

# Eficiência Energética e Otimização do Tamanho do *Payload* em Redes de Sensores Sem Fio Utilizando Códigos Convolucionais

Maurício Menon\*, Glauber Brante\*, Richard Demo Souza\*, Fábio A. Souza\* e Marcelo Eduardo Pellenz†

**Resumo**— Este trabalho estuda o impacto energético da otimização do tamanho do *payload* de códigos convolucionais em um enlace sem fio ponto-a-ponto dentro de uma rede de sensores. Consideram-se dois modelos de canal, AWGN e Rayleigh, visando representar cenários com diferentes características quanto à severidade de enlace. Nesse contexto, faz-se o estudo da otimização da relação sinal-ruído, da taxa de código empregada, bem como a otimização do tamanho do *payload* para diferentes condições de transmissão. Os dados numéricos obtidos através de simulação demonstram que existe um ponto ótimo para o tamanho do *payload*, que varia com a distância de transmissão e que proporciona ganhos em termos de eficiência energética, especialmente em enlaces de curta distância.

**Palavras-Chave**— Códigos convolucionais, eficiência energética, comunicações sem fio, rede de sensores sem fio.

**Abstract**— This paper studies the impact of the payload size in the energy efficiency using convolutional codes in a point-to-point link in a wireless sensor network. Two channel models are considered, AWGN and Rayleigh, representing distinct conditions with respect to the severity of the link. In this context, signal-to-noise ratio, code rate and payload size are optimized. The numeric results obtained through simulations show that there is an optimal point for the payload size, which depends on the transmission distance, and which provides gains in the overall energy efficiency, especially in short range links.

**Keywords**— Convolutional coding, energy efficiency, wireless communications, wireless sensor network.

## I. INTRODUÇÃO

Durante muito tempo o desenvolvimento de novas soluções na comunicação sem fio teve como foco a melhoria de desempenho baseada no aumento da eficiência espectral ao custo de maior consumo de energia [1]. As redes de sensores sem fio, bem como o crescente desenvolvimento em “internet das coisas”, contribuíram significativamente para que a eficiência energética se tornasse um tema central em pesquisas, tendo em vista que a motivação ambiental e econômica convergem na otimização de recursos energéticos escassos, especialmente em dispositivos alimentados por baterias [2].

Grande parte dos dispositivos sensores ligados por meio de uma rede sem fio emprega técnicas de correção de erros, que trazem ganhos de confiabilidade ao enlace ao custo de consumo maior de energia. A codificação escolhida também

tem grande impacto no estudo da eficiência energética. Entre os principais códigos utilizados tem-se o BCH, generalização do código de Hamming para correção de erros múltiplos [3]. Em [4] a codificação BCH foi utilizada em conjunto com a otimização da relação sinal-ruído (SNR) assim como da taxa de código. Foi apresentado um amplo modelo de consumo energético, englobando desde a potência de transmissão, consumo dos circuitos de RF e consumo de banda base para codificação e decodificação. Já os autores em [5] apresentam uma análise de eficiência energética em um meio de transmissão sub-aquático, que traz características bastante distintas do meio de comunicação sem fio, bem como dos resultados das otimizações empregadas. Além disso, códigos convolucionais de decisão abrupta são considerados em [5], os quais possuem desempenho superior à codificação em blocos [3]. Entretanto, o foco destes trabalhos é na minimização da energia utilizada e não no estudo da eficiência energética. Neste aspecto, uma análise de eficiência energética pode ser encontrada em [6], o qual analisou o efeito da otimização do tamanho do *payload* de códigos BCH. Entretanto, a análise em [6] não considerou o consumo de energia dos circuitos de transmissão e recepção, bem como empregou códigos de taxa fixa.

Ademais, muitas vezes a capacidade de correção do código utilizado não é suficiente e é necessário combinar técnicas de retransmissão aos códigos corretores (HARQ) [7]. Por exemplo, a eficiência energética de HARQ empregando códigos convolucionais foi analisada em [8]–[10]. Entretanto, o consumo dos circuitos eletrônicos e do processamento em banda base não foi considerado por estes trabalhos. Ainda, a eficiência energética de alguns diferentes esquemas HARQ são estudados em [11] no canal Nakagami-*m*. O estudo mostra que a otimização da taxa de código é fundamental para maximizar a eficiência energética, bem como o uso de HARQ estende substancialmente o alcance de comunicação.

Este artigo apresenta o estudo de HARQ empregando códigos convolucionais em uma rede de sensores sem fio. Diferentemente de trabalhos anteriores (*e.g.*, [4]–[6], [8]–[11]), o foco está na otimização do tamanho do *payload*, visando maximizar a eficiência energética, em um cenário que também permite otimizar a taxa de codificação dos códigos convolucionais, bem como a SNR de operação do enlace. Além disso, diferente de [6], o modelo de consumo de energia empregado aqui considera o custo de transmissão, dos circuitos eletrônicos de RF, bem como o custo de codificação e decodificação dos pacotes, além da possibilidade de retransmissões. Ademais, buscando representar cenários com diferentes características

\* CPGEI, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba-PR, Brasil. E-mails: menon@itaipu.gov.br, gbrante@utfpr.edu.br, richard@utfpr.edu.br, fabiosouza@ifsc.edu.br.

† PPGIa, Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR), Curitiba-PR, Brasil. E-mail: marcelo@ppgia.pucpr.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e CNPq.

quanto à severidade da comunicação, consideram-se dois modelos para o canal: AWGN e Rayleigh de desvanecimento rápido. Os resultados mostram que existe um tamanho ótimo para o *payload* que maximiza a eficiência energética, que depende da distância de transmissão do enlace. No geral, se observa que pacotes de tamanho maior otimizam a eficiência energética do canal AWGN em comparação com o canal Rayleigh. Além disso, a otimização desse parâmetro aumenta significativamente a eficiência energética, em maior proporção do que o aumento ocasionado pela otimização apenas da SNR e taxa de código.

No restante do artigo, a Seção II modela o consumo de energia, ao passo que a eficiência energética é definida na Seção III. A Seção IV apresenta a otimização do tamanho do *payload*, enquanto a Seção V traz alguns resultados de simulação. Por fim, a Seção VI conclui o artigo.

## II. MODELO DE CONSUMO DE ENERGIA

Analisam-se os componentes do consumo de energia para um nó de uma rede de sensores sem fio que transmite um pacote de dados e recebe o pacote de retorno correspondente. Assume-se que cada pacote transmitido adiante corresponde a um pacote de retorno na direção inversa, o qual informa a recepção correta ou solicita uma retransmissão [12]. Na sequência, a Seção II-A analisa o consumo de energia da transmissão e dos componentes de RF associados, enquanto a Seção II-B analisa o consumo de energia em banda base.

### A. Consumo de Energia dos Componentes Eletrônicos e de Transmissão

Inicialmente, assume-se que o transmissor está em modo de baixo consumo de energia e deve ser inicializado antes de ser capaz de realizar qualquer transmissão. Dessa forma, denota-se por  $\varepsilon_{st}$  a energia total gasta na inicialização dividida pelo número de bits do *payload* ( $L$ ) que serão transmitidos antes do nó voltar ao modo de economia de energia.

Além disso, define-se  $r = k/n$  como a taxa de código, na qual  $n$  é o número de bits por palavra codificada e  $n - k$  é o número de bits redundantes. Cada pacote na interface física contém  $H$  bits referentes ao cabeçalho,  $O$  bits equivalentes referentes a transmissão de sinais de controle e sincronização (*overhead*), além do *payload* com  $rL$  bits de dados e  $(1 - r)L$  bits adicionais devido à codificação. Neste trabalho, apenas a modulação binária (BPSK) é considerada; dessa forma, o tempo médio de transmissão por bit de dados na direção direta é dado por [4]

$$T_b = \frac{H + O + L}{rLR_b}, \quad (1)$$

em que  $R_b$  denota a taxa de bits.

Assim, é possível escrever a energia por bit por pacote adiante utilizada para processamento pré-transmissão como

$$\varepsilon_{el,tx} = P_{el,tx}T_b, \quad (2)$$

na qual  $P_{el,tx}$  é o consumo dos componentes eletrônicos de RF. De forma similar, a energia por bit por pacote utilizado para radiação eletromagnética é

$$\varepsilon_{PA} = P_{PA}T_b, \quad (3)$$

onde  $P_{PA}$  é o consumo do amplificador de potência (PA), dado em função da potência de transmissão  $P_{tx}$  como sendo  $P_{PA} = \xi/\eta P_{tx}$ , em que  $\xi$  é a taxa pico-a-média fornecida na saída do PA e  $\eta$  é a eficiência de dreno do PA, ou seja, a razão entre a potência de saída RF e a potência CC quando a alimentação CC foi conectada ao dreno de um FET, tipicamente de 35% para um PA classe B [13]. Em termos da SNR média  $\bar{\gamma}$  no estágio de decisão do receptor, podemos escrever  $P_{PA}$  como [4]

$$P_{PA}(\bar{\gamma}) = \frac{\xi A_0 \sigma_n^2}{\eta} d^\alpha \bar{\gamma}, \quad (4)$$

na qual  $A_0$  é um parâmetro que depende do ganho das antenas de transmissão/recepção e do comprimento de onda,  $\sigma_n^2$  é a potência do ruído,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor e  $\alpha$  é o expoente da perda de percurso [12]. A potência do ruído pode ser expressa como  $\sigma_n^2 = N_0 W N_f M_1$ , sendo  $N_0$  a densidade espectral de potência do ruído,  $W$  é a largura de banda de transmissão,  $N_f$  é a figura de ruído na entrada do receptor e  $M_1$  é a margem no enlace a qualquer outro ruído aditivo ou interferência [13].

Por fim, cada pacote de retorno dura  $F/R_b$  segundos, sendo  $F$  o número de bits que compõe o pacote de retorno. Durante este tempo o transceptor consome  $P_{el,rx}$  Watts para os elementos eletrônicos de RF, de forma que a energia por bit utilizada para decodificação do pacote de retorno correspondente é [4]

$$\varepsilon_{fb,rx} = \frac{P_{el,rx}F}{rLR_b} = P_{el,rx}T_{fb}, \quad (5)$$

onde  $T_{fb} = \frac{F}{rLR_b}$  é o tempo de retorno por bit de *payload*.

### B. Consumo de Energia de Codificação e Decodificação

Cada procedimento de codificação envolve  $K$  tipos diferentes de operações aritméticas, cada uma com consumo de energia  $\varepsilon_k$  executada  $n_k^{enc}(r)$  vezes durante o algoritmo de codificação utilizado. Considerando que a codificação é feita para os  $rL$  bits de dados do pacote e que os cálculos são executados por uma unidade de processamento aritmético (APU), o consumo de energia da  $k$ -ésima operação é modelada por [14], onde  $\varepsilon_k = V_{dd}I_0\Delta t_k$ , na qual  $V_{dd}$  é a tensão de operação,  $I_0$  é a corrente média durante a execução dos cálculos aritméticos, a qual depende da frequência de operação  $f_{APU}$  e  $\Delta t_k$  é o tempo necessário para a  $k$ -ésima operação. A relação com o número de ciclos necessários,  $c_k$ , é  $\Delta t_k = c_k/f_{APU}$ , levando a [4]

$$\varepsilon_{enc} = \frac{V_{dd}I_0}{rLf_{APU}} \sum_{k=1}^K c_k n_k^{enc}(r). \quad (6)$$

De forma similar, pode-se definir o consumo de energia de decodificação,  $\varepsilon_{dec}$ , a partir de (6) com adaptações necessárias.

Além disso, assume-se que o codificador utiliza códigos convolucionais com  $k$  entradas,  $n$  saídas e ordem de memória  $\nu$  [3]. Neste artigo foram utilizados códigos convolucionais convencionais de memória  $\nu = 5$  e  $\nu = 6$ , listados em [15]. As taxas de código  $r$  consideram a palavra codificada de tamanho fixo, variando o conteúdo  $k$ . Dessa forma, o número total de operações por pacote é  $n_{bin-add} = rL(n\nu k + n(k-1))$  adições binárias, muitas vezes inferior a uma ordem de magnitude das operações requeridas para decodificação [5]. Para a

decodificação assume-se a utilização do Algoritmo de Viterbi com decisão abrupta, o qual é um algoritmo de máxima verossimilhança de baixa complexidade [3]. O número de operações por pacote requeridos pelo algoritmo considerando uma treliça convencional é [16]  $n_{\text{bin-comp}} = n_{\text{add}} = L2^{k+v}$  e  $n_{\text{int-comp}} = L2^v(2^k - 1)/n$ , onde  $n_{\text{bin-comp}}$ ,  $n_{\text{add}}$  e  $n_{\text{int-comp}}$  são, respectivamente, o número de comparações binárias, adições e comparações de inteiros.

Levando em consideração que os bits referentes ao cabeçalho são transmitidos sem codificação, é possível escrever a taxa de erro de pacote (FER) como

$$\bar{P}_f(\bar{\gamma}) = 1 - (1 - P_b(\bar{\gamma}))^H (1 - P_e(\bar{\gamma}))^L, \quad (7)$$

onde a taxa de erro de bit (BER) da transmissão não codificada é  $P_b(\bar{\gamma})$  e  $P_e(\bar{\gamma})$  é a BER após decodificação, dada por [17]

$$P_e(\bar{\gamma}) < \frac{1}{k} \sum_{\delta=\delta_{\text{free}}}^{\infty} \beta_{\delta} P_2(\delta), \quad (8)$$

na qual  $\beta_{\delta}$  é a informação de peso das palavras codificadas que estão a uma distância  $\delta$  da palavra codificada nula, e  $\delta_{\text{free}}$  é a distância mínima do código (idealmente a maior possível). Define-se  $P_2$  como a probabilidade de um receptor de máxima verossimilhança decidir erroneamente [17]

$$P_2(\delta) = \begin{cases} \sum_{j=\frac{\delta+1}{2}}^{\delta} \binom{\delta}{j} P_b(\bar{\gamma})^j (1 - P_b(\bar{\gamma}))^{\delta-j}, & \text{se } \delta \text{ é ímpar,} \\ \frac{1}{2} \binom{\delta}{\frac{\delta}{2}} P_b(\bar{\gamma})^{\delta/2} (1 - P_b(\bar{\gamma}))^{\delta/2} \\ + \sum_{j=\frac{\delta}{2}+1}^{\delta} \binom{\delta}{j} P_b(\bar{\gamma})^j (1 - P_b(\bar{\gamma}))^{\delta-j}, & \text{se } \delta \text{ é par.} \end{cases} \quad (9)$$

### III. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Primeiramente, define-se a energia total consumida pelo transmissor, levando em conta a decodificação de pacotes de retorno, como

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{tx}} &= \varepsilon_{\text{st}} + \varepsilon_{\text{enc}} + (\varepsilon_{\text{el,tx}} + \varepsilon_{\text{PA}} + \varepsilon_{\text{fb,rx}})\tau \\ &= \varepsilon_{\text{st}} + \varepsilon_{\text{enc}} + [(P_{\text{el,tx}} + P_{\text{PA}})T_b + P_{\text{el,rx}}T_{\text{fb}}]\tau, \end{aligned} \quad (10)$$

em que  $\tau$  representa o número de tentativas de transmissão até um pacote ser decodificado sem erros. Analogamente, podemos escrever o consumo de energia pelo receptor como

$$\varepsilon_{\text{rx}} = \varepsilon_{\text{st}} + [\varepsilon_{\text{dec}} + P_{\text{el,rx}}T_b + (P_{\text{el,tx}} + P_{\text{PA}}) + T_{\text{fb}}]\tau. \quad (11)$$

Note que (11) é multiplicado por  $\tau$  devido à necessidade de um novo processamento para cada tentativa de transmissão.

Definindo-se  $P_{\text{el}} = P_{\text{el,tx}} + P_{\text{el,rx}}$  como o consumo de potência total dos componentes eletrônicos, pode-se escrever a energia total consumida  $\varepsilon_b = \varepsilon_{\text{tx}} + \varepsilon_{\text{rx}}$  como sendo

$$\varepsilon_b = 2\varepsilon_{\text{st}} + \varepsilon_{\text{enc}} + \left[ \varepsilon_{\text{dec}} + (P_{\text{el}} + P_{\text{PA}}) \frac{T_b + T_{\text{fb}}}{r} \right] \tau. \quad (12)$$

Para simplificar a análise matemática, não se considera nenhum limite para o número de retransmissões<sup>1</sup>, de forma que o

<sup>1</sup>Apesar de se considerar que o número de retransmissões pode ser realizado sem limites, uma extensa análise por simulações mostra que o número médio de retransmissões é sempre baixo, não excedendo a duas retransmissões.

número médio de transmissões para canais de desvanecimento rápido é dado por [4]

$$\bar{\tau} = (1 - \bar{P}_f)^{-1}. \quad (13)$$

Assim, podemos calcular energia média total consumida como

$$\bar{\varepsilon}_b = 2\varepsilon_{\text{st}} + \varepsilon_{\text{enc}} + \frac{r \varepsilon_{\text{dec}} + (P_{\text{el}} + P_{\text{PA}})(T_b + T_{\text{fb}})}{r [1 - \bar{P}_f(\bar{\gamma})]}. \quad (14)$$

Por fim, pode-se definir a eficiência energética como a razão entre a taxa líquida de transmissão e a energia total consumida durante um certo intervalo de tempo [2]

$$\eta_{\text{EE}} = \frac{1}{\bar{\varepsilon}_b} \cdot \frac{rLR_b}{(H + O + L + F)\bar{\tau}} = \frac{1}{(T_b + T_{\text{fb}})\bar{\tau}\bar{\varepsilon}_b}. \quad (15)$$

### IV. OTIMIZAÇÃO DA SNR, TAXA DE CÓDIGO E PAYLOAD

Para o estudo da otimização da eficiência energética, emprega-se estratégia similar a [4], otimizando a SNR de operação e a taxa de código, porém visando a eficiência energética dos códigos convolucionais aqui considerados. Além disso, também se otimiza o tamanho do *payload*.

Considera-se que os nós operam sob um limite de potência de transmissão  $P_{\text{max}}$ , o que implica em uma SNR máxima de operação de  $\bar{\gamma}_{\text{max}} = \frac{\eta P_{\text{max}} d^{-\alpha}}{\xi A_0 \sigma_n^2}$ . Além disso, todos os códigos utilizados nesse trabalho pertencem à família de códigos convolucionais selecionada de [15], em que cada código é caracterizado pela taxa  $r = k/n$  e memória  $\nu$ . Denotamos a família de códigos com o mesmo  $n$  por  $\mathcal{R}_n$ . Ainda, considera-se um conjunto possível de tamanhos de *payloads*, denotado por  $\mathcal{L}$ . Dessa forma, a SNR ótima para um código qualquer de taxa  $r \in \mathcal{R}_n$ , tamanho de *payload*  $L \in \mathcal{L}$  e operando a uma distância de transmissão  $d$  pode ser escrita como

$$\bar{\gamma}^*(r, L, d) = \arg \max_{\bar{\gamma} \in [0, \bar{\gamma}_{\text{max}}]} \eta_{\text{EE}}(\bar{\gamma}, r, L, d). \quad (16)$$

Assim, a partir dos valores de SNR ótima, pode-se encontrar a taxa de código ótima para uma palavra com tamanho de *payload* de  $L \in \mathcal{L}$  bits como sendo

$$r^*(L, d) = \arg \max_{r \in \mathcal{R}_n} \eta_{\text{EE}}(\bar{\gamma}^*, r, L, d). \quad (17)$$

Por fim, tamanho ótimo de *payload* que é função da distância de transmissão  $d$  é dado por

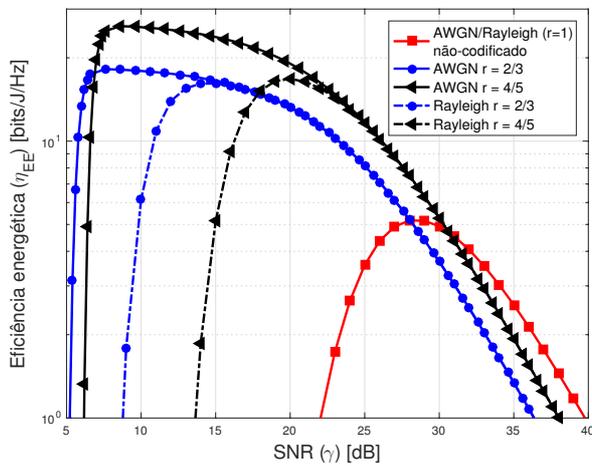
$$L^*(d) = \arg \max_{L \in \mathcal{L}} \eta_{\text{EE}}(\bar{\gamma}^*, r^*, L, d). \quad (18)$$

### V. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção são apresentados alguns exemplos numéricos do impacto da otimização da SNR, taxa de código e tamanho do *payload* em um cenário de redes de sensores sem fio. Os parâmetros utilizados estão listados na Tabela I, para os quais ressalta-se que foi considerado que operações de soma e comparação, tanto inteira quanto binária, necessitam de apenas um pulso de *clock* do processador. Além disso, consideram-se dois cenários. O primeiro considera desvanecimento rápido modelado pela distribuição Rayleigh, que modela um cenário severo quanto ao desvanecimento e sem linha de visada, ao passo que o segundo cenário considera um canal AWGN.

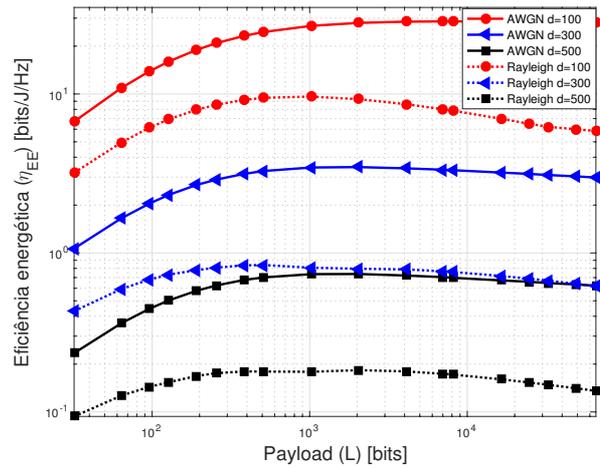
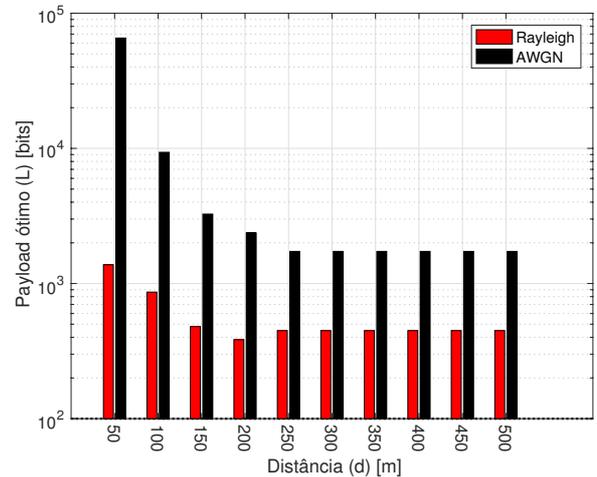
TABELA I  
 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Parâmetro	Descrição	Valor
$H$	Cabeçalho do pacote [18]	2 bytes
$O$	Overhead [18]	5 bytes
$F$	Tamanho do pacote de retorno [18]	11 bytes
$W$	Largura de banda [13]	10 kHz
$R_b$	Taxa de símbolo [13]	10 kbps
$\varepsilon_{st}$	Energia de inicialização [13]	0,125 nJ
$\alpha$	Coefficiente de perda de percurso	3,2
$A_0$	Perda de percurso de espaço aberto [13]	30 dB
$\eta$	Eficiência do PA [13]	35%
$P_{el,tx}$	Consumo da eletrônico de Tx [13]	98,2 mW
$P_{el,rx}$	Consumo da eletrônico de Rx [13]	112,5mW
$N_0$	Densidade espectral de potência do ruído	-174 dBm/Hz
$N_f$	Figura de ruído do receptor [13]	10 dB
$M_1$	Margem do enlace [13]	30 dB
$f_{APU}$	Frequência da APU [19]	20 MHz
$V_{dd}$	Tensão da APU [19]	3 V
$I_0$	Corrente média [19]	6,37 mA


 Fig. 1. Eficiência energética nos canais Rayleigh e AWGN para distância de enlace de  $d = 50$  m e códigos taxa  $r = \{\frac{2}{3}, \frac{4}{5}, 1\}$ .

A Figura 1 mostra a eficiência energética em função da SNR para os canais Rayleigh e AWGN, sem otimização de taxa e tamanho de *payload*. Note que  $\eta_{EE}$  é uma função convexa da SNR. Quando a SNR é alta, há poucas retransmissões, mas o consumo de energia também aumenta devido a maior potência irradiada. Para SNR baixa, é necessário um número maior de retransmissões até que a decodificação ocorra sem erro, com aumento geral da energia utilizada. É importante ressaltar que a SNR que maximiza a eficiência energética é diferente da SNR que minimiza o consumo de energia, como apresentado em [4]. Isso se deve ao fato de que a eficiência energética também leva em consideração a taxa de dados sendo transmitidos. Comparando os canais Rayleigh e AWGN, nota-se uma menor SNR requerida para o canal AWGN, porém essa diferença é bastante dependente da taxa de código utilizada, o que indica a importância da otimização conjunta de  $\bar{\gamma}$  e  $r$ .

Em seguida, a Figura 2 ilustra o efeito do tamanho do *payload* na eficiência energética do sistema para algumas distâncias de transmissão, com  $d = \{100, 300, 500\}$  m. Como se pode observar, existe um tamanho de *payload* ótimo para


 Fig. 2. Otimização do tamanho do *payload* para distâncias de 100, 300 e 500 metros para canal AWGN e canal Rayleigh.

 Fig. 3. Tamanho ótimo do *payload* ( $L^*$ ) em função da distância de transmissão para os canais AWGN e Rayleigh.

cada distância de transmissão e que varia dependendo do tipo de canal (AWGN ou Rayleigh). O tamanho do *payload* ótimo que maximiza a eficiência energética está ilustrado pela Figura 3, em função da distância de transmissão, na qual observa-se que o tamanho do *payload* decresce com o aumento da distância em ambos os cenários. Comparando-se os canais AWGN e Rayleigh, nota-se que  $\eta_{EE}$  é maximizada com valores maiores de  $L$  para o canal AWGN em relação ao Rayleigh, o que é devido ao ambiente de transmissão menos severo. Em distâncias  $d > 250$  m,  $L^*$  se estabiliza em torno de 450 bits para o canal Rayleigh e 1700 bits para o canal AWGN.

Por fim, a Figura 4 plota a eficiência energética em função da distância de transmissão para canais AWGN (à esquerda) e Rayleigh (à direita) considerando três cenários de otimização: *i.*) otimização completa, buscando a melhor SNR, taxa de código e tamanho do *payload*; *ii.*) otimização da SNR e da taxa de código com tamanho de *payload* fixo de  $L = 128$  bits; *iii.*) otimização apenas da SNR com taxa de código fixa  $r = 2/3$  e tamanho de *payload* fixo de  $L = 128$  bits. Pode-se notar

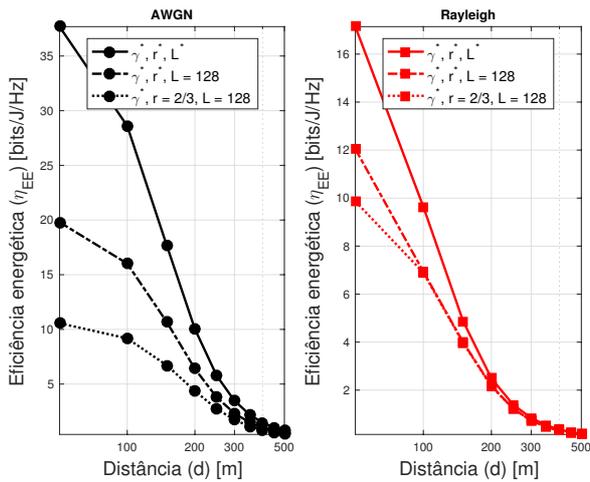


Fig. 4. Eficiência energética para canais AWGN e Rayleigh para os seguintes casos: i.) otimização completa: SNR, taxa de código e tamanho do *payload*; ii.) otimização da SNR e da taxa de código com tamanho de *payload* fixo de  $L = 128$  bits; iii.) otimização da SNR com taxa de código fixa  $r = 2/3$  e tamanho de *payload* fixo de  $L = 128$  bits.

a partir da figura que a otimização da taxa de código traz um incremento de eficiência energética mais significativo para distâncias mais curtas de enlace, principalmente para o canal Rayleigh onde tal incremento se observa apenas até uma distância de  $d = 100$  m. Entretanto, a otimização do tamanho do *payload* traz um incremento ainda mais expressivo em termos de eficiência energética, e em uma faixa maior de distâncias de transmissão, que se observa para ambos os modelos de canal. Tendo em vista que um cenário de redes de sensores sem fio foi considerado, os resultados mais importantes se concentram na região de curto alcance de transmissão. Ademais, é também importante ressaltar a diferença de escalas entre os eixos das duas figuras, tendo em vista que em Rayleigh a eficiência energética é consideravelmente menor que em AWGN.

## VI. CONCLUSÃO

Estudou-se o impacto em eficiência energética da otimização do tamanho do *payload* de códigos convolucionais empregando HARQ em uma rede de sensores sem fio. O modelo de simulações utilizado considera o consumo de energia da transmissão de pacotes, consumo dos circuitos eletrônicos associados aos sinais de RF e consumo em banda base para codificação e decodificação dos pacotes. Além disso, foram considerados diferentes cenários em que se permite otimizar SNR e taxa de código, aliada à adaptação do tamanho do *payload*. Os resultados mostram que existe um tamanho de *payload* ótimo que maximiza a eficiência energética, que depende da distância de transmissão e do tipo de canal analisado, sendo que  $\eta_{EE}$  é maximizada com valores maiores de  $L$  para o canal AWGN em relação ao Rayleigh. A otimização de  $L$  traz um aumento expressivo em termos de eficiência energética, maior do que o observado pela otimização apenas da SNR e taxa de código, e mais presente em distâncias mais curtas de transmissão, típicas para redes de sensores sem fio levadas em consideração.

## REFERÊNCIAS

- [1] S. Verdú, "Spectral efficiency in the wideband regime," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1319–1343, Jun 2002.
- [2] G. Y. Li, Z. Xu, C. Xiong, C. Yang, S. Zhang, Y. Chen, and S. Xu, "Energy-efficient wireless communications: tutorial, survey, and open issues," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 18, no. 6, pp. 28–35, Dec. 2011.
- [3] S. Lin and D. J. Costello, *Error Control Coding*, 2nd ed. Pearson, 2004.
- [4] F. Rosas, G. Brante, R. D. Souza, and C. Oberli, "Optimizing the code rate for achieving energy-efficient wireless communications," in *IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, Apr 2014, pp. 775–780.
- [5] F. A. Souza, R. D. Souza, G. Brante, M. E. Pellenz, and F. Rosas, "Code rate, frequency and SNR optimization for energy efficient underwater acoustic communications," in *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Jun 2015, pp. 6351–6356.
- [6] Y. Sankarasubramanian, I. F. Akyildiz, and S. W. McLaughlin, "Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks," in *IEEE Int. Workshop on Sensor Network Protocols and Applications*, 2003, pp. 1–8.
- [7] C. Lott, O. Milenkovic, and E. Soljanin, "Hybrid ARQ: Theory, state of the art and future directions," in *IEEE Inf. Theory Workshop on Inf. Theory for Wireless Netw.*, 2007, pp. 1–5.
- [8] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli, and M. E. Pellenz, "An energy efficiency model for adaptive and custom error control schemes in bluetooth sensor networks," *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 63, no. 3, pp. 188–199, 2009.
- [9] J. H. Kleinschmidt, "Analyzing and improving the energy efficiency of IEEE 802.15.4 wireless sensor networks using retransmissions and custom coding," *Telecommunication Systems*, vol. 53, no. 2, pp. 239–245, 2013.
- [10] M. E. Pellenz, R. D. Souza, and M. S. P. Fonseca, "Error control coding in wireless sensor networks," *Telecommunication Systems*, vol. 44, no. 1, pp. 61–68, 2009.
- [11] F. Rosas, R. D. Souza, M. E. Pellenz, C. Oberli, G. Brante, M. Verhelst, and S. Pollin, "Optimizing the code rate of energy-constrained wireless communications with HARQ," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 1, pp. 191–205, Jan 2016.
- [12] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, 1st ed. Cambridge University Press, 2005.
- [13] S. Cui, A. J. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 5, pp. 2349–2360, Sep 2005.
- [14] A. Sinha and A. Chandrakasan, "Dynamic power management in wireless sensor networks," *IEEE Design Test of Computers*, vol. 18, no. 2, pp. 62–74, Mar 2001.
- [15] I. E. Bocharova and B. D. Kudryashov, "Rational rate punctured convolutional codes for soft-decision Viterbi decoding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 43, no. 4, pp. 1305–1313, Jul 1997.
- [16] I. B. Benschmol, C. Pimentel, R. D. Souza, and B. F. Uchoa-Filho, "A computational complexity measure for trellis modules of convolutional codes," in *Int. Conf. Telecommun. Signal Proces. (TSP)*, Jul 2013, pp. 144–148.
- [17] J. Proakis and M. Salehi, *Digital Communications*, 5th ed. McGraw-Hill Education, 2007.
- [18] "IEEE standard for information technology— local and metropolitan area networks— specific requirements— part 15.4: Wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low rate wireless personal area networks (WPANs)," *IEEE Std 802.15.4-2006 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2003)*, pp. 1–320, Sep 2006.
- [19] T. Instruments, *MSP430BT5190 Product Review*, online, 2016.