

Otimização de Energia para a Transmissão de Informação em Redes de Sensores sem Fio

Felipe M. Costa †, Bruno H. C. Faria†, Flavio A. C. M. Filho†, Hideki Ochiai‡

Resumo—Foi estudado o consumo de energia em redes de sensores sem fio aplicando três esquemas de modulação digital largamente utilizados, são eles: MQAM, MPSK e MFSK não coerente. Para MQAM e MPSK, a modelagem de pulso é considerada. A potência do sinal transmitido e a potência do circuito são levadas em consideração onde a primeira é modelada usando a taxa de *cutoff* em função da relação sinal-ruído (SNR) e a segunda é modelada considerando o consumo de energia de hardwares típicos usados em nós de redes de sensores sem fio (RSSF). Uma nova forma para calcular a eficiência energética de amplificadores de potência linear foi usada. Além disso, as limitações de largura de banda e taxa de dados do padrão IEEE 802.15.4 são consideradas. Para cada tipo de modulação, os parâmetros ótimos para minimizar a energia por bit de informação, são derivados. Finalmente, uma comparação entre os três tipos de modulação é apresentado.

Palavras-Chave—Eficiência energética, redes de sensores sem fio, camada física, modulação.

Abstract— We study the energy consumption of wireless sensor network links applying three widely used digital modulation schemes, i.e. MQAM, MPSK, and noncoherent MFSK. For MQAM and MPSK, pulse shaping is considered. Both transmitted signal power and circuit power are taken into account where the former is modeled using the relationship between cutoff rate and signal-to-noise ratio (SNR) and the latter is modeled considering the power consumption of typical hardware used in wireless sensor nodes. A novel analytical tool for calculating the power efficiency of linear power amplifiers is used. Moreover, the bandwidth and data rate limitations of the IEEE 802.15.4 standard are considered. For each modulation type, the optimum parameters for minimizing the energy per information bit are derived. Finally, a comparison among the three modulation types is presented.

Keywords—Energy efficient, wireless sensors networks, PHY layer, modulation.

I. INTRODUÇÃO

Devido à crescente importância e popularização das redes de sensores sem fio (RSSF) que são, em geral, redes compostas de nós alimentados por baterias, é importante estudar a eficiência energética, fator que afeta diretamente a vida útil da rede. Por exemplo, em casos onde a substituição da bateria é impraticável, é essencial que os nós da RSSF tenham uma vida útil mais longa.

O consumo de energia, em redes com consumo limitado, já foi abordado na literatura. Por exemplo, Cui et al. [1] analisou o consumo de energia para sistemas que usam modulações

MQAM e MFSK, considerando a energia gasta tanto na transmissão quanto no consumo de energia do circuito. A partir disso, foi encontrado o tempo de transmissão e o tamanho de constelação ótimos para a minimização de energia.

Mukesh et al. [2] comparou, para uma comunicação de curto alcance (menos de 10 metros), o desempenho energético das modulações MPSK não codificado, MQAM e MFSK para canais AWGN com desvanecimento do tipo Rayleigh e concluiu que MQAM é energeticamente mais eficiente do que os outros esquemas de modulação comparados.

Para a combinação de códigos Reed-Solomon, com diferentes taxas de codificação, e modulações MPSK, MQAM e MFSK, Chouhan et al. [3] encontraram um par de codificação e modulação ideal para atingir o consumo mínimo de energia por bit.

Em trabalhos anteriores [4], [5], baseados nas relações entre capacidade (ou taxa de *cutoff*) e SNR das modulações MQAM, MPSK e MFSK não coerente, o esquema de transmissão ideal (tamanho da constelação e taxa de informação) que resulta no gasto mínimo de energia, foi obtido para distâncias de até cem metros entre os nós de RSSF. Em [5], foi realizada uma comparação entre os três esquemas de modulação citados. Nestes trabalhos, um modelo com consumo de potência do circuito fixa [1] foi introduzido.

Em [6], foram considerados diferentes consumos de potência de circuito (importante para análise de sistemas práticos, uma vez que os nós disponíveis comercialmente possuem consumo de energia distintos), a taxa de dados requerida no padrão IEEE 802.15.4 e o uso de filtros de modelagem de pulso, onde os autores obtiveram os parâmetros ótimos para minimizar a energia por bit de informação para as modulações MQAM, MPSK e MFSK não coerente. Depois, uma comparação entre estes tipos de modulação foi realizada e os intervalos onde cada um destes tipos de modulação são ótimos, foram determinados.

Este trabalho estende [6] analisando a minimização da energia de sistemas com largura de banda fixa, considerando o padrão IEEE 802.15.4, e usando uma nova abordagem para modelar o consumo da potência do amplificador de potência (AP) [7]. Os parâmetros ótimos para a minimização de energia são determinados.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve o modelo do sistema, a Seção III apresenta uma análise do problema de minimização de energia, seguido pelos resultados na Seção IV. Finalmente, a Seção V conclui o artigo.

†Instituto Nokia de Tecnologia, Av. Torquato Tapajos, 7200 - Col. Terra Nova, Manaus-AM 69048-660, Brasil, Email: {ext-felipe.m.costa, ext-bruno.faria}@nokia.com, flaviofilho@dcc.ufam.edu.br

‡Departamento de Engenharia Elétrica e da Computação, Yokohama National University, Yokohama, Kanagawa 240-8501, Japão, Email: hideki@ynu.ac.jp

II. MODELO DE SISTEMA

A. Cenário

Estudamos um link de uma RSSF. O problema pode ser definido como: o nó transmissor precisa enviar L bits de informação para o nó receptor no tempo máximo permitido de T segundos. Neste trabalho, foi considerado que a taxa média de bits e a largura de banda ocupada por todos os sinais são as mesmas usadas em canais com o padrão IEEE 802.15.4, operando na banda ISM de 2.4 GHz, ou seja, 250 Kbps e 5 MHz respectivamente [8].

B. Modelo de Circuito

Para estimar a energia gasta na transmissão dos bits de informação, além de considerar a energia do sinal transmitido, consideramos aquela consumida pelo circuito de rádio frequência (RF) do transmissor e do receptor.

Alguns consumos de potência, típicos de circuitos de RF usados em implementações práticas ou implementações prometidas para um futuro próximo, foram usados em nossa análise: 1, 100, e 300 mW.

Foi considerado que o circuito possui três modos de funcionamento: *on*, *transient*, e *sleep*. O estado *on* é usado para a transmissão de informação. O estado *sleep* é usado para conservar energia e o *transient* é temporário entre o *sleep* e o *on*, utilizado para configurar o sintetizador de frequência.

A partir dos pressupostos acima, a energia gasta por bit de informação é dada por:

$$E_{infBit} = \frac{P_{on}T_{on} + P_{tr}T_{tr}}{L}, \quad (1)$$

onde P_{on} e T_{on} representam a potência e o tempo gasto no modo *on*, enquanto P_{tr} e T_{tr} representam a potência e o tempo gasto no modo *transient*, respectivamente, e L é o número total de bits de informação. Na equação acima, quando as modulações MQAM e MPSK são usadas, $P_{tr} = \frac{1}{2}P_{on}$, quando MFSK é usado, $P_{tr} = \frac{2}{3}P_{on}$, seguindo o que foi mostrado no modelo de circuito desenvolvido em [1]. Em nosso sistema, tanto P_{on} quanto T_{on} são variáveis a serem otimizadas, enquanto que P_{tr} e T_{tr} são constantes.

Enquanto o circuito está no estado *on*, a potência é composta pela potência do sinal transmitido (P_{Tx}), pela potência do circuito (P_C) e pela potência do amplificador de potência (P_{AP}). A última é separada do restante do circuito já que é altamente relacionada com a potência do sinal transmitido. Em resumo, tem-se:

$$P_{on} = P_{Tx} + P_{AP} + P_C. \quad (2)$$

Substituindo (2) em (1), pode-se obter:

$$E_{infBit} = \frac{P_{Tx}T_{on} + P_{AP}T_{on} + P_C T_{on} + P_{tr}T_{tr}}{L}. \quad (3)$$

C. Modelo de consumo de potência do amplificador de potência (AP)

Neste trabalho, quando usamos MQAM e MPSK, o consumo de potência do AP é modelado usando uma nova ferramenta analítica para estimar a eficiência alcançável do AP

de sinais modulados linearmente [7]. Quando usado o MFSK, considera-se que o AP possui uma eficiência ideal de 100%, já que o MFSK tem uma amplitude constante para uma potência média de sinal fixa o que resulta em uma alta eficiência para o AP.

A eficiência média do AP (η) pode ser vista como uma fração da potência que o AP transfere para o sinal em sua saída comparada ao total de potência DC fornecido pela entrada de corrente contínua do AP. As eficiências médias das classes A e B podem ser expressas como [9]:

$$\eta_{av,A} = \frac{1}{2} \frac{E\{r_0^2\}}{r_{0,max}^2}, \quad (4)$$

e

$$\eta_{av,B} = \frac{\pi}{4} \frac{E\{r_0^2\}}{r_{0,max} E\{r_0\}}. \quad (5)$$

onde r_0 denota a amplitude do sinal na saída do AP, $r_{0,max}$ é o seu máximo, e $E\{\cdot\}$ denota a esperança estatística.

As duas eficiências acima podem servir como limite inferior e superior para a eficiência da versão idealizada denominada classe AB de AP. Por isso, modelamos o consumo de energia do AP usando a eficiência da classe A para designar o limite superior do consumo de energia do sistema e a eficiência da classe B para designar o limite inferior do consumo de energia do sistema.

A fração do consumo da potência de um AP linear ideal que não é transferida para o sinal (potência desperdiçada na forma de calor), pode ser escrita em termos da potência do sinal transmitido como:

$$P_{PA} = \left(\frac{1}{\eta} - 1\right) P_{Tx}. \quad (6)$$

Usando (6), (3) pode ser reescrita como:

$$E_{infBit} = \frac{\frac{1}{\eta} P_{Tx} T_{on} + P_C T_{on} + P_{tr} T_{tr}}{L}. \quad (7)$$

Nosso objetivo é minimizar essa função, pela otimização de T_{on} e P_{Tx} , para valores distintos de P_C .

D. Modelo do SNR Recebido

Foi usada a relação entre taxa de *cutoff* e o SNR no receptor para modelar a potência do sinal recebido, já que a mesma é considerada como uma medida significativa da taxa máxima efetiva quando códigos corretores de erros simples são utilizados, por exemplo, códigos convolucionais com decodificação sequencial e códigos lineares de bloco [10], adequados para serem usados em dispositivos com processamento restrito, como os nós de uma RSSF.

Essa relação pode ser calculada como em [11] para MQAM e MPSK e como em [10] para MFSK não coerente.

Finalmente, para o cálculo da taxa de *cutoff* do MQAM onde $b = \log_2 M$ é um número ímpar, foi adotada a constelação em forma de cruz [12].

III. ANÁLISE

Para cada consumo de potência dos circuitos e cada tipo de modulação considerado, nosso objetivo é encontrar o menor consumo de energia por bit de informação para diferentes distâncias entre os nós da RSSF e determinar a taxa ótima de informação, o tamanho ótimo da constelação e o coeficiente de rolamento ótimo que atinge a minimização formulada em (7).

O SNR medido no receptor pode ser expresso como:

$$\text{SNR} = \frac{P_{Rx} T_S}{N_0 N_f}, \quad (8)$$

logo

$$P_{Rx} = \frac{\text{SNR} N_0 N_f}{T_S}, \quad (9)$$

onde P_{Rx} é a potência do sinal recebido, T_S é o período do símbolo, $N_0/2$ é a densidade espectral de potência do ruído por dimensão e N_f denota a figura de ruído do receptor.

Assumindo um modelo de *path loss* com expoente de ordem k , se os dois nós comunicantes são separados por uma distância d , pode-se afirmar que:

$$P_{Tx} = P_{Rx} G_d = P_{Rx} G_1 d^k M_l, \quad (10)$$

onde P_{Tx} é a potência do sinal na saída do transmissor, $G_d = G_1 d^k M_l$ é o fator de ganho de potência, M_l é a margem de link para compensar imperfeições do hardware e de ruídos e G_1 é o fator de ganho em $d = 1$ m [1].

A variável T_{on} em (7) pode ser relacionada com a taxa de informação R , dada em bits de informação por símbolo e modelada usando a taxa de *cutoff*:

$$R = \frac{L}{T_{on}/T_S}. \quad (11)$$

O numerador é o número total de bits de informação que são transmitidos e o denominador é o número total de símbolos usados para transmitir esses bits. De forma equivalente, tem-se:

$$T_{on} = \frac{L T_S}{R}. \quad (12)$$

Substituindo (9) em (10) e (12) em (7), tem-se:

$$E_{infBit} = \frac{\frac{1}{\eta} (\text{SNR}) N_0 N_f G_d + P_c T_S}{R} + \frac{P_{tr} T_{tr}}{L}. \quad (13)$$

Todos os resultados nesse trabalho levam em consideração que os L bits de informação devem ser transmitidos no tempo limite máximo de T segundos ($T_{on} \leq T$).

A. MQAM e MPSK

Devido ao uso do filtro de modelagem de pulso, $T_s = \frac{1+\beta}{B}$ [13], onde β é o coeficiente de rolamento do filtro de modelagem de pulso. Pode-se reescrever (13) como:

$$E_{infBit} = \frac{\frac{1}{\eta} (\text{SNR}) N_0 N_f G_d}{R} + \frac{P_c (1 + \beta)}{RB} + \frac{P_{tr} T_{tr}}{L}. \quad (14)$$

Para constelações MQAM e MPSK, foram usadas as eficiências ideais do AP classe A (4) e classe B (5) para modelar os limites superior e inferior do consumo de energia por bit de informação respectivamente, como discutido na seção II-C.

B. MFSK

Considerando-se detecção não coerente, a relação $M = 2T_S B$ é válida [10]. Por isso, $T_S = \frac{M}{2B}$.

Substituindo (13), pode-se reescrever, para MFSK, a equação como:

$$E_{infBit} = \frac{\frac{1}{\eta} (\text{SNR}) N_0 N_f G_d}{R} + \frac{1}{2} \frac{P_c M}{RB} + \frac{P_{tr} T_{tr}}{L}. \quad (15)$$

Para MFSK, é sempre considerado $\eta = 1$, um valor ideal de alta eficiência do AP que pode ser usado para modulações que demandam baixa linearidade.

IV. RESULTADOS

Neste trabalho, estudamos o comportamento da energia para sistemas com largura de banda fixa, ou seja, é estudado o *trade-off* entre período de símbolo e energia. Considerando a banda fixa, filtros com coeficientes de rolamento altos possuem longo tempo de símbolo, mas o AP possui alta eficiência por causa da baixa relação pico/média de potência do sinal (PAPR) [14]. Por outro lado, baixos coeficientes de rolamento possuem um curto tempo de símbolo, mas uma baixa eficiência do AP por causa do alto PAPR [14]. Nesta seção, é mostrado o comportamento desses sistemas em termos de consumo de energia para diferentes tipos de modulação e finalmente o tipo de modulação ótimo para cada distância entre os nós.

A. Minimização de energia para MQAM

A equação (14) mostra a função de energia a ser minimizada. As figuras 1, 2 mostram o consumo mínimo de energia (em μJ) por bit de informação e a taxa de codificação ótima como função da distância entre os nós, respectivamente. Para cada figura, três diferentes consumos de energia do circuito são considerados: 1 mW, 100 mW e 300 mW.

A Fig. 1 mostra a energia mínima por bit de informação considerando-se todas as constelações MQAM. Note que o consumo da potência do circuito tem alta influência no total de energia por bit de informação em curtas distâncias, devido à predominância da energia do circuito sobre a energia do sinal. Quando as distâncias aumentam, a energia do sinal aumenta e se torna dominante sobre o consumo de energia do circuito. Neste caso, os consumos de energia por bit de informação para os três circuitos são similares. Este gráfico mostra que a decisão da classe do AP possui um importante papel na minimização do consumo de energia em comunicações de curta distância.

Referindo-se à Fig. 2, é possível observar que quanto menor o consumo da potência do circuito, menor é a distância onde a mínima taxa de informação possível (0.05 bit de informação por símbolo) é usada para conservar a energia do sistema. Isso acontece porque quanto menor o consumo de potência do hardware, menor é a distância onde o consumo de energia do sinal é dominante sobre o consumo de energia

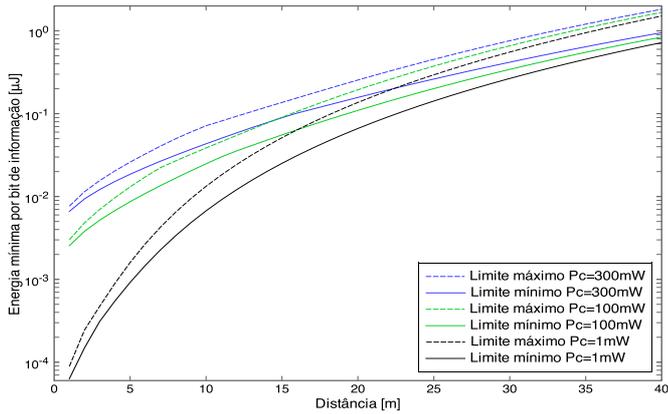


Fig. 1. Mínimo consumo de energia por bit de informação como uma função da distância para constelações MQAM para diferentes potências de circuito.

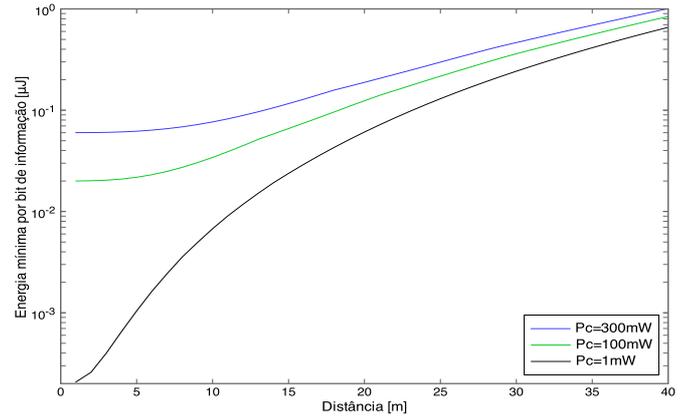


Fig. 3. Mínima energia por bit de informação como função da distância para constelações MFSK para diferentes potências de circuito.

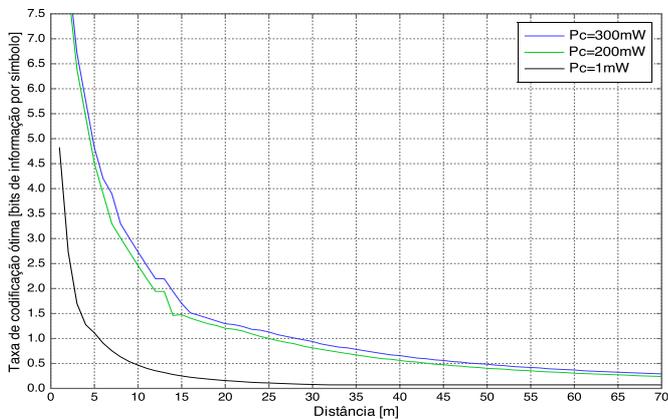


Fig. 2. Taxa de codificação ótima em função da distância para constelações MQAM para diferentes potências de circuito.

do circuito e a melhor maneira de conservar energia é usar baixas taxas de informação. Somente eficiências do AP classe B foram consideradas nessa curva. O comportamento para as eficiências classe A são muito similares.

É importante frisar que usando somente as constelações de dois, cinco e quinze bits por símbolo, é possível alcançar o consumo mínimo de energia, cada uma em um intervalo de distância. Para distâncias maiores, os nós comunicantes usam constelações menores para conservar energia. Esse resultado mostra que as implementações de sistemas de comunicação de curtas distâncias com modulação MQAM energeticamente eficientes podem ser simplificadas, já que não existe a necessidade de utilizar-se todos os tamanhos de constelações existentes.

B. Minimização de energia para MPSK

Os resultados para o consumo mínimo de energia e a ótima taxa de codificação para o MPSK, possuem um resultado semelhante aos apresentados anteriormente para MQAM.

C. Minimização de energia para MFSK

O problema de minimização de energia é resolvido usando (15). Para diferentes consumos de energia, a Fig. 3 mostra o

consumo mínimo de energia por bit de informação, em μJ , como uma função da distância entre os nós comunicantes, considerando todos os tamanhos de constelação MFSK.

Ao contrário de MQAM e MPSK, a energia de sinal do MFSK por bit diminui quando b aumenta. Por isso, MFSK possui um comportamento oposto ao observado para as constelações de MQAM e MPSK: conforme a distância entre os nós aumenta, o tamanho da constelação e a taxa de codificação em bits de informação por símbolo aumenta, reduzindo o consumo de energia do sinal.

Observando a Fig. 3, é possível ver que para curtas distâncias, para diferentes consumos de potência de circuito, MFSK possui um consumo de energia por bit de informação muito distinto. Isto é devido ao fato de MFSK ter uma menor eficiência espectral do que o MPSK e o MQAM, gastando mais tempo para transmitir os bits de informação, o que causa *gaps* expressivos na região dos gráficos onde a energia do circuito é dominante.

D. Comparação dos Esquemas de Modulação

A Fig. 4 mostra uma comparação entre os três esquemas de modulação para $P_c = 1 \text{ mW}$ e $P_c = 300 \text{ mW}$.

As constelações de MQAM e MPSK possuem uma performance muito similar para todas as distâncias quando $P_c = 1 \text{ mW}$, enquanto para $P_c = 300 \text{ mW}$, esses dois tipos de modulação têm uma leve diferença de performance para curtas distâncias (até 10 metros) e performance similar para distâncias maiores. Isto ocorre devido ao uso de constelações de ordem mais elevada e maiores taxas de codificação para a minimização de energia para MQAM em distâncias pequenas, o que resulta em uma maior economia no consumo de potência do circuito, uma vez que isto resulta em uma maior rapidez para transmitir os dados, permitindo que o circuito permaneça no estado de *sleep* por um período mais longo.

MFSK tem pior desempenho para curtas distâncias, enquanto que para distâncias maiores, o mesmo apresenta uma melhor performance. Observe que quanto maior o consumo de potência do circuito, maior é a distância onde o MFSK se torna uma modulação mais vantajosa.

A razão para este fato é que MFSK possui uma menor eficiência espectral do que os outros esquemas de modulação,

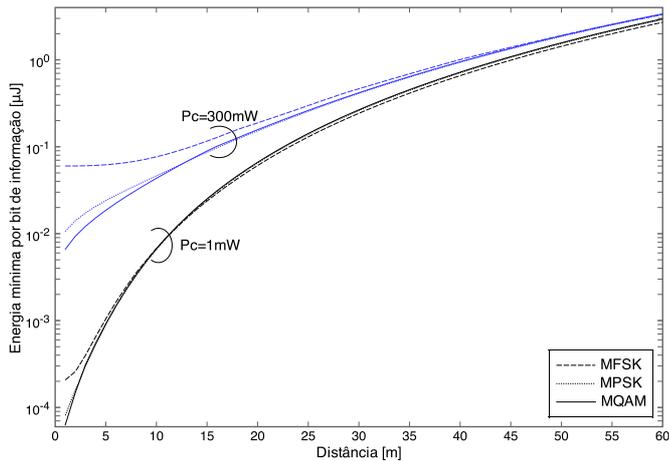


Fig. 4. Mínimo consumo de energia por bit de informação pela distância para os três esquemas de modulação para $P_c = 1\text{mW}$ e $P_c = 300\text{mW}$. Para as constelações MQAM e MPSK, APs classe B (limite mínimo de energia) são considerados.

sendo necessário mais tempo para transmitir os bits de informação, aumentando o tempo em que o circuito permanece no modo *on*. Para curtas distâncias, o consumo de energia do circuito é dominante sobre o consumo de energia do sinal, resultando em um pior desempenho se comparado com o MQAM e MPSK.

Por outro lado, para distâncias maiores, onde o consumo de energia do sinal é dominante sobre o consumo de energia do circuito, MFSK tem uma melhor performance do que os outros esquemas de modulação. MFSK conserva mais energia de sinal devido à maior eficiência do AP usado no seu circuito de transmissão (nesse trabalho, é idealmente considerado como 100%) e ao fato que é necessário um menor SNR para se alcançar uma determinada taxa fixa de *cutoff* (bits de informação por símbolo) se comparado as constelações MQAM e MPSK [5].

Outro importante resultado é mostrado na Tabela I. Para diferentes consumos de potência do circuito e para as duas classes do AP consideradas para MQAM e MPSK, o intervalo de distâncias onde cada modulação é mais vantajosa do ponto de vista do consumo de energia é mostrado.

Observe que, para uma classe fixa do AP, quanto menor é o consumo de potência do hardware, menor é a distância onde MPSK é mais eficiente em termos energéticos do que o MQAM e menor é a distância onde o MFSK se torna o esquema de modulação mais eficiente em termos energéticos.

Seguindo a mesma tendência, para consumos fixos de potência do circuito, quando a classe A do AP (menor eficiência) é usada em circuitos que usam MQAM e MPSK, a distância onde o MPSK é mais eficiente energeticamente do que a MQAM é menor e menor é a distância onde MFSK torna-se a melhor modulação para minimização de energia se compararmos quando utilizamos a classe B.

V. CONCLUSÃO

Problemas de otimização de energia em comunicações confiáveis ponto a ponto em canais AWGN foram avaliados.

TABELA I
DISTÂNCIA (EM METROS) ONDE CADA MODULAÇÃO É MELHOR

P_c [mW]	PA Class	MQAM	MPSK	MFSK
1	A	0-1	2-2	3-200
	B	0-2	3-11	12-200
100	A	0-5	6-9	10-200
	B	0-9	10-43	44-200
300	A	0-7	8-12	13-200
	B	0-12	13-58	59-200

Várias descobertas acadêmicas recentes e aspectos práticos, como uma nova ferramenta de análise para calcular o limite superior e inferior da eficiência do AP de modulações lineares, e as especificações da taxa de dados e largura de banda do padrão IEEE 802.15.4 foram considerados neste trabalho.

Os resultados obtidos podem ser usados como uma diretriz para futuros projetos de sistemas de comunicação energeticamente eficientes que usam esquemas de modulação combinados com códigos corretores de erro aplicados à RSSF.

REFERÊNCIAS

- [1] S. Cui, A. Goldsmith, and A. Bahai, "Energy-constrained modulation optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 2349–2360, 2005.
- [2] S. Mukesh, M. Iqbal, Z. Jianhua, Z. Ping, and Inam-Ur-Rehman, "Comparative analysis of m-ary modulation techniques for wireless ad-hoc networks," nos *anais do Sensors Applications Symposium*, pp. 1–6, IEEE, 2007.
- [3] S. Chouhan, R. Bose, and M. Balakrishnan, "Integrated energy analysis of error correcting codes and modulation for energy efficient wireless sensor nodes," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 10, pp. 5348–5355, 2009.
- [4] F. Costa and H. Ochiai, "Energy Optimization for Reliable Point-to-Point Communication in Energy-Constrained Networks," nos *anais da 71ª IEEE 71st Vehicular Technology Conference 2010 (VTC 2010-Spring)*, pp. 1–5, 2010.
- [5] F. Costa and H. Ochiai, "A Comparison of Modulations for Energy Optimization in Wireless Sensor Network Links," nos *anais da IEEE Global Telecommunications Conference 2010 (GLOBECOM 2010)*, pp. 1–5, 2010.
- [6] F. Costa and H. Ochiai, "Energy-Efficient Physical Layer Design for Wireless Sensor Network Links," nos *anais da IEEE International Communications Conference 2011 (ICC 2011)*, pp. 1–5, 2011.
- [7] H. Ochiai, "Power Amplifier Efficiencies of Spectrally Efficient Wireless Communication Systems." Nota, disponível em: <http://www.ochiaiolab.dnj.ynu.ac.jp/~hideki/PAochiai2011.pdf>, Mar 2011.
- [8] P. Baronti, P. Pillai, V. Chook, S. Chessa, A. Gotta, and Y. Hu, "Wireless sensor networks: A survey on the state of the art and the 802.15. 4 and ZigBee standards," *Computer Communications*, vol. 30, no. 7, pp. 1655–1695, 2007.
- [9] F. Raab, "Average efficiency of power amplifiers," nos *anais da RF Technology Expo '86*, pp. 474–486, Jan 1984.
- [10] S. Butman, B. Levitt, I. Bar-David, R. Lyon, and M. Klass, "Design criteria for noncoherent Gaussian channels with MFSK signaling and coding," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 24, pp. 1078–1088, out 1976.
- [11] L. Hanzo, S. Ng, T. Keller, and W. Webb, *Quadrature Amplitude Modulation*. John Wiley, 2004.
- [12] P. Vitthaladevuni, M. Alouini, and J. Kieffer, "Exact BER computation for cross QAM constellations," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 6, pp. 3039–3050, 2005.
- [13] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [14] H. Ochiai, "Exact and approximate distributions of instantaneous power for pulse-shaped single-carrier signals," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 10, no. 2, pp. 682–692, 2011.