

Controle de Erros Adaptativo para Redes de Sensores sem Fio usando Valor de Informação de Mensagens Baseado em Entropia

João H. Kleinschmidt e Walter C. Borelli

Resumo – Este artigo propõe estratégias de controle de erros adaptativo para redes de sensores usando valor de informação de mensagens. O valor de informação é baseado na probabilidade de ocorrência de evento. Os pacotes mais importantes são protegidos com esquemas com capacidade de correção de erros maior 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.

Palavras-Chave – valor de informação, controle de erros, redes de sensores, confiabilidade.

Abstract – This paper proposes adaptive error control strategies for wireless sensor networks using informational value of messages. The informational value is based on the event probability. 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.

Index terms – informational value, error control, sensor networks, reliability.

I. INTRODUÇÃO

As redes de sensores sem fio são formadas por dispositivos que possuem componentes para sensoriamento, processamento de dados e comunicação [1]. O consumo 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. O nó coletor é responsável por receber todas as informações da rede, bem como executar tarefas de gerenciamento dos nós.

A rede de sensores pode ter múltiplos saltos, ou seja, para o sensor enviar os dados até o coletor, os dados devem passar por nós intermediários, geralmente outros sensores com capacidade de roteamento. 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 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*).

Como a energia em redes de sensores é bastante limitada, usar correção de erros sem necessidade desperdiça energia. 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 terá sido desperdiçada.

No entanto, uma importante questão não é considerada. O valor dos dados carregados pelo pacote. Considere uma rede de sensores responsável pelo monitoramento da qualidade do ar de uma região. Periodicamente deve enviar as medidas de diversas grandezas físicas que auxiliem no monitoramento. Se acontece uma variação muito rápida em alguma delas, uma determinada ação deve ser tomada. Esta mensagem contém mais informação do que as outras. Logo, este pacote é mais importante e deve ser transmitido de forma mais confiável, usando um controle de erros mais eficiente.

Neste trabalho é proposta uma nova abordagem para calcular o valor de informação de um pacote, baseado no conceito de entropia, diferente de [7] e [8] que calculam o valor de informação baseado no número de saltos. Baseada na quantidade de informação que o pacote contém, um diferente esquema de controle de erros é aplicado. O conceito de valor de informação é apresentado na Seção II. A Seção III descreve o modelo de simulação utilizado e estratégias de controle de erros adaptativo usando códigos BCH (Bose-Chaudhuri-Hocquenghem) e ARQ são apresentadas na Seção IV. Os resultados obtidos são descritos na Seção V e a Seção VI faz as considerações finais.

II. 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 no conceito de entropia, que pode ser usado e adaptado para diversas aplicações. A definição do valor de informação não é uma tarefa fácil sem conhecimento específico da aplicação [8].

Uma rede de sensores que monitora condições atmosféricas, por exemplo, tem características diferentes de uma rede que monitora a qualidade da água de um rio. Alguns métodos de quantificar a informação de uma forma mais geral são baseados em medidas de contagem, área ou entropia. Medir o valor de informação baseado em contagem pode ser definido como 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. Se a medida de V baseada em contagem fosse usada, isto não seria levado em consideração. Uma opção para este problema é medir o valor V baseado na área observada pelos sensores.

As medidas baseadas em área tentam calcular a informação adicional que um sensor contribui e tem a desvantagem de necessitarem de informação geográfica. Medidas do valor de informação baseadas em entropia são provavelmente as melhores medidas, porque tentam calcular precisamente este valor de informação adicional [8]. Essa afirmação é feita em [8], mas nenhuma medida baseada em entropia é proposta pelos autores, que usaram apenas a medida baseada em contagem. Nesta seção é proposto um método para cálculo de valor de informação usando o conceito de entropia.

Considere um sensor de temperatura numa determinada região. Se a temperatura se mantém constante, a quantidade de informação carregada pelo pacote é pequena. Mas se há uma variação brusca na temperatura a quantidade de informação aumenta, devido à probabilidade de ocorrer uma variação grande ser menor. Se um sensor é o único a observar determinada área ele contribui com mais informação do que um sensor que está numa área coberta por vários sensores. Um sensor que reporta um início de incêndio contribui com bastante informação, pois este é um evento inesperado. Logo, deve-se usar um controle de erros mais eficiente nas mensagens com maior valor de informação.

De acordo com a teoria da informação [9], a quantidade de informação de evento pode ser calculada usando a probabilidade de ocorrência do evento. O valor de informação V_i da i -ésima medida de um sensor é calculada da mesma maneira:

$$V_i = I_i = \log_2 \frac{1}{p_i} \quad (1)$$

onde p_i é a probabilidade de ocorrência do evento i , ou seja, a probabilidade que a i -ésima medida tenha determinado valor X_i . Deve-se agora definir como calcular a probabilidade de tal evento.

Seja X_i o valor da i -ésima medida do sensor e X_{i-1} o valor da medida anterior. A variação Δ é dada por:

$$\Delta = |X_i - X_{i-1}| \quad (2)$$

Um sensor de qualquer grandeza física como temperatura, pressão, umidade, dentre outras, tem um valor mínimo l_{min} e um valor máximo l_{max} que pode medir desta grandeza. Pode-se então definir a faixa de operação F_o do sensor:

$$F_o = l_{max} - l_{min} \quad (3)$$

Logo, a probabilidade de ocorrência de um evento p_i será dada pela variação Δ em relação a faixa de operação:

$$p_i = \frac{F_o - \Delta}{F_o} \quad (4)$$

O valor da probabilidade p_i será mais próximo de 1 (um) quando houver uma pequena variação da grandeza medida e mais próximo de 0 (zero) quando houver uma grande variação no valor medido pelo sensor. O valor de informação V_i aumenta quanto menor for o valor da probabilidade p_i . Logo, será maior quanto maior for a variação no valor da grandeza física na i -ésima medida em relação à medida anterior.

III. 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 1. 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.

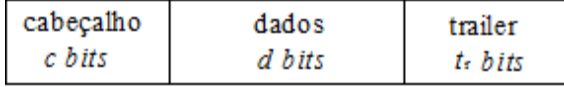


Fig. 1. Formato do pacote.

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:

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

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,

$$P[\overline{D}] = [1 - p(\gamma_r)]^c, \quad (6)$$

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:

$$P[\overline{B}] = [1 - p(\gamma_f)]^{t_r} \quad (7)$$

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

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:

$$P[\overline{C}] = [1 - p(\gamma_f)]^d, \quad (9)$$

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:

$$P[\overline{C}] = \sum_{k=0}^t \binom{n}{k} \cdot [p(\gamma_f)]^k \cdot [1 - p(\gamma_f)]^{n-k} \quad (10)$$

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]:

$$p(\gamma) = Q(\sqrt{2\gamma}), \quad (11)$$

onde $Q(x)$:

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (12)$$

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

$$PER_f = 1 - \int_0^{\infty} f(\gamma_f) P[\overline{A}] P[\overline{B}] P[\overline{C}] d\gamma_f \quad (13)$$

$$PER_r = 1 - \int_0^{\infty} f(\gamma_r) P[\overline{D}] P[\overline{E}] d\gamma_r, \quad (14)$$

onde $f(\gamma_f)$ 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:

$$f(\gamma) = \frac{1}{\bar{\gamma}} \exp\left(-\frac{\gamma}{\bar{\gamma}}\right), \quad \text{para } \gamma \geq 0 \quad (15)$$

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 (15) em (13) e (14). 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:

$$C = [(n_{pac} - n_{erro}) / n_{pac}] \quad (16)$$

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:

$$E_{min} = n_{pac} \times (n_{bits} + n_{bits} \times 0.75), \quad (17)$$

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} :

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

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]:

$$n_{inst} = kt(t+1)m + 2tm + ((k+2)t(t+1) + (3t-2)n + 2(t+1)(t+3)) + (kt(t+1) + (3t-2)(n-1) + 2t(t+1)) \quad (19)$$

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:

$$E_{dec} = \frac{n_{inst}}{2700} \quad (20)$$

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

$$E = n_{pac} \times [n_{bits} + n_{ack} + (n_{bits} + n_{ack}) \times 0.75] \quad (21)$$

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

IV. 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. Basicamente, pode ser feito de três maneiras: usando uma função, heurística ou tabela.

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 uma heurística para aumentar a proteção P de acordo com uma regra local do nó sensor, que considere a relação custo-benefício do consumo de energia/confiabilidade.

A última 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.

FEC e ARQ são as duas categorias básicas de técnicas de controle de erros. ARQ é relativamente simples e tem bom desempenho se as taxas de erro não são muito grandes. No entanto, pode levar a grandes atrasos na rede se as condições de canal são ruins. Os esquemas FEC têm um bom desempenho e podem manter as taxas de atraso constantes mesmo em más condições, mas para manter a confiabilidade vários padrões de erro devem ser corrigidos. Então um código muito longo é necessário, impondo uma sobrecarga de transmissão bastante alta. São usados dois tipos de controle de erros: códigos BCH e retransmissão.

Para o controle de erros adaptativo usando valor de informação baseado em entropia, foram definidas dez faixas de valores de informação onde serão aplicadas diferentes estratégias de controle de erros. Estas faixas de V indicam de pequenas a grandes variações na grandeza física medida. Aplicações específicas podem definir valores diferentes. No controle adaptativo com código BCH, para cada faixa de valores V mostrada na Tabela I a capacidade de correção t também aumenta em 1. Para ARQ, o número máximo de retransmissões também aumenta em 1, até o máximo de 10

retransmissões. Esta tabela mostra o mapeamento usado neste trabalho. Cada aplicação pode fazer o seu ajuste para $V \rightarrow P(V)$. Tanto o cálculo de V quanto a escolha do esquema de correção de erros pode ser feita localmente pelo nó sensor. Esta estratégia adaptativa de acordo com V_i não garante a confiabilidade de entrega de cada pacote, mas tenta garantir a confiabilidade de evento. Eventos importantes da rede, como mudanças bruscas na grandeza física medida terão sua confiabilidade aumentada.

Tabela I. Controle de erros adaptativo

Valor de informação	Controle de erros	
	FEC	ARQ (retransmissões)
$0 \leq V_i < 0.0145$	-	1
$0.0145 \leq V_i < 0.0291$	BCH (127,120,1)	2
$0.0291 \leq V_i < 0.0589$	BCH (127,113,2)	3
$0.0589 \leq V_i < 0.1203$	BCH (127,106,3)	4
$0.1203 \leq V_i < 0.2176$	BCH (127,99,4)	5
$0.2176 \leq V_i < 0.3219$	BCH (127,92,5)	6
$0.3219 \leq V_i < 0.5146$	BCH (127,85,6)	7
$0.5146 \leq V_i < 0.731$	BCH (127,78,7)	8
$0.731 \leq V_i < 1$	BCH (127,71,9)	9
$1 \leq V_i$	BCH (127,64,10)	10

V. RESULTADOS

Foram considerados dados de temperatura, numa variação de -10°C a 40°C , ou seja, $l_{min} = -10$ e $l_{max} = 40$. Os valores de temperatura totalizam 10000 medições. A partir destes valores foi calculado o valor informacional V_i para cada medição. Aproximadamente 78,6% das medições têm $V_i < 0.059$, 14,2% com $0.059 \leq V_i \leq 0.5$ e 7,2% têm $V_i > 0.5$. Diferentes medições teriam porcentagens diferentes de cada faixa de valor de informação. Os pacotes são enviados dos nós sensores diretamente para o coletor (1 salto). Cada pacote possui 24 bits de cabeçalho, 8 bits de trailer e 120 bits de dados.

As Figuras 2 a 7 apresentam os resultados obtidos através de simulação. A Figura 2 mostra a confiabilidade para pacotes com valor de informação $V_i > 0.5$ para códigos BCH com diferentes capacidades de correção de erros e para o esquema BCH adaptativo (de acordo com Tabela I). Estes pacotes são os que contêm informação mais importante. Pode-se observar que a confiabilidade é maior quando usado código BCH (127,85,6) e BCH 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%. Para valores altos de SNR, acima de 15 dB, a confiabilidade de todas as estratégias é muito parecida por existirem poucos erros no canal. O código BCH (127,85,6) tem uma confiabilidade muito próxima do BCH adaptativo (Figura 2).

No entanto, o consumo de energia é maior, como pode ser visto na Figura 3. Esta energia é a energia total consumida na rede, incluindo os pacotes com qualquer valor V_i . O consumo é maior quanto maior for a capacidade de correção do código. A energia consumida é constante com o aumento da SNR porque o número de bits transmitidos e recebidos permanece o mesmo. O esquema BCH adaptativo tem um consumo de

energia menor que o código BCH (127,85,6) e maior que sem proteção ou código BCH (127,113,2). A vantagem do BCH adaptativo é aumentar a confiabilidade de pacotes com V_i alto sem aumentar de forma muito significativa o consumo de energia, como acontece com o código BCH com $t=6$. A desvantagem de um esquema adaptativo pode ser visto na Figura 4, que mostra a confiabilidade para pacotes com $V_i < 0.059$. Como os pacotes tem V_i 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. A confiabilidade dos pacotes para o BCH adaptativo é quase a mesma de não usar nenhuma proteção.

As Figuras 5 a 7 mostram a confiabilidade e energia para diferentes estratégias ARQ. Foram usadas estratégias com no máximo 2 retransmissões (ARQ-2), 5 retransmissões (ARQ-5), 10 retransmissões (ARQ-10) e o esquema ARQ adaptativo (conforme Tabela I). A Figura 5 mostra que o ARQ adaptativo e ARQ-10 têm a melhor confiabilidade para pacotes com $V_i > 0.5$. Por exemplo, para 5 dB, a confiabilidade sem correção de erros é de apenas 30% e para ARQ-5 é de 60%. O ARQ adaptativo aumenta a confiabilidade para aproximadamente 80% e ARQ-10 para mais de 80%. No entanto, o ARQ adaptativo tem a vantagem de gastar menos energia do que ARQ-10, como mostra a Figura 6. Ao contrário dos pacotes BCH, a energia consumida para os pacotes ARQ varia de acordo com a SNR. Isto ocorre porque com uma SNR menor, são necessárias mais retransmissões, gastando mais energia. A desvantagem do ARQ adaptativo é para os pacotes com $V_i < 0.059$, pois a confiabilidade é menor que as outras estratégias de ARQ, como mostra a Figura 7.

A Tabela II faz uma comparação dos dois esquemas adaptativos: BCH e ARQ. O ARQ adaptativo é melhor que o BCH adaptativo para proteger os pacotes com V_i alto, porém com maior consumo de energia para valores de SNR abaixo de 20 dB. Por acontecerem muitas retransmissões quando o canal está ruim, a energia consumida aumenta. Para SNR de 5 dB, por exemplo, atinge quase 80% de confiabilidade. Porém, a energia consumida é quase o dobro do BCH, que atinge 52% de confiabilidade. O BCH adaptativo tem melhor confiabilidade para valores baixos de V_i .

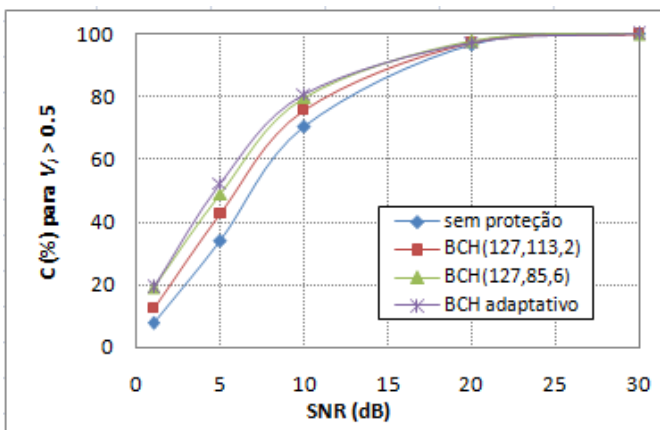


Fig. 2. Confiabilidade de códigos BCH para $V_i > 0.5$.

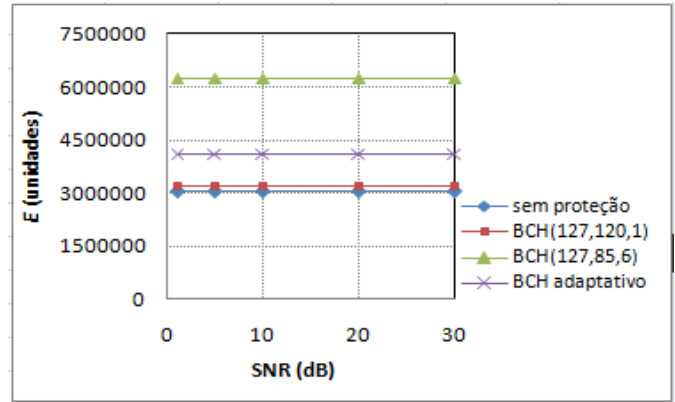


Fig. 3. Energia consumida para códigos BCH.

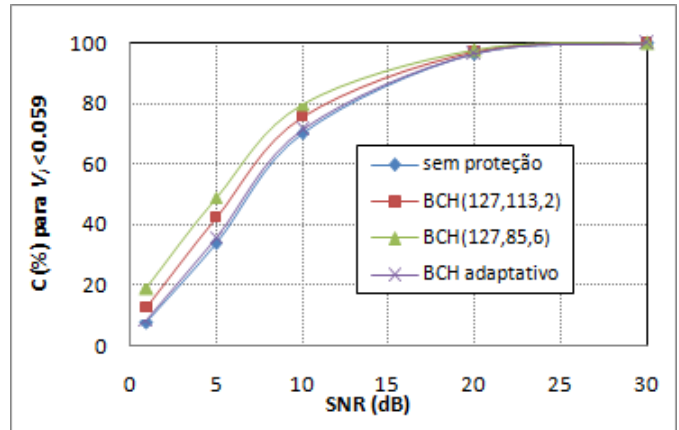


Fig. 4. Confiabilidade de códigos BCH para $V_i < 0.059$.

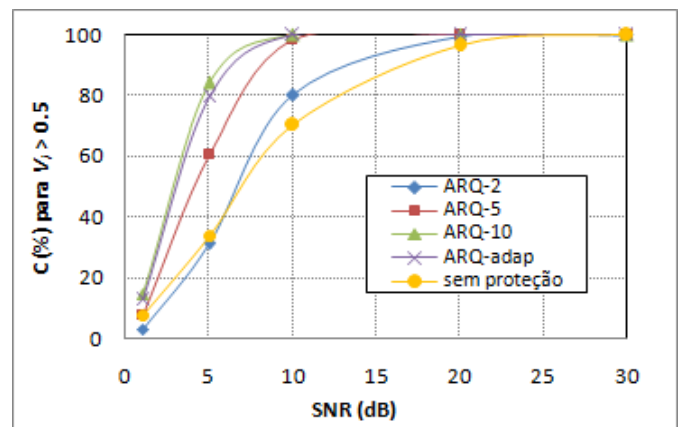


Fig. 5. Confiabilidade de estratégias ARQ para $V_i > 0.5$.

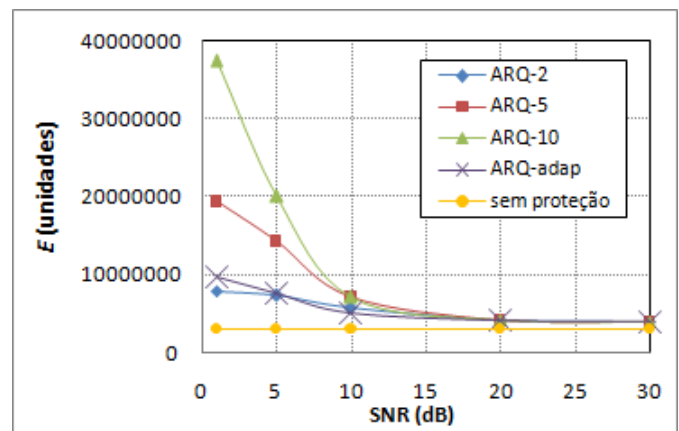


Fig. 6. Energia consumida para estratégias ARQ.

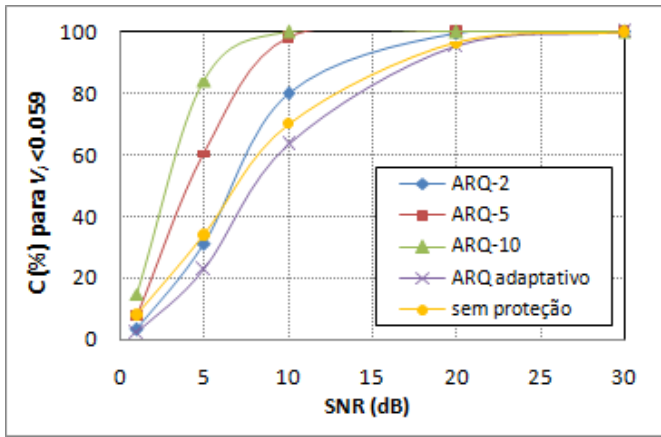


Fig. 7. Confiabilidade de estratégias ARQ para $V_i < 0.059$.

Tabela II. Comparação entre esquemas adaptativos BCH e ARQ

SNR	BCH adaptativo			ARQ adaptativo		
	E	C $V_i < 0.059$	C $V_i > 0.5$	E	C $V_i < 0.059$	C $V_i > 0.5$
1	4102160	8.52	19.17	972940	2.15	12.57
5	4102160	35.80	52.43	7539000	22.68	79.38
10	4102160	71.47	80.76	5052400	63.57	99.72
20	4102160	96.49	97.29	4094000	95.31	100
30	4102160	100	100	4000000	100	100

VI. CONCLUSÃO

Neste artigo foram propostas estratégias de controle de erros adaptativo usando valor de informação de mensagens. Eventos com maior probabilidade de ocorrência tem valor de informação maior que eventos menos prováveis. Os esquemas adaptativos BCH e ARQ aumentam a confiabilidade de pacotes com alto valor de informação quando comparados com 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.

REFERÊNCIAS

- [1] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam 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. Sankarasubramaniam, 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.