

Análise da eficiência de energia de esquemas de retransmissão em redes de sensores IEEE 802.15.4

João H. Kleinschmidt e Walter C. Borelli
Departamento de Telemática - DT
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação - FEEC
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP
{joaohk,borelli}@dt.fee.unicamp.br

Abstract - This paper analyzes the energy efficiency of retransmission schemes in IEEE 802.15.4 wireless sensor networks. An analytical model is presented to evaluate the energy efficiency in Rayleigh fading channels. Performance results are obtained for multihop networks with different channel conditions and packet sizes. The results have shown that the retransmission scheme of the IEEE 802.15.4 standard is energy efficient for networks with higher number of hops and lower values of signal-to-noise ratio.

Resumo – Este artigo analisa a eficiência de energia de esquemas de retransmissão em redes de sensores sem fio IEEE 802.15.4. Um modelo analítico é apresentado para cálculo da eficiência de energia em canais com desvanecimento Rayleigh. Os resultados são obtidos para redes com múltiplos saltos e diferentes condições de canal. Os resultados mostraram que a estratégia de retransmissão do padrão IEEE 802.15.4 é eficiente em energia para redes com muitos saltos e para baixos valores de relação sinal-ruído.

I. INTRODUÇÃO

A evolução da comunicação sem fio e a miniaturização dos componentes eletrônicos têm permitido o desenvolvimento de sensores de baixo custo e baixa potência. Estes dispositivos podem formar um tipo especial de redes ad hoc, as redes de sensores [1]. Cada nó sensor possui componentes para sensoriamento, processamento de dados e comunicação. Algumas aplicações destas redes são o monitoramento ambiental em locais como florestas e oceanos, teste de qualidade de produtos em um ambiente industrial, entre outras. Os protocolos e algoritmos das redes de sensores devem ter capacidade de auto-organização. Estas redes são caracterizadas pela limitação de energia, baixa largura de banda, pequeno tamanho de memória e capacidade computacional, grande número de nós, modelo de tráfego diferente das redes ad hoc tradicionais e sensores mais suscetíveis à falhas. O protocolo de acesso ao meio (MAC) é responsável pela criação da infra-estrutura da rede e pelo compartilhamento dos recursos de comunicação entre os nós. Várias tecnologias existentes vêm sendo testadas em redes de sensores e outras são desenvolvidas especificamente para este fim.

O padrão IEEE 802.15.4 [2] foi desenvolvido para aplicações de redes de sensores com baixo custo, baixo consumo de energia e baixas taxas de transmissão. Apenas a camada física e a camada MAC são padronizadas pelo IEEE. As camadas de rede superiores são padronizadas com o nome de ZigBee por um consórcio de várias empresas. É o principal padrão existente que foi projetado para as características específicas das redes de sensores [3], [4].

Os canais sem fio possuem taxas de erro altas devido à interferência e ao desvanecimento gerado pelo multipercurso. Para aumentar a confiabilidade dos dados enviados no canal sem fio, várias técnicas podem ser empregadas, como o uso de estratégias de retransmissão (ARQ), códigos corretores de erro (FEC) ou o controle da potência de transmissão [5]. Embora estratégias de controle de erros melhorem a confiabilidade de entrega de pacotes, a transmissão de bits adicionais nestes esquemas contribui também para o aumento do consumo de energia, ou seja, existe um compromisso entre a confiabilidade e o consumo de energia. Alguns autores têm estudado esta questão para esquemas de controle de erros em redes de sensores sem fio [6], [7], [8], [9], [10].

Em [6] e [7] a eficiência de energia de diferentes técnicas de controle de erros foi analisada para redes de sensores com um transceiver de rádio comercial usando um modelo analítico. A confiabilidade e o consumo de energia foram analisados em [8] usando simulação para redes de sensores sem nenhuma tecnologia específica ou modelo de canal. A eficiência de energia de estratégias de controle de erros do padrão Bluetooth foi analisada em um canal com desvanecimento Rayleigh usando simulação e novos esquemas de controle de erros foram propostos em [9] e [10]. Alguns estudos têm sido feitos sobre o desempenho [3] e a eficiência de energia [4] do IEEE 802.15.4, porém nenhum destes artigos analisa especificamente os esquemas de controle de erros deste padrão.

Neste artigo é proposto um modelo analítico para a eficiência de energia de estratégias de retransmissão do padrão IEEE 802.15.4. A métrica de eficiência de energia considera em um único parâmetro os requisitos de confiabilidade e energia das redes de sensores. São analisados dois esquemas de controle de erros para redes de sensores usando códigos CRC (*Cyclic Redundancy Check*), com e sem retransmissão. O

canal sem fio é modelado com desvanecimento Rayleigh. Os resultados são obtidos para redes de sensores com diferentes números de saltos e condições de canal. Na Seção II são apresentadas as principais características do padrão IEEE 802.15.4. O modelo analítico para cálculo da eficiência de energia de estratégias de retransmissão é apresentado na Seção III e os resultados obtidos são descritos na Seção IV. Finalmente, a Seção V faz as considerações finais.

II. O PADRÃO IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 foi desenvolvido para sensores de baixa potência, formando redes com um tempo de vida de vários meses ou até anos sem a necessidade de troca de baterias [2], [3]. Os dispositivos podem operar em diferentes bandas: 2,4 GHz (global), 902-928 MHz (Américas) e 868 MHz (Europa). Em 2,4 GHz (16 canais) as taxas chegam a 250 Kbps, com modulação OQPSK (*Offset-Quadrature Phase-Shift Keying*) e espalhamento espectral por seqüência direta (DSSS). As bandas de 868 MHz (1 canal) e 915 MHz (10 canais) também usam DSSS, mas com modulação BPSK (*Binary Phase-Shift Keying*), atingindo taxas de dados de até 20 Kbps e 40 Kbps, respectivamente. O alcance esperado é de 10 a 100 metros, dependendo das características do ambiente. O padrão 802.15.4 define dois mecanismos para acesso ao meio: *beacon* e *non-beacon*. Neste trabalho é usado o modo *non-beacon*, que utiliza a técnica CSMA-CA (*Carrier-Sense Medium Access with Collision Avoidance*).

Dois topologias de rede são suportadas: estrela e ponto-a-ponto. Na topologia estrela a comunicação é feita entre os dispositivos e um controlador central, o coordenador da rede. Na topologia ponto-a-ponto, cada dispositivo da rede pode se comunicar com qualquer outro que esteja ao seu alcance. A Fig. 1 mostra uma rede de sensores ponto-a-ponto com múltiplos saltos onde um sensor deve enviar os dados para um dispositivo central, chamado de coletor. O nó coletor é responsável por receber todas as informações da rede, bem como executar tarefas de gerenciamento dos nós. A rede da Fig. 1 é apenas um exemplo de uma rota da rede de sensores, pois podem existir outras rotas do sensor até o coletor.

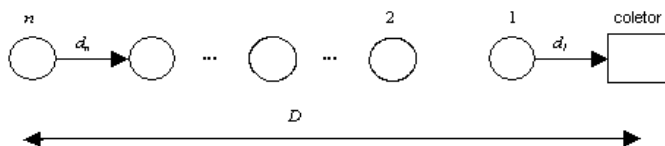


Fig. 1. Rede de sensores com múltiplos saltos.

Cada pacote, chamado de unidade de protocolo de dados PHY (PPDU), contém um cabeçalho de sincronização (5 bytes), um cabeçalho de 1 byte com o tamanho do quadro e a unidade de serviço de dados PHY (PSDU) de no máximo 127 bytes. O quadro PSDU pode ser de 4 tipos: *beacon*, comando MAC, ACK e de dados. O quadro *beacon* só é usado quando a rede está operando no modo *beacon*. O quadro de comando MAC pode ser usado para configuração e controle remoto dos

nós. O quadro ACK é usado para informar ao transmissor se o pacote foi recebido com erros ou não. O quadro de dados é onde está o payload com a informação a ser enviada. Todos estes quadros possuem informação de controle de quadro, número de seqüência, endereço (menos o quadro ACK) e ainda um código CRC para detecção de erros. Nenhum tipo de código corretor de erros é suportado pelo padrão.

O uso do esquema de retransmissão disponibilizado pelo padrão é opcional. Um dispositivo que envia um pacote com o campo de requisição de confirmação do pacote igual a 0 deve assumir que a transmissão foi feita com sucesso e não deve fazer o procedimento de retransmissão. Se o campo de requisição de confirmação é igual a 1 o transmissor deve esperar por no máximo *macAckWaitDuration* para que o quadro ACK correspondente seja recebido. Se o quadro ACK é recebido dentro deste tempo máximo de duração e contém o mesmo número de seqüência de dados da transmissão original a transmissão é considerada completa. Se um quadro ACK não é recebido dentro do tempo máximo ou é recebido com uma seqüência diferente da transmissão original, é considerado que houve erro na transmissão. O dispositivo deve então repetir o processo de transmissão e esperar pelo quadro ACK no máximo *aMaxFrameRetries* vezes. Se o ACK não é recebido depois deste número máximo de retransmissões, o dispositivo assume que a transmissão falhou e notifica a camada de rede superior.

III. MODELO ANALÍTICO

São analisados 2 esquemas de controle de erros:

- 1) código CRC para detecção de erros sem retransmissão;
- 2) código CRC para detecção de erros com retransmissão.

No primeiro esquema o código CRC é usado apenas para verificação de erros. Se houver erro o pacote é descartado e não é transmitido para o próximo nó (numa rede com múltiplos saltos). Num esquema sem CRC, o pacote seria transmitido ao próximo nó mesmo que tivesse erros. No segundo esquema, o código CRC é usado para detecção de erros e solicitação de retransmissão. É enviado um pacote para confirmar ou não a recepção, fazendo com que o transmissor reenvie o pacote em caso de erros. Estes dois esquemas são comparados com um sistema sem capacidade de detecção de erros ou retransmissão.

Para calcular a eficiência de energia dos esquemas de retransmissão IEEE 802.15.4, as probabilidades de erro de pacote devem ser calculadas. Um pacote recebido não é aceito quando qualquer um dos seguintes eventos acontece: (A) o destino falha na sincronização com o pacote enviado; (B) o cabeçalho do pacote enviado está corrompido; (C) os dados do pacote enviado estão corrompidos, causando a falha na verificação de CRC; (D) a fonte é incapaz de sincronizar com o pacote ACK; (E) o cabeçalho do pacote ACK está corrompido e (F) os campos do pacote ACK estão corrompidos, causando falha na verificação de CRC.

Um pacote é sincronizado se todos os bytes do cabeçalho de sincronização são recebidos corretamente:

$$P[\overline{A}] = [1 - p(\gamma_f)]^{40} \quad (1)$$

onde $p(\gamma_f)$ é a probabilidade de erro de símbolo do canal direto em função da relação sinal-ruído (SNR) média recebida $\bar{\gamma}$. Como o pacote ACK também tem um cabeçalho de sincronização de 40 bits, a probabilidade para o evento D tem a mesma forma,

$$P[\overline{D}] = P[\overline{F}] = [1 - p(\gamma_r)]^{40} \quad (2)$$

onde $p(\gamma_r)$ é a probabilidade de erro de símbolo do canal reverso. O evento F ocorre quando qualquer um dos 5 bytes (40 bits) do pacote ACK são recebidos com erro e também é calculado pela equação (2). Os eventos B ou E ocorrem se qualquer bit do cabeçalho PHY for recebido com erro:

$$P[\overline{B}] = [1 - p(\gamma_f)]^8 \quad (3)$$

$$P[\overline{E}] = [1 - p(\gamma_r)]^8 \quad (4)$$

O erro mais provável é o do tipo C, que ocorre quando qualquer um dos bits da PSDU é recebido com erros:

$$P[\overline{C}] = [1 - p(\gamma_f)]^b, \quad (5)$$

onde b é o tamanho da PSDU em bits. O valor de b depende da informação de endereço do dispositivo e do tamanho dos dados. Neste trabalho é considerado que o campo endereço ocupa o tamanho máximo permitido: 20 bytes.

O padrão IEEE 802.15.4 usa diferentes tipos de modulação, como visto na seção anterior. Neste artigo é considerada apenas a modulação OQPSK, a mais utilizada por atingir a maior taxa de transmissão. A probabilidade de erro de símbolo $p(\gamma)$ para a modulação OQPSK é dada por[11]:

$$p(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma}) \quad (6)$$

onde $Q(x)$ é :

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du \quad (7)$$

Assim, a probabilidade de erro de pacote do canal direto, PER_f , e reverso, PER_r , podem ser definidas por:

$$PER_f = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_f) P[\overline{A}] P[\overline{B}] P[\overline{C}] d\gamma_f \quad (8)$$

$$PER_r = 1 - \int_0^\infty f(\gamma_r) P[\overline{D}] P[\overline{E}] P[\overline{F}] d\gamma_r \quad (9)$$

onde $f(\gamma_f)$ e $f(\gamma_r)$ são as funções de densidade de probabilidade do canal direto e reverso, respectivamente.

O canal sem fio é modelado usando desvanecimento Rayleigh, cuja função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad \text{para } \gamma \geq 0 \quad (10)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a SNR media recebida e γ é a SNR instantânea. As probabilidades de erro de pacote podem então ser calculadas usando a equação (10) em (8) e (9). Está sendo considerado que as condições de propagação entre o transmissor e o receptor são as mesmas nas duas direções, ou seja, $\gamma_f = \gamma_r$.

A probabilidade de um pacote ser corretamente recebido no nó coletor para os pacotes sem ARQ é dada por:

$$P_{narq} = (1 - PER_f)^H \quad (11)$$

onde H é o número total de saltos. Considere n o número de retransmissões de um pacote com ARQ. Assumindo que o código CRC é capaz de detectar todos os erros e que o número máximo de retransmissões é infinito ($aMaxFrameRetries \rightarrow \infty$), a probabilidade que um pacote chegue corretamente no coletor é:

$$P_{arq} = \sum_{n=0}^{\infty} [(1 - PER_f)(1 - PER_r)]^{H+n} = 1 \quad (12)$$

A probabilidade de acontecerem n retransmissões é o produto de falha nas $n-1$ transmissões e a probabilidade de sucesso na n ésima transmissão:

$$p_N[n] = (1 - PER)(PER)^{n-1} \quad (13)$$

Então, a equação (14) é usada para calcular o número médio de retransmissões \bar{N} em um salto:

$$\bar{N} = \sum_{n=1}^{\infty} p_N[n] \times n \quad (14)$$

O número de pacotes recebidos com erro no coletor pode ser definido para os pacotes sem ARQ como o produto do número total de pacotes transmitidos n_{pac} e a probabilidade que o pacote chegue com erro no coletor:

$$n_{error} = (1 - P_{narq}) \times n_{pac} \quad (15)$$

Fazendo as mesmas considerações da equação (12), nenhum dos pacotes ARQ é recebido no coletor com erros e assim $n_{error} = 0$:

$$n_{error} = (1 - P_{arq}) \times n_{pac} = 0 \quad (16)$$

A confiabilidade R é dada pela porcentagem dos pacotes enviados que são recebidos corretamente no coletor e pode ser calculada da seguinte forma:

$$R = [(n_{pac} - n_{error}) / n_{pac}] \quad (17)$$

Como não está sendo usado nenhum hardware específico, o consumo de energia é expresso de forma normalizada. As energias consideradas são as gastas no processo de comunicação (transmissão e recepção).

É considerado o mesmo modelo de [8] e [9], onde a recepção de um bit consome aproximadamente 75% da energia gasta para transmitir um bit. A energia mínima consumida E_{min} para H saltos é calculada para um pacote sem nenhum controle de erros (sem ARQ):

$$E_{min} = H \times n_{pac} \times (n_{bits} + n_{bits} \times 0.75) \quad (18)$$

onde n_{bits} é o número total de bits do pacote. A energia consumida total E numa rede de sensores para um pacote sem ARQ é o número total de bits transmitidos e recebidos:

$$E = H \times n_{pac} \times (n_{bits} + n_{bits} \times 0.75) \quad (19)$$

Para os pacotes com ARQ, a energia E é o número total de bits transmitidos e recebidos, incluindo as retransmissões:

$$E = H \times n_{pac} \times \bar{N} \times [n_{bits} + n_{ack} + (n_{bits} + n_{ack}) \times 0.75] \quad (20)$$

onde n_{ack} é o número total de bits do pacote de retorno (ACK).

Para calcular a energia E para o caso do esquema 1 (CRC sem ARQ) é preciso calcular o número médio de saltos que um pacote vai ter na rede sem ser descartado. A probabilidade que um pacote atinja h saltos é o produto do sucesso em $h-1$ saltos e a probabilidade de falha no h -ésimo salto, se $h < H$. Se $h=H$ a probabilidade de um pacote atingir H saltos é o produto do sucesso nos $h-1$ saltos e a probabilidade de falha no h -ésimo salto mais a probabilidade de sucesso em H saltos:

$$p_H[h] = [(1-PER_f)^{h-1}(PER_f)], \text{ se } h < H \quad (21)$$

$$p_H[h] = [(1-PER_f)^{h-1}(PER_f) + (1-PER_f)^h], \text{ se } h = H$$

Então o número médio saltos \bar{H} pode ser calculado:

$$\bar{H} = \sum_{h=1}^H p_H[h] \times h \quad (22)$$

A energia total consumida E para os pacotes com CRC e sem ARQ é:

$$E = \bar{H} \times n_{pac} \times (n_{bits} + n_{bits} \times 0.75) \quad (23)$$

Para uma rede de sensores ser considerada eficiente em energia, o máximo número de bits de dados deve ser transmitido com o mínimo consumo de energia. O parâmetro de eficiência de energia η pode ser definido como:

$$\eta = \frac{E_{min}}{E} \times R \quad (24)$$

IV. RESULTADOS DO MODELO ANALÍTICO

Nos resultados obtidos para eficiência de energia apresentados nesta seção um sensor envia 100000 pacotes ao coletor ($n_{pac}=100000$). Apenas um nó sensor transmite de cada vez. Assume-se que a rede IEEE 802.15.4 está formada e operando no modo *non-beacon* com uma rota já estabelecida. São usados os 2 tipos de esquemas definidos na Seção III (A32/64 e C32/64) para diferentes tamanhos de dados: 32 e 64 bytes. Estes tipos de pacotes juntamente com o pacote sem controle de erros (N32/64) são listados na Tabela I.

Tabela I. Tipos de pacotes

Tipo	ARQ	CRC	Dados (bytes)
A32/64	Sim	Sim	32/64
N32/64	Não	Não	32/64
C32/64	Não	Sim	32/64

As Figuras 2 a 4 mostram a eficiência de energia em função da relação sinal-ruído para pacotes com 32 bytes de dados e diferentes números de saltos. Quando a SNR diminui, a eficiência de energia também diminui. No entanto, os diferentes esquemas têm desempenho diferente quando o número de saltos varia. Para 1 salto (Fig. 2) sempre é mais vantajoso não usar nenhum tipo de retransmissão. Para 5 saltos (Fig. 3), não usar retransmissão (N32 e C32) tem melhor eficiência de energia quando a SNR está acima de 15 dB. Abaixo desse valor o esquema de retransmissão (A32) tem maior eficiência, pois como a qualidade do canal está pior, algum tipo de controle de erros é necessário. O esquema 1 (C32) sempre é melhor que N32. Em redes com múltiplos

saltos é mais eficiente usar código CRC para detectar erros e descartar os pacotes errôneos do que não usar nenhum tipo de detecção de erros, pois os pacotes com erro são repassados ao próximo nó, gastando energia desnecessariamente. Para 15 saltos (Fig. 4), o uso de retransmissão tem melhor eficiência de energia para valores de SNR abaixo de aproximadamente 23 dB. Com o aumento do número de saltos aumenta também a necessidade de controle de erros.

As Figuras 5 a 7 mostram a eficiência de energia para pacotes com 64 bytes de dados para 1, 5 e 15 saltos, respectivamente. O desempenho dos esquemas de controle de erros para 64 bytes é praticamente o mesmo que os obtidos para 32 bytes. Para poucos saltos e boas condições de canal (SNR acima de 25 dB), a melhor opção é não usar retransmissão. Quando a rede tem mais saltos ou o valor da SNR não é muito alto (abaixo de 20 dB), usar retransmissão tem melhor eficiência de energia. A principal diferença entre pacotes com 32 e 64 bytes de dados é que com 64 bytes a estratégia de retransmissão é melhor para uma faixa mais ampla de SNR. Para 5 saltos, por exemplo, o esquema de retransmissão tem a maior eficiência de energia para valores de SNR até 15 dB, para 32 bytes (Fig. 3), e até aproximadamente 18 dB, para 64 bytes (Fig. 6).

As Figuras 8 a 10 mostram a eficiência de energia em função do número de saltos da rede para 10, 20 e 30 dB de relação sinal-ruído. Estes gráficos reforçam as conclusões tiradas das Figuras 2 a 7. A observação mais interessante é que a eficiência dos pacotes com retransmissão (A32) diminui apenas com a SNR, permanecendo constante com o aumento do número de saltos. Enquanto que a eficiência de energia para os demais esquemas (N32 e C32) praticamente tende a zero com a degradação da relação sinal-ruído e do número de saltos (Fig. 10), a estratégia de retransmissão (A32) consegue manter a eficiência de energia em um valor razoável mesmo para uma condição de canal muito severa.

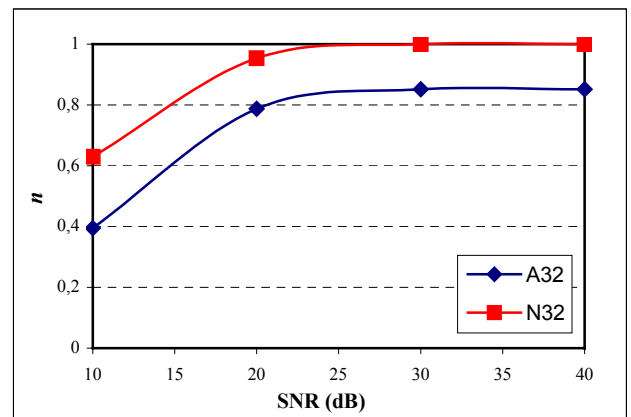


Fig. 2. Eficiência de energia para 1 salto, 32 bytes.

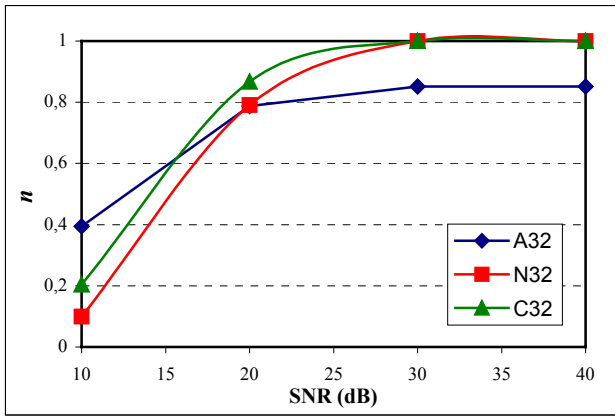


Fig. 3. Eficiência de energia para 5 saltos, 32 bytes.

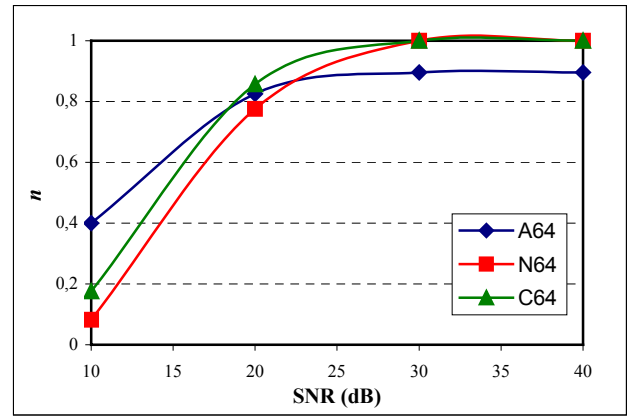


Fig. 6. Eficiência de energia para 5 saltos, 64 bytes.

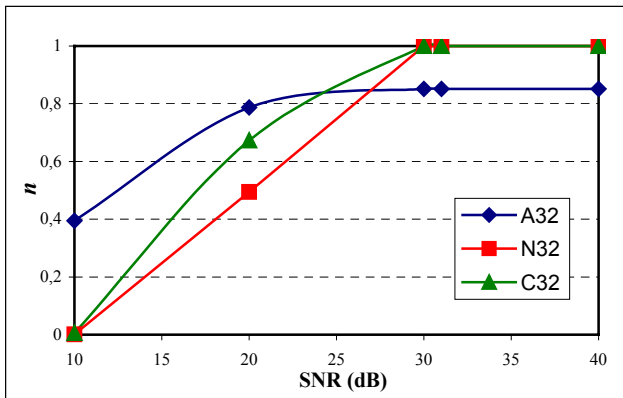


Fig. 4. Eficiência de energia para 15 saltos, 32 bytes.

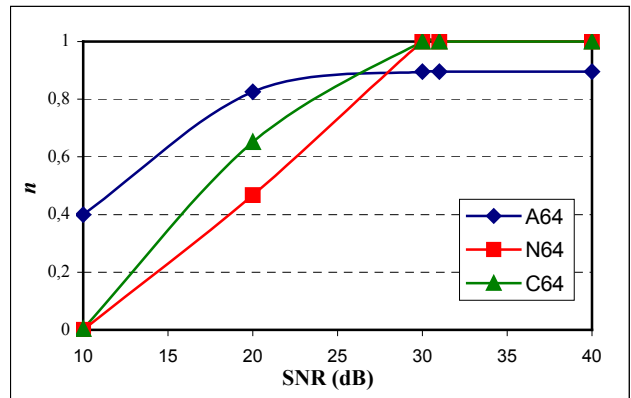


Fig. 7. Eficiência de energia para 15 saltos, 64 bytes.

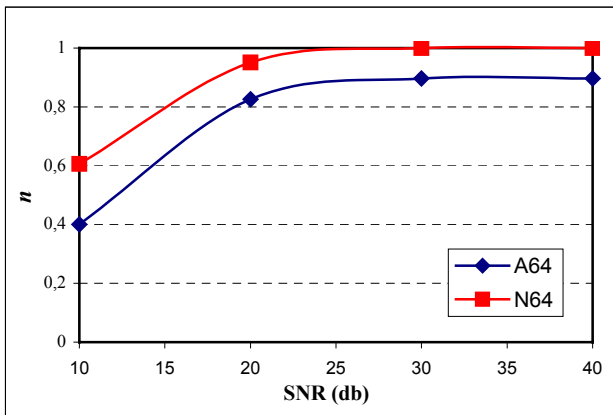


Fig. 5. Eficiência de energia para 1 salto, 64 bytes.

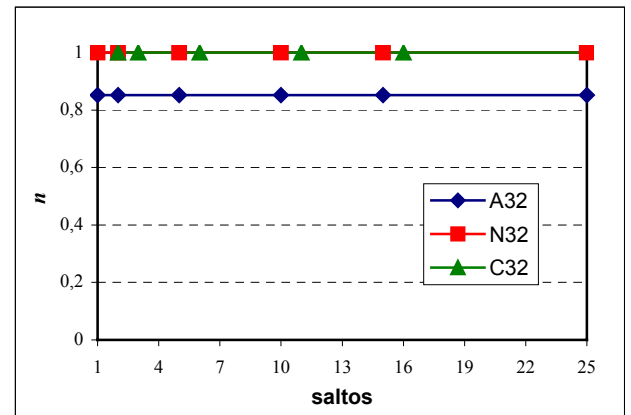


Fig. 8. Eficiência de energia para 30 dB.

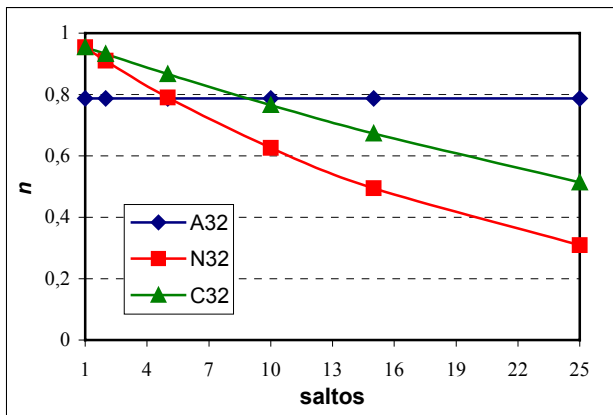


Fig. 9. Eficiência de energia para 20 dB.

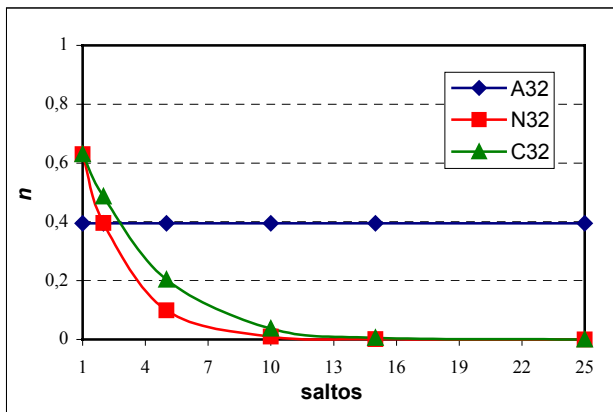


Fig. 10. Eficiência de energia para 10 dB.

V. CONCLUSÃO

Neste artigo foi analisada a eficiência de energia de estratégias de retransmissão em redes de sensores sem fio usando o padrão IEEE 802.15.4. Um modelo analítico foi proposto para cálculo da métrica de eficiência de energia em canais com desvanecimento Rayleigh. Os resultados mostraram que as condições de canal e o número de saltos

afetam o desempenho da rede. Para boas condições de canal (SNR acima de 25 dB) e poucos saltos, não é necessário usar retransmissão. Nestas condições o uso de CRC apenas para detecção de erros é a melhor opção. Para mais saltos e qualidade de canal ruim (SNR abaixo de 20 dB) deve-se usar retransmissão. O modelo apresentado neste artigo pode ser adaptado para outras tecnologias de redes de sensores e outros esquemas de controle de erros, como um código corretor de erro e esquemas híbridos (FEC/ARQ).

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramanian e E. Cayirci, "A survey on sensor networks", *IEEE Communications Magazine*, pp. 102-114, Agosto 2002.
- [2] IEEE Std. 802.15.4, "IEEE Standard for wireless medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications for low-rate wireless personal area networks (LR-WPANs)", 2003.
- [3] J. Mistic, S. Shafi e V. B. Mistic, "The impact of MAC parameters on the performance of 802.15.4 PAN", *Ad Hoc Networks*, vol. 3, pp. 509-528, Setembro 2005.
- [4] B. Bougard, F. Catthoor, D. Daily, A. Chandrasakan e W. Dehaene, "Energy efficiency of the IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: modeling and improvement perspectives", *IEEE Design, Automation and Test, Munique, Alemanha, Março 2005*.
- [5] H. Liu, H. Ma, M. El Zarki e S. Gupta, "Error control schemes for networks: an overview", *Mobile Networks and Applications*, vol. 2, pp. 167-182, Junho 1997.
- [6] Y. Sankarasubramanian, I. F. Akyildiz e S. W. Mc Laughlin, "Energy efficiency based packet size optimization in wireless sensor networks", *Proc. of Sensor Network Protocols and Applications*, 2003.
- [7] H. Karvonen, Z. Shelby e C. Pomala-Ráez. "Coding for energy efficient wireless embedded networks", *Int. Workshop on Wireless Ad-hoc Networks*, 2004.
- [8] J. Meer, M. Nijdam e M. Bijl, "Adaptive error control in a wireless sensor network using packet importance valuation", *Hardware/software co-design, Enschede, Holanda, Maio 2003*.
- [9] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz, "Power efficient error control for Bluetooth-based sensor networks", *IEEE Local Computer Networks Conference, Sydney, Australia, Novembro 2005*.
- [10] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz, "Custom error control schemes for energy efficient Bluetooth sensor networks", *SBrT/IEEE International Telecommunications Symposium, Fortaleza, Brasil, Setembro 2006*.
- [11] B. Sklar, "Digital Communications", Prentice Hall, 1995.