

Controle Adaptativo de Erros para Redes de Sensores sem Fio usando Informação de Área de Cobertura

João H. Kleinschmidt e Walter C. Borelli

*Departamento de Telemática – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas
{joaohk,borelli}@dt.fee.unicamp.br*

Resumo

Este artigo propõe estratégias adaptativas de controle de erros para redes de sensores usando valor de informação de mensagens. O valor de informação é baseado na área de cobertura dos sensores. Os pacotes mais importantes são protegidos por esquemas com maior capacidade de correção de erros do que pacotes menos importantes. Foram analisados códigos BCH e esquemas de retransmissão com modulação OQPSK. Os resultados obtidos mostram que os esquemas adaptativos melhoram a confiabilidade de pacotes com alto valor de informação sem aumentar de maneira significativa o consumo de energia.

Abstract

This paper proposes adaptive error control strategies for wireless sensor networks using informational value of messages. The informational value is based on sensors coverage area. Important packets are protected by more powerful error control schemes than less important packets. BCH codes and retransmission schemes were analyzed using OQPSK modulation. The results obtained show that the adaptive schemes improve the reliability of packets with high informational value without a significant increase in the energy consumption.

1. Introdução

As redes de sensores sem fio são formadas por dispositivos que possuem componentes para sensoriamento, processamento de dados e comunicação [1]. A economia de energia nestas redes é uma questão muito importante, pois geralmente a substituição de baterias não é possível e uma rede deve operar por vários meses ou até anos. Algumas aplicações destas

redes são o monitoramento ambiental em locais como florestas e oceanos, teste de qualidade de produtos num ambiente industrial, entre outras. O sensor deve enviar os dados para um dispositivo central, chamado de coletor.

Os canais sem fio possuem altas taxas de erro devido à interferência e ao desvanecimento gerado pelo multipercurso, levando ao desperdício de energia. Algumas técnicas podem ser empregadas para melhorar a confiabilidade dos dados enviados no canal sem fio, como o uso de estratégias de retransmissão (ARQ), códigos corretores de erro (FEC) ou o controle da potência de transmissão [2]. Embora que 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 [3], [4], [5], [6], [7], [8].

A codificação de canal utiliza códigos corretores de erros para combater erros de bit adicionando redundância (bits de paridade) aos pacotes de dados antes que sejam transmitidos. Esta redundância é usada pelo receptor para detectar e corrigir erros. Sistemas ARQ têm apenas a capacidade de detectar erros e não é feita nenhuma tentativa para corrigir os pacotes recebidos com erro; é feita uma requisição para que os pacotes recebidos com erro sejam retransmitidos. A detecção de erros é geralmente feita usando um código CRC (*Cyclic Redundancy Check*).

Alguns trabalhos analisam a eficiência de energia de diferentes esquemas de controle de erros em redes de sensores [3], [4], [5]. A melhor opção é usar esquemas adaptativos que mudam a correção de erros no pacote de acordo com alguma variável [6], [7], [8]. Em [7] são propostos esquemas adaptativos que

mudam o tipo de controle de erros utilizado de acordo com o número de saltos da rede e da qualidade do canal sem fio. Em [8] é usado um esquema semelhante, onde um pacote será mais protegido de acordo com o valor da informação do pacote. Este valor da informação é baseado no número de saltos que o pacote percorreu na rede. Quanto maior o número de saltos, maior o valor da informação e, conseqüentemente, maior deve ser a capacidade de detecção e correção de erros. Estes trabalhos [7], [8] consideram os pacotes com maior número de saltos como os mais importantes porque já utilizaram bastante energia da rede. Se forem perdidos, toda esta energia foi desperdiçada.

Neste trabalho é proposta uma nova abordagem para calcular o valor de informação de um pacote, baseada na área de cobertura de um sensor. Este valor de informação é usado em uma estratégia de controle de erros adaptativa. O conceito de valor de informação é apresentado na Seção II. A Seção III descreve o modelo de simulação utilizado e na Seção IV são apresentadas estratégias de controle de erros adaptativas usando códigos BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) e ARQ. Os resultados obtidos são descritos na Seção V e a Seção VI faz as considerações finais.

2. Valor de informação

A melhor maneira de quantificar o valor de informação é ter conhecimento da aplicação da rede. Como as redes de sensores têm inúmeras aplicações, o valor de informação varia para cada uma delas. Nesta seção é proposto um método para cálculo do valor de informação baseado na área de cobertura dos sensores, que pode ser usado e adaptado para diversas aplicações.

Um métodos de quantificar a informação é baseado em medidas de contagem. Medir o valor de informação baseado em contagem pode ser definido como o número de leituras de sensores agregadas em um pacote. Esta abordagem é fácil de calcular e não precisa de nenhuma informação adicional da rede. Quando um sensor 1 envia uma leitura de dados para um sensor 2, o valor de informação V é 1. Se o sensor 2 agregar no pacote a sua leitura de dados, o valor de informação passa a ser 2. Se o sensor 2 apenas repassar a informação do sensor 1 para o próximo nó, o valor de informação continua sendo 1. A cada agregação de dados V é aumentado em uma unidade. Essa foi a abordagem utilizada em [8] para cálculo de V .

No entanto, a medida do valor de informação baseada em contagem tem suas desvantagens. Se os

sensores estão distribuídos aleatoriamente numa região, algumas áreas podem ser observadas por muitos sensores e outras por poucos sensores. A Figura 1 mostra um caso onde os sensores não estão distribuídos de maneira uniforme. A rede possui oito sensores, porém cinco cobrem uma região pequena e apenas três cobrem uma outra região de área maior.

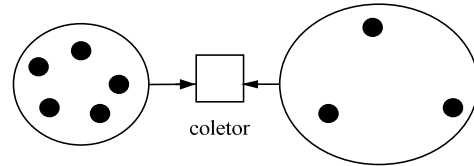


Figura 1. Rede com sensores distribuídos de forma desigual

Se a medida de V baseada em contagem fosse usada, o lado esquerdo da rede da Figura 1 contribuiria com mais informação. No entanto, isto não é verdade, pois o lado direito cobre uma região maior com menos sensores e isso deveria influenciar o valor de informação. Uma opção para este problema é medir o valor V baseado na área observada pelos sensores. A proposta desta seção para cálculo de V é usar o conceito de densidade espacial, definida pelo número de sensores n_s numa dada área A :

$$d_s = \frac{n_s}{A}. \quad (1)$$

O valor de informação V_k da k -ésima medida de um sensor é dado por:

$$V_k = \frac{1}{d_s}. \quad (2)$$

Por exemplo, considere uma região de área 100 m^2 sendo monitorada por 50 sensores. A área total é dividida em sub-áreas que são monitoradas por uma determinada quantidade de sensores. Se a sub-área 1 de 20 m^2 é coberta por 5 sensores, $d_{s1} = n_{s1}/A_1 = 5/20 = 0.25$. Uma sub-área 2 de 15 m^2 monitorada por 20 sensores tem $d_{s2} = n_{s2}/A_2 = 20/15 = 1.33$, e assim por diante. Quanto mais sensores estiverem cobrindo uma área, maior será a densidade espacial e menor o valor de V . Um controle de erros mais robusto será aplicado quando V for grande e menos controle de erros quando V for pequeno.

3. Modelo de simulação

As simulações foram feitas usando o software Matlab® usando as probabilidades de erros de pacote descritas nesta seção. Para cada transmissão/recepção é atualizada a energia consumida e se o pacote foi recebido corretamente ou não.

O pacote de dados da camada de enlace é a unidade de comunicação entre os nós sensores da rede, consistindo de um cabeçalho de c bits, um trailer de t_r bits e d bits de dados, como mostra a Figura 2. Os dados possuem um código CRC para detecção de erros. O pacote de retorno ACK no caso de retransmissão possui o mesmo formato, porém sem o campo para dados.

cabeçalho c bits	dados d bits	trailer t_r bits
-----------------------	-------------------	-----------------------

Figura. 2. Formato do pacote

Um pacote enviado não é aceito pelo receptor quando qualquer um dos cinco eventos acontece: (A) o cabeçalho do pacote enviado está corrompido; (B) o destino falha ao sincronizar com o trailer do pacote enviado; (C) os dados do pacote enviado estão corrompidos, causando falha na verificação de CRC; (D) o cabeçalho do pacote de retorno está corrompido e (E) a fonte é incapaz de sincronizar com o trailer do pacote de retorno. Está sendo assumido que os erros são estatisticamente independentes.

O cabeçalho é recebido corretamente se todos os bits são recebidos corretamente:

$$P[\overline{A}] = [1 - p(\gamma_f)]^c, \quad (3)$$

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

$$P[\overline{D}] = [1 - p(\gamma_r)]^c, \quad (4)$$

onde $p(\gamma_r)$ é a probabilidade de erro de bit do canal reverso. Os eventos B ou E ocorrem se qualquer bit do trailer de sincronização for recebido com erro:

$$P[\overline{B}] = [1 - p(\gamma_f)]^{t_r} \quad (5)$$

$$P[\overline{E}] = [1 - p(\gamma_r)]^{t_r} \quad (6)$$

O erro mais provável é o do tipo C, que ocorre quando os bits de dados são recebidos com erros. Para o caso sem nenhum tipo de código corretor de erros:

$$P[\overline{C}] = [1 - p(\gamma_f)]^d, \quad (7)$$

Para pacotes em que os dados são protegidos com um código corretor de erros, a probabilidade do evento C é calculada considerando a capacidade de correção do código. Para um código BCH (n, k, t) capaz de corrigir até t erros numa palavra código, é dada por:

$$P[\overline{C}] = \sum_{k=0}^t \binom{n}{k} \cdot [p(\gamma_f)]^k \cdot [1 - p(\gamma_f)]^{n-k} \quad (8)$$

A probabilidade de erro de bit $p(\gamma)$ varia com o tipo de modulação utilizada para transmissão. Neste trabalho é usada a modulação OQPSK (*Offset Quadrature Phase-Shift Keying*), que é utilizada no padrão IEEE 802.15.4 para redes de sensores. A probabilidade de erro de bit para a modulação OQPSK é dada por [9]:

$$p(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma}), \quad (9)$$

onde $Q(x)$:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (10)$$

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

$$PER_f = 1 - \int_0^{\infty} f(\gamma_f) P[\overline{A}] P[\overline{B}] P[\overline{C}] d\gamma_f \quad (11)$$

$$PER_r = 1 - \int_0^{\infty} f(\gamma_r) P[\overline{D}] P[\overline{E}] d\gamma_r, \quad (12)$$

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

O canal sem fio é modelado usando desvanecimento Rayleigh. Esta distribuição é amplamente utilizada para a modelagem de canais sem fio. A função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad \text{para } \gamma \geq 0 \quad (13)$$

onde $\bar{\gamma}$ é a SNR média recebida e γ é a SNR instantânea. As probabilidades de erro de pacote podem então ser calculadas usando a equação (13) em (11) e (12). 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 confiabilidade é dada pela porcentagem dos pacotes enviados que chegam corretos no coletor. Sendo n_{pac} o número total de pacotes enviados pelo sensor e n_{erro} o número de pacotes que chegam com erro no nó coletor, a confiabilidade C é dada por:

$$C = [(n_{pac} - n_{erro}) / n_{pac}] \quad (14)$$

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) e decodificação. A energia gasta na codificação é muito pequena [3], [7], [10] e está sendo considerada desprezível.

É considerado o mesmo modelo de [4] e [5], onde a recepção de um bit consome aproximadamente 75% da energia gasta para transmitir um bit. A energia mínima consumida E_{min} é calculada para um pacote sem nenhum controle de erros:

$$E_{\min} = n_{pac} \times (n_{bits} + n_{bits} \times 0.75), \quad (15)$$

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 mais a energia gasta na decodificação E_{dec} :

$$E = n_{pac} \times (n_{bits} + n_{bits} \times 0.75 + E_{dec}) \quad (16)$$

A energia E_{dec} para um código BCH (n, k, t) com m memórias pode ser calculada usando o número de instruções de processador necessárias para fazer a decodificação [10]. O número de instruções n_{inst} é dado por [10]:

$$n_{inst} = kt(t+1)m + 2tm + ((k+2)t(t+1) + (3t-2)n + 2(t+1)(t+3)) + (kt(t+1) + (3t-2)(n-1) + 2t(t+1)) \quad (17)$$

A energia gasta na transmissão de um bit é muito maior que a energia gasta pelo processador para executar uma instrução [3], [11]. Neste trabalho são considerados os parâmetros de [11], onde a energia de transmissão é aproximadamente 2700 vezes maior que a energia gasta para executar uma instrução. Logo, a energia de decodificação é dada por:

$$E_{dec} = \frac{n_{inst}}{2700} \quad (18)$$

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

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

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

4. Controle de erros adaptativo

De acordo com o valor de informação V uma diferente proteção de erros será escolhida para a mensagem. Quanto maior o valor de V , maior deve ser a capacidade de correção de erros. Existe uma relação entre o valor de informação e a proteção escolhida $V \rightarrow P(V)$. O problema está em como fazer este mapeamento, já que as propriedades de P não são conhecidas. Usar uma função poderia ser uma solução. Esta função receberia como parâmetro o valor V e retornaria o valor de proteção P desejado, indicando que deveria ser usado um código com capacidade de correção de P erros, por exemplo. No entanto, encontrar uma função adequada não é uma tarefa simples [8].

Outra opção é usar tabelas que façam o mapeamento $V \rightarrow P(V)$. Para cada valor ou faixa de valores V_i , determinada proteção de erros é aplicada. Esta é a abordagem utilizada neste artigo para escolher o controle de erros. Cada aplicação pode ter uma tabela diferente, de acordo com as suas necessidades. Antes do nó sensor enviar os dados, calcula o valor de informação V_i e procura na tabela a proteção P

correspondente. Esse é o controle de erros a ser utilizado no pacote. Neste trabalho são usados dois tipos de controle de erros: códigos BCH e retransmissão (ARQ).

Para o controle de erros adaptativo usando valor de informação baseado em área, foram definidos três tipos de regiões:

- 1) Região muito densa: $d_s \geq 1$;
- 2) Região densa: $0.5 < d_s < 1$;
- 3) Região pouco densa: $d_s \leq 0.5$.

Cada pacote de dados originado por um sensor de uma região terá um controle de erros diferente, baseado na densidade espacial d_s . O sensor deve ter essa informação geográfica. Baseado na densidade d_s , o valor de informação V pode ser calculado. Três esquemas adaptativos são propostos, usando códigos BCH, ARQ e híbrido (BCH/ARQ), como mostra a Tabela 1. Quanto maior o valor de V , mais robusta deve ser a correção de erros. No código BCH, isto é feito aumentando a capacidade de correção de erros t . Para ARQ, é feito aumentando o número máximo de retransmissões. Achar o mapeamento ótimo $V \rightarrow P(V)$ não é uma tarefa trivial. Foram feitas várias simulações com diferentes estratégias. Os resultados foram analisados e os esquemas adaptativos foram sendo melhorados baseados nesses resultados obtidos, até chegar nos esquemas da Tabela 1.

Tabela 1. Controle de erros adaptativo

Valor de informação	Controle de erros		
	BCH adaptativo	ARQ adaptativo retransmissões	BCH/ARQ adaptativo (código/retransmissões)
$V \leq 1$	sem código	1	BCH (127,120,1) / 1
$1 < V < 2$	BCH (127,99,4)	5	BCH (127,106,3) / 4
$V \geq 2$	BCH (127,64,10)	10	BCH (127,64,10) / 10

5. Resultados

Os resultados foram obtidos através de simulação. Os pacotes são enviados dos nós sensores diretamente para o coletor (1 salto). As simulações foram feitas com os seguintes parâmetros: $n_{pac}=100000$, pacotes com 24 bits de cabeçalho, 8 bits de trailer e 120 bits de dados. A rede de sensores simulada possui três regiões com densidades espaciais diferentes. Uma região R_1 possui $d_{s1} \geq 1$; região R_2 com $0.5 < d_{s2} < 1$ e R_3 com $d_s \leq 0.5$, caracterizando regiões muito densas, densas e

pouco densas. O valor de n_{pac} é o total de pacotes das três regiões, sendo que cada região gera 1/3 desse total.

As Figuras 3 a 8 apresentam os resultados obtidos. A Figura 3 compara a confiabilidade para pacotes com valor de informação $V \geq 2$ de diferentes esquemas usando código BCH, BCH adaptativo e BCH/ARQ adaptativo. Estes pacotes são os que contêm informação mais importante. Pode-se observar que a confiabilidade é maior quando usada a estratégia BCH/ARQ adaptativo. Para uma relação sinal-ruído de 5 dB, por exemplo, um pacote sem correção de erro teria pouco mais de 30% de chances de ser recebido corretamente no coletor. Com BCH adaptativo, a confiabilidade aumenta para mais de 50% e para o BCH/ARQ adaptativo para mais de 90%. Para valores altos de SNR, acima de 20 dB, a confiabilidade de todas as estratégias é muito parecida por existirem poucos erros no canal. A Figura 4 mostra a confiabilidade para pacotes com valor de informação $V_k \geq 2$ de diferentes estratégia ARQ. Foram usadas estratégias com no máximo 2 retransmissões (ARQ-2), 5 retransmissões (ARQ-5), esquema ARQ adaptativo e esquema BCH/ARQ adaptativo. Os dois esquemas adaptativos são os que possuem a melhor confiabilidade.

No entanto, os esquemas adaptativos têm um consumo de energia maior, como pode ser visto nas Figuras 5 e 6. Esta energia é a energia total consumida na rede, incluindo os pacotes com qualquer valor V . A vantagem do BCH adaptativo é aumentar a confiabilidade de pacotes com V alto sem aumentar de forma muito significativa o consumo de energia, se comparado com o código BCH com $t=2$, por exemplo. O esquema BCH/ARQ adaptativo tem um consumo de energia bem maior que as demais estratégias para valores baixos de SNR neste cenário de simulação. Porém, o consumo de energia dos esquemas adaptativos é dependente da porcentagem do total de pacotes (n_{pac}) que possuem V alto. Se poucos pacotes tiverem $V \geq 2$, o consumo de energia cai bastante, enquanto a confiabilidade permanece alta. Isto porque os esquemas adaptativos gastam mais energia (usando correção de erros robusta) apenas em pacotes com valor de informação alto. A desvantagem de um esquema adaptativo pode ser visto nas Figuras 7 e 8, que mostram a confiabilidade para pacotes com $V \leq 1$. Como os pacotes tem V baixo, o esquema adaptativo não usa códigos com grande capacidade de correção de erros. Mas como são pacotes menos importantes a sua perda não traz problemas para a aplicação.

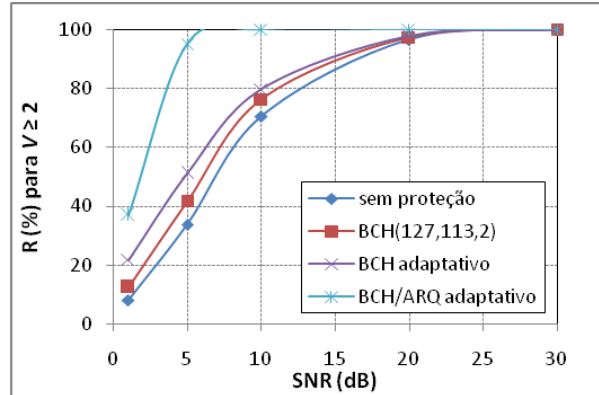


Figura 3. Confiabilidade de esquemas BCH para $V \geq 2$

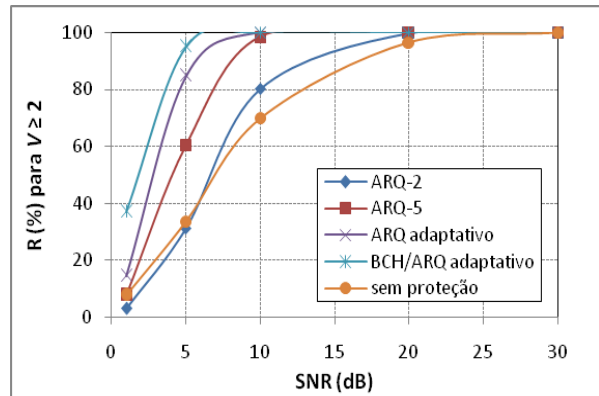


Figura 4. Confiabilidade de estratégias ARQ para $V \geq 2$

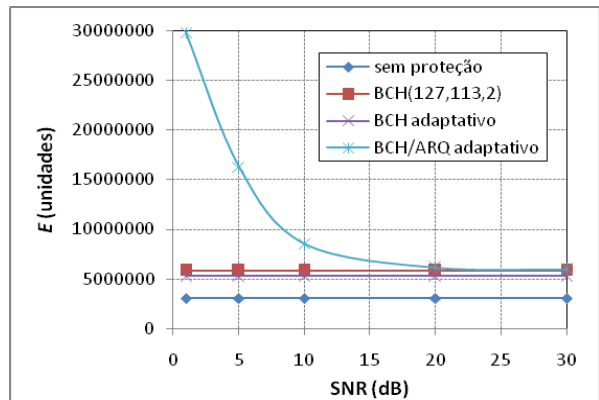


Figura 5. Energia consumida de esquemas BCH

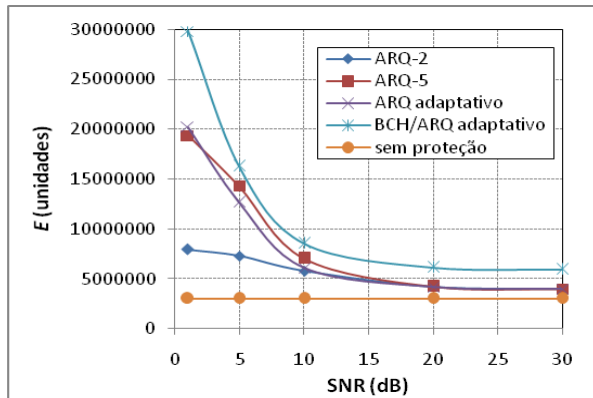


Figura 6. Energia consumida de estratégias ARQ

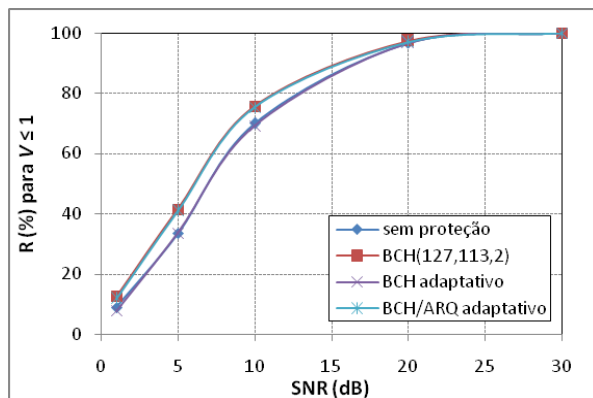


Figura 7. Confiabilidade de esquemas BCH para $V \leq 1$

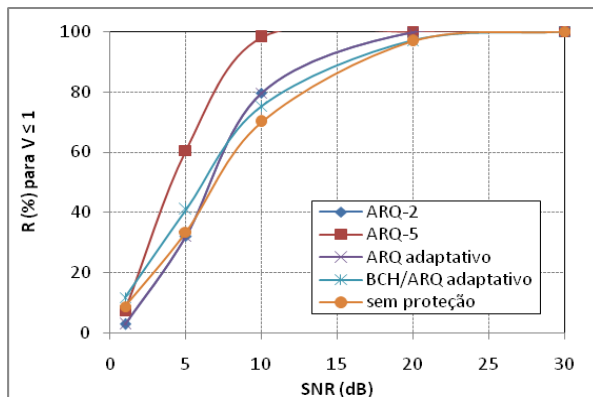


Figura 8. Confiabilidade de estratégias ARQ para $V \leq 1$

6. Conclusão

Neste artigo foram propostas estratégias adaptativas de controle de erros usando valor de informação de mensagens. Pacotes originados de áreas cobertas por um menor número de sensores têm maior valor de informação. Os esquemas adaptativos BCH e ARQ aumentam a confiabilidade de pacotes com alto valor de informação quando comparados à controle de erros estáticos, sem um grande aumento na energia

consumida na rede. Diferentes tipos de FEC e esquemas híbridos FEC/ARQ também podem ser analisados em trabalhos futuros. As estratégias propostas podem ser utilizadas e adaptadas para diversas aplicações de redes de sensores para aumentar a confiabilidade de mensagens consideradas mais importantes na rede.

7. 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] 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.
- [3] 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.
- [4] H. Karvonen, Z. Shelby e C. Pomalaza-Ráez. "Coding for energy efficient wireless embedded networks", Int. Workshop on Wireless Ad-hoc Networks, 2004.
- [5] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e M. E. Pellenz, "An analytical model for energy efficiency of error control schemes in sensor networks", IEEE International Conference on Communications, Glasgow, Escócia, Junho 2007.
- [6] 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.
- [7] J. H. Kleinschmidt, W. C. Borelli e 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, Elsevier, in press, 2008.
- [8] A. Kopke, H. Karl e M. Lobbers, "Using energy where it counts: Protecting important messages in the link layer", European Workshop on Wireless Sensor Networks, Janeiro 2005.
- [9] B. Sklar, Digital Communications, Prentice Hall, 1995.
- [10] C. Desset e A. Fort, "Selection of channel coding for low-power wireless systems", Proc. IEEE Vehicular Technology Conference, Jeju, Korea, Abril 2003.
- [11] V. Raghunathan, C. Schurgers, S. Park e M. B. Srivastava, "Energy aware wireless micro sensor networks", IEEE Signal Processing, pp. 40-50, Março 2002.