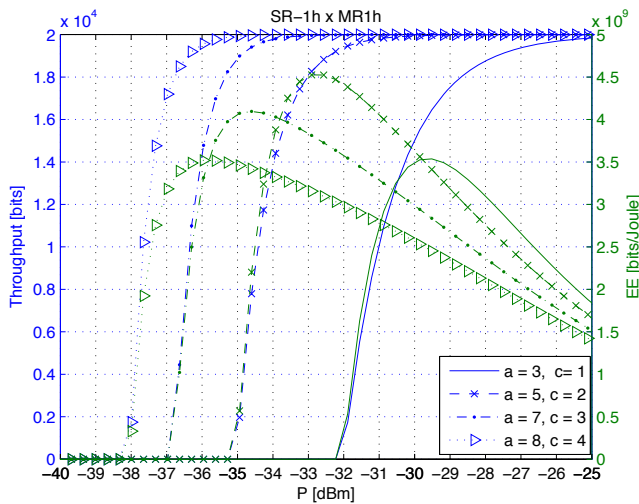


Fig. 3. Desempenho em EE e *Throughput* em SR e MR.

Sabe-se que incrementar indefinidamente o número de *relays* disponíveis e/ou selecionados não traz melhoria no compromisso EE \times confiabilidade; assim, a EE foi determinada para cada combinação no MR, conforme Fig. 4. O melhor ponto de operação para uma rede sem fio cooperativa MR operando no modo de max-EE com atendimento aos requisitos de QoS é, como destacado no gráfico, $a = 4$ e $g = 4$.

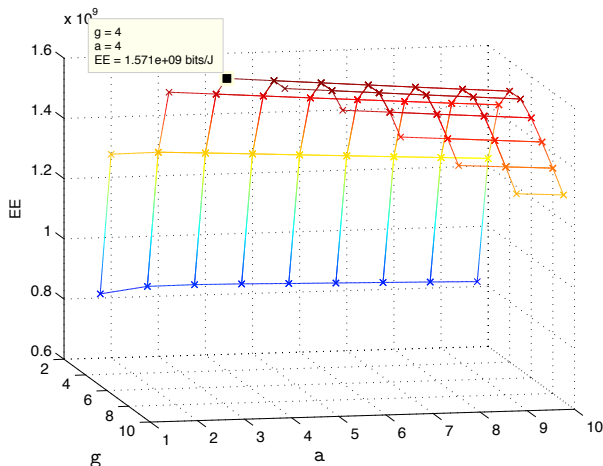


Fig. 4. Desempenho em EE em MR; $a \in [1, \dots, 10]$ e $g \in [2, \dots, 10]$.

VI. CONCLUSÕES

Sob o ponto de vista de operação sob maxEE, os esforços no projeto de redes de sensores devem se concentrar na redução do consumo de potência de circuitaria, o qual destaca-se no cálculo da potência total do sistema, já que em cenários de redes de sensores uma reduzida potência de transmissão é em geral suficiente para garantir os requisitos de QoS.

Para distâncias de 50 metros na configuração de um *relay* para retransmissão, mantendo 3 *relays* disponíveis é possível garantir uma maior EE da rede, uma menor potência total alocada, bem como o melhor desempenho possível dada a SNR resultante. Por outro lado, quando se permite combinar número maior de 10 *relays* adequadamente escolhidos, para a mesma distância de 50 m, quando o objetivo é atingir simultaneamente confiabilidade e maxEE, a melhor configuração consiste em utilizar os 4 melhores *relays* para retransmissão: $a = g = 4$.

Para cenários atuais de interesse prático, incluindo ambientes cada vez mais automatizados e com necessidade de interconectividade maior, essa relação é muito promissora, pois permite a obtenção de melhores resultados a partir dos recursos da própria rede.

REFERÊNCIAS

- [1] G.S. Vadivel, K. Mundada, and P. Kanjalkar. Failsafe wireless sensor network using cooperative communication. In *Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 2014 International Conference on*, pages 1–4, Tamilnadu, India, Jan 2014. IEEE.
- [2] Cheng-Xiang Wang, F. Haider, Xiqi Gao, Xiao-Hu You, Yang Yang, Dongfeng Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir. Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks. *Communications Magazine, IEEE*, 52(2):122–130, February 2014.
- [3] Hyuck Kwon and T.G. Birdsall. Channel capacity in bits per joule. *Oceanic Engineering, IEEE Journal of*, 11(1):97–99, Jan 1986.
- [4] Glauber Gomes de Oliveira Brante. *Esquemas eficientes de comunicação digital e analógica com diversidade espacial e cooperativa*. Tese de doutorado, Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.
- [5] A. Goldsmith. *Wireless Communications*. Cambridge, New York, NY, USA, 2005.
- [6] In-Ho Lee. Outage performance of efficient partial relay selection in amplify-and-forward relaying systems over rayleigh fading channels. *Communications Letters, IEEE*, 16(10):1644–1647, 2012.
- [7] J.N. Laneman, G.W. Wornell, and D.N.C. Tse. An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks. In *Information Theory, 2001. Proceedings. 2001 IEEE International Symposium on*, page 294, Washington, DC, 2001. IEEE.
- [8] K. J. R. Liu, Ahmed K. Sadek, Weifeng Su, and Andres Kwasinski. *Cooperative Communications and Networking*. Cambridge University Press, New York, NY, USA, 2009.
- [9] J. Nicholas Laneman. *Cooperative diversity in wireless networks: algorithms and architectures*. Tese de doutorado, Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2002.
- [10] Y. Yang, J.H. Ge, Y.C. Ji, and Y. Gao. Performance analysis and instantaneous power allocation for two-way opportunistic amplify-and-forward relaying. *Communications, IET*, 5(10):1430–1439, July 2011.
- [11] Nathalia dos S. Silva. *Desempenho-Complexidade em Redes Cooperativas Amplifica e Transmite com Seleção de Relays*. Dissertação, Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, 2014.
- [12] Yulin Hu, James Gross, Anke Schmeink, and Tong Wang. Maximizing energy efficiency for multiple df relay system with QoS constraint. In *The Tenth International Symposium on Wireless Communication Systems 2013, ISWCS '10*, pages 419–423, Ilmenau, Germany, August 2013. RWTH Aachen University.
- [13] A Moragrega, C. Ibars, and Yan Geng. Energy efficiency of a cooperative wireless sensor network. In *Second International Workshop on Cross Layer Design, 2009., IWCLD '09*, pages 1–5, Palma de Mallorca, June 2009. IEEE.