Uma nova classe de mensagens para redes IEEE 802.15.4

Odilson T. Valle[123], André V. Milack[2], Carlos Montez[2], Paulo Portugal[3] e Francisco Vasques[3]

***Resumo*— As Redes de Sensores Sem Fio tem sido cada vez mais indicadas para uso no ruidoso ambiente industrial. Um padrão de destaque é o IEEE 802.15.4, mas este não apresenta os mecanismos adequados para atender todas as demandas industriais. Neste sentido, este trabalho apresenta uma expansão no uso deste padrão, bem como apresenta três propostas que minimizam o impacto da perda de mensagens devido ao ruído eletromagnético, habilitando diferentes propostas de retransmissão de mensagens. Para comprovar a eficácia das propostas é feita uma análise comparativa com o mecanismo de garantias fornecido pela norma.**

***Palavras-Chave*— Redes de Sensores Sem Fio, Confiabilidade, Redes Industriais.**

***Abstract*— Wireless Sensor Networks are being increasingly recommended for use in noisy industrial environment. An interesting standard to be used is IEEE 802.15.4, but it does not have the appropriate mechanisms to meet all requirements of industrial communications. Thus, this paper presents an expansion in the use of this standard, and presents three proposals that minimize the impact of message loss due to electromagnetic noise, enabling different approaches to retransmit messages. To prove the effectiveness of the proposed approaches, a comparative analysis is made with mechanism of guaranties provided by the standard.**

***Keywords*— Wireless Sensor Networks, Reliability, Industrial Networks.**

I. INTRODUÇÃO

O cenário industrial atual é de extrema competitividade, onde se procura cada vez mais minimizar os custos e, como consequência, os preços dos produtos. De acordo com [1] o novo paradigma para as indústrias é: melhorar a qualidade dos produtos, minimizar os custos de capital, estender a vida útil dos equipamentos, simplificar operações, minimizar custos de operação e aumentar a disponibilidade dos equipamentos. Este paradigma, além das consequências diretas no processo produtivo, permite a redução de emissões de poluentes, assunto tão em voga na atualidade.

De encontro a este novo paradigma, as Redes de Sensores Sem Fio (RSSF) estão aportando nas industriais para atender suas demandas desde a manutenção preventiva (*Predictive Maintenance* – PdM) [2] até a automação fabril. *The International Society of Automation* (ISA) definiu 6 classes de uso para troca de mensagens num ambiente industrial, dependendo do tipo de aplicação, como pode ser visto na Tabela I. A própria

TABELA I
CLASSES DE USO ISA [3].

Categoria	Classe	Aplicação	Descrição	Importância do prazo de entrega da mensagem
Segurança	0	Ações emergenciais	(sempre crítica)	↑
Controle	1	Circuito fechado para controle regulamentar	(muitas vezes crítica)	
	2	Circuito fechado para controle de supervisão	(geralmente não crítica)	
	3	Controle em malha aberta	(humano na malha)	
Monitoramento	4	Alerta	Consequências operacionais de curto prazo (por exemplo, a manutenção baseada em eventos)	
	5	Registro e *downloading/ uploading*	Sem consequências operacionais imediatas (por exemplo, coleta de história, sequência de eventos, manutenção preventiva)	

ISA defende que, a exceção da classe 0, todas as classes podem ser atendidas por meio de redes sem fio.

Portanto, a troca de mensagens em ambientes industriais se constitui em um desafio atual em RSSF, devido às necessidades de garantias temporais, baixo *jitter* e/ou controle na perda de mensagens.

As redes baseadas no padrão IEEE 802.15.4 [4] vem sendo propostas para emprego em ambientes industriais, no entanto, com relação à perda de pacotes, o protocolo IEEE 802.15.4 apresenta diversos problemas em seus dois modos de operação: com e sem *beacon*. No modo de operação sem *beacon* não há quaisquer garantias, sejam deterministas ou probabilistas. No modo de operação com *beacon* o superquadro é dividido em duas partes: o CAP (*Contention Access Period*) e o CFP (*Contention Free Period*). No CFP há a possibilidade de uso de compartimentos garantidos: GTS (*Guaranteed Time Slots*). Sob a ótica de classes, a norma apresenta duas classes de uso: uma sem garantias (CAP) e outra com garantia de acesso ao meio (GTS). No entanto apresenta alguns problemas mencionados na literatura:

- Há apenas 7 *slots* garantidos. Essa é uma severa restrição dado que em uma aplicação industrial pode haver mensagens de um número elevado de sensores que deveriam apresentar algum tipo de garantia [5].
- A garantia oferecida pelo GTS é apenas contra colisões de mensagens enviadas por dispositivos IEEE 802.15.4. As interferências causadas por outras redes ou ruídos eletromagnéticos estão sempre presentes no ambiente fabril [6] e não são devidamente tratadas pela norma.

Para minimizar estas limitações e expandir as classes de uso

[1]Instituto Federal de Santa Catarina, Campus São José, Brazil, [2]DAS, Universidade Federal de Santa Catarina, Brazil, [3]IDMEC/ISR, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. Este trabalho foi parcialmente financiado pela CAPES e FAPESC do Brasil e ISR e IDMEC de Portugal. Email:odilson@ifsc.edu.br, andrevicente.m@gmail.com, montez@das.ufsc.br, {pportugal,vasques}@fe.up.pt.

do padrão IEEE 802.15.4, propõe-se a criação da `Terceira Classe (3C)` de mensagens, com requisitos de confiabilidade superiores aos previstos no padrão e que, ao mesmo tempo, permite a coexistência com nodos legados.

A nova classe faz uso de parte do período inativo do superquadro do IEEE 802.15.4 para transferir mensagens entre nodos e o coordenador PAN, (*Personal Area Network*) com possibilidade de retransmissão de mensagens perdidas. Para fins de comparação da eficácia na retransmissão de mensagens, e consequente minimização do impacto dos erros de comunicação, foram analisadas 3 técnicas de retransmissão neste período: `BlockACK`, `Mestre-Escravo` e `TDMA Redundante`.

As principais contribuições deste trabalho são: i) a criação de um período que permite uma **Terceira Classe** (3C) de mensagens com maior confiabilidade de entrega quando comparado com o período GTS, ii) o comparativo do desempenho de três técnicas clássicas de retransmissão de mensagens com o serviço oferecido pelos GTS.

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: na Seção II são apresentados os principais trabalhos relacionados com este tema. Uma pequena revisão das características relevantes do padrão IEEE 802.15.4 está apresentada na Seção III. Na Seção IV apresenta-se os mecanismos para criação do período 3C bem como uma breve descrição das técnicas de retransmissão sob análise. Na Seção V é feita uma análise comparativa entre as diversas técnicas de retransmissão e o GTS, e, finalmente, na Seção VI são apresentadas as conclusões.

II. Trabalhos Relacionados

O principal foco do trabalho [7] é sobre a capacidade de tempo real do protocolo IEEE 802.15.4 e a sua confiabilidade. Foram identificadas limitações específicas deste protocolo que restringem seu uso para aplicações em tempo real e com atrasos limitados. Foi proposta uma alteração na camada MAC contemplando dois aspectos: a modificação da estrutura do superquadro com a implementação de um esquema TDMA (neste aspecto esta proposta é similar a [8]) e a redução do *overhead* na tentativa de melhorar sua empregabilidade neste tipo de cenário.

Uma estrutura para comunicação confiável em RSSF, que é capaz de suportar a transferência de dados em tempo real usando retransmissões é proposto em [9]. A solução proposta permite a retransmissão de mensagens reportadas como corrompidas, sem comprometer os prazos das mensagens ordinárias. A ideia principal é de reservar parte do tempo de transmissão para um determinado número de retransmissões. O reconhecimento de mensagens é efetuado via *piggyback* ou através de um canal de tempo real dedicado. Supõe-se que o meio é *full-duplex*, onde o pacote e confirmações são transmitidos de uma forma simultânea. Se um reconhecimento não é recebido após um intervalo de tempo predefinido, o pacote deve ser retransmitido num intervalo de tempo especificamente reservado para esta finalidade. Esta proposta é semelhante à técnica `BlockACK` analisada neste trabalho, com a diferença que em nossa proposta o reconhecimento é efetuado para grupos de mensagens, utilizando um único quadro.

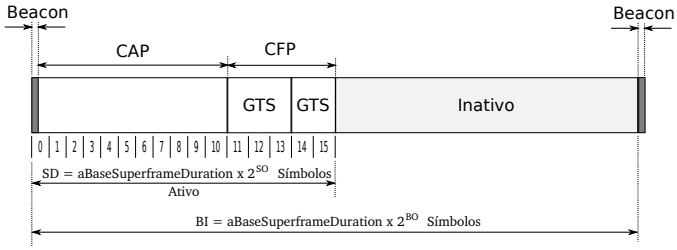


Fig. 1. Um exemplo da estrutura do superquadro [4]

Em [10], propõe-se uma abordagem semelhante ao `Mestre/Escravo` deste trabalho, com as seguintes diferenças: no esquema original, propõe-se um número teoricamente ilimitado de retransmissões, onde o limite final é o prazo da mensagem. Outra diferença está no uso de um mecanismo de escalonamento do tipo EDF (*Earliest Deadline First*) [11] das mensagens em tempo real. Na proposta apresentado em nosso trabalho, foi assumido que o tráfego é periódico, onde cada nó tem um *slot* fixo para a transmissão, portanto, não há necessidade de qualquer esquema de escalonamento dinâmico.

III. Padrão IEEE 802.15.4

É um padrão que define os protocolos de interconexão de dispositivos via comunicação por rádio numa rede de área pessoal – WPAN (*Wireless Personal Area Network*). O padrão utiliza como mecanismo de acesso ao meio o CSMA-CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) e suporta a topologia estrela, ponto a ponto e agrupamento em árvore. O acesso ao meio é baseado em contenção, entretanto, utilizando uma estrutura opcional de superquadro, compartimentos de tempo podem ser alocados para os dispositivos com transmissão de dados sujeitos a restrições temporais.

Sub-camada de controle de acesso ao meio

A Subcamada MAC (*Medium Access Control*) do padrão IEEE 802.15.4 provê uma interface entre a camada física e as camadas superiores das WPANs. Um dos grandes problemas desta camada é decidir quem terá direito de transmitir e em que momento, já que o meio físico é compartilhado. Para resolver este problema é utilizado o protocolo CSMA-CA.

Caso deseje-se a confirmação do recebimento do quadro, o padrão prevê o envio pelo dispositivo receptor de um quadro de reconhecimento – ACK (*Acknowledgment*), que deverá ser encaminhado imediatamente após o recebimento do quadro contendo dados. O envio do ACK não utiliza o mecanismo CSMA-CA, já que o padrão prevê um tempo ocioso no meio logo após o envio de quadro de dados, prevendo justamente o envio do ACK.

A subcamada MAC suporta dois modos de operação: com e sem farol (*beacon*). A escolha do modo é feita pelo coordenador PAN.

No modo com *beacon* (relacionado a este trabalho), *beacons* são gerados periodicamente pelo coordenador PAN, com objetivo de sincronizar e identificar a PAN e é criada uma estrutura chamada de `superquadro`. Um exemplo do mesmo pode ser visto na Fig. 1. Seu formato é definido pelo coordenador e pode ser conter duas partes: ativa e inativa.

A parte ativa pode ser dividida em outras duas partes: CAP (*contention access period*) e CFP (*contention-free period*) que ao todo possuem 16 compartimentos iguais. Os últimos compartimentos, de 0 a no máximo 7, são do tipo GTS (*guaranteed time slot*) que totalizam o período CFP. Durante a comunicação usando o CAP, um dispositivo que deseja comunicar deve competir pelo meio com outros dispositivos, utilizando o CSMA-CA.

Para aplicações de baixa latência ou aplicações que requeiram largura de banda específica deve-se fazer uso do período livre de contenção (CFP), onde o coordenador PAN pode dedicar porções de tempo do superquadro ativo para as mesmas. Os GTS são utilizados para a comunicação entre determinado dispositivo e o coordenador PAN. Juntos, os GTS, formam o período livre de contenção. O dispositivo que necessitar utilizar um GTS deve efetuar a solicitação de reserva do mesmo através de mensagens enviadas ao coordenador PAN durante o CAP.

As equações que regem a formação do superquadro são:

$$BI = aBD \cdot 2^{BO} \quad para \quad 0 \leq BO \leq 14 \qquad (1)$$

$$SD = aBD \cdot 2^{SO} \quad para \quad 0 \leq SO \leq BO \leq 14 \qquad (2)$$

Os parâmetros BI e SD são, respectivamente, *Beacon Interval* e *Superframe Duration* e determinam a ordem da estrutura do superquadro, baseados no parâmetros BO (*Beacon Order*) e SO (*Superframe Order*). O parâmetro aBD (`aBaseSuperframeDuration` na norma) [4] denota a duração mínima do superquadro, correspondendo a SO = 0. O padrão IEEE 802.15.4 fixa esta duração em 960 símbolos, onde um símbolo corresponde a 4 bits. Este valor é equivalente a 15.36 ms, assumindo uma taxa de transmissão de dados de 250 kbps, na frequência de 2.4 GHz. Variando-se os parâmetros BO e SO é possível modificar o superquadro de acordo com as necessidades, aumentando ou diminuindo a duração do período ativo e inativo e, em consequência a duração de um *slot*. Também é possível configurar o sistema para não haver período inativo.

IV. Expansão de classes no IEEE 802.15.4

Para expandir a utilização do quadro do IEEE 802.15.4, sem o comprometimento de sistemas legados, propõe-se a expansão do superquadro criando a **Terceira Classe** de mensagens durante o período inativo, Fig. 2. É importante observar que a criação da **Terceira Classe** permitirá a compatibilidade total com aplicações existentes, as quais poderão ter seus nodos utilizando normalmente os períodos CAP e CFP.

Para atender esta proposta, o coordenador define um superquadro onde BO $>$ SO, ligeiramente diferente da norma que prevê: BO $\geq$ SO. Desta forma garante-se que sempre haverá um período de inatividade, o qual será utilizado pelos nodos 3C. O coordenador, tendo controle sobre estes parâmetros, pode ajustá-los de acordo com as demandas do momento, inclusive ajustando a extensão do período 3C até ao limite máximo de inatividade padrão do IEEE 802.15.4. Como a pretensão de uso da classe 3C é destinada a aplicações que tenham maiores requisitos de confiabilidade, o tempo desta

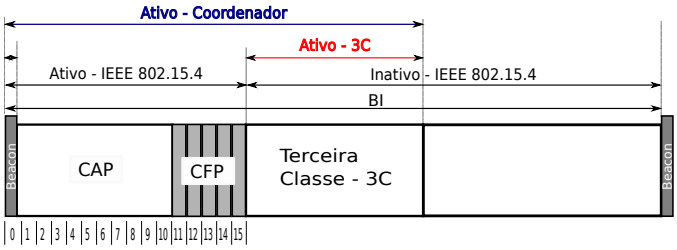


Fig. 2. Superquadro modificado com a criação da **Terceira Classe** de uso.

classe será compartimentado, inibindo colisões na disputa pelo acesso ao meio.

Visando a minimização do consumo energético, os nodos terão seu período de atividade determinado pela classe a que pertencem, conforme também pode ser observado na Figura 2. Os nodos IEEE 802.15.4 têm seu período de atividade em conformidade com a norma, já os nodos 3C têm seu período de atividade deslocados em relação aos nodos IEEE 802.15.4. O nodo coordenador deverá estar ativo no período igual ao somatório dos demais períodos ativos.

Para que a nova classe seja efetivada, somente o nodo coordenador e os nodos 3C precisam ser programados diferentemente do previsto na norma. O nodo coordenador terá sua programação alterada de forma a conviver tanto com os nodos IEEE 802.15.4 como os nodos 3C. Já os nodos 3C serão programados de acordo com a necessidade. Neste trabalho são efetuadas algumas propostas para sua utilização.

O mecanismo de requisição de um ou mais compartimentos exclusivos 3C é o mesmo mecanismo de solicitação de *slots* GTS previsto na norma, ou seja, um nodo que deseja este tipo de alocação deve efetuar uma requisição durante o período CAP, aguardar o aceite do coordenador e então poderá encaminhar suas mensagens normalmente no(s) compartimento(s) a si destinado(s). Maiores detalhes sobre a alocação dos GTS podem ser obtidos na própria norma [4]. Na mensagem de associação os nodos 3C se identificam de maneira diferenciada.

Neste trabalho, o tempo 3C é destinado a nodos com maiores requisitos de confiabilidade na troca de mensagens para atender as demandas do ambiente industrial que é tipicamente ruidoso, permitindo a possibilidade de retransmissão das mensagens, através do uso de *slots* extras. Mediante isto analisam-se 3 técnicas para utilizar este período de tempo: `BlockACK`, `mestre-escravo` e `TDMA redundante`.

Na proposta `BlockACK` utiliza-se o período 3C para implementar uma variação da técnica TDMA com segunda chance e com mensagem de confirmação única. Na Fig. 3 é apresentado o esquema de transmissão de mensagens e o uso do tempo 3C. Cada nodo possui um *slot* exclusivo, previamente reservado pelo coordenador. O `BlockACK` é uma mensagem enviada pelo coordenador aos nodos, que contém como dados 1 bit para cada nodo. Sendo este bit igual a zero (NACK) significa que o coordenador não recebeu, ou recebeu com erros, a mensagem do respectivo nodo, caso contrário significa que a mensagem foi perfeitamente recebida. A segunda chance será utilizada para reenvio de mensagens dos nodos que receberam um NACK. Cada nodo, com a recepção do `BlockACK` e base-

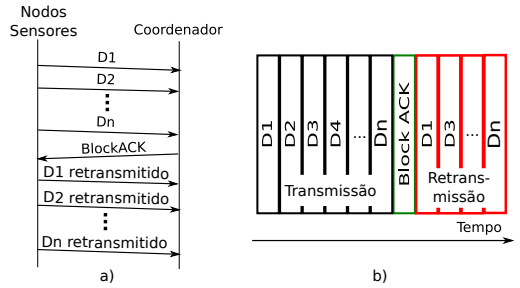


Fig. 3. Técnica `BlockACK`

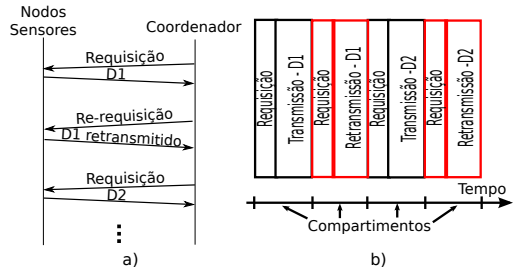


Fig. 4. Mestre/Escravo.

ado em sua posição no ciclo, saberá qual é o *slot* onde deverá retransmitir. No pior caso, onde o coordenador não recebeu nenhuma mensagem, o período de `Segunda Chance` é igual ao primeiro período TDMA.

Na proposta `mestre-escravo`, Fig. 4, utiliza-se o período 3C para implementar a técnica onde o coordenador faz requisições explícitas de dados aos nodos por meio do seu endereço (*polling*). Na sequência o nodo envia uma mensagem contendo seus dados. Caso o coordenador não receba a mensagem, devido sua mensagem não ter chegado ao nodo ou pela falta de resposta deste, o coordenador pode requisitar a retransmissão imediata da mesma. Cabe destacar que esta abordagem pode ser interessante para determinadas aplicações industriais, como por exemplo NCS (*Networked Control System*).

Na abordagem `TDMA Redundante`, Fig. 5, o período 3C é dividido em dois conjuntos TDMA, onde cada nodo tem seu próprio compartimento, multiplicado por dois. No primeiro conjunto TDMA o nodo envia a mensagem e no segundo reenvia. Esta é uma abordagem de fácil implementação e que exige pouco controle em sua execução.

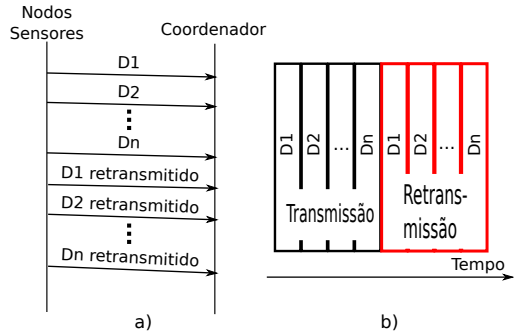
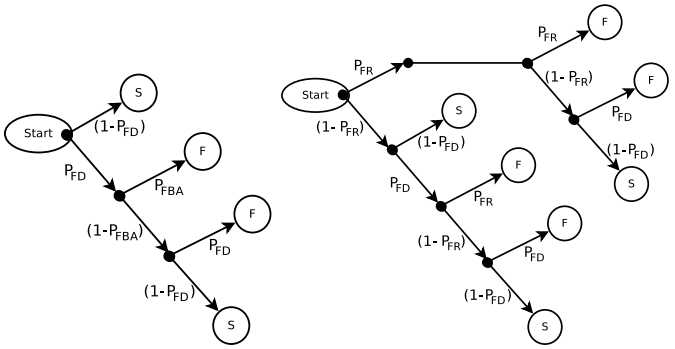


Fig. 5. TDMA Redundante.



(a) `BlockACK` (b) `Mestre/Escravo`

Fig. 6. Árvore de probabilidades.

Como referência nos comparativos utiliza-se os *slots* do GTS que, uma vez alocados, comportam-se exatamente como a técnica TDMA.

V. Comparativo entre as técnicas

Objetivando comparar as técnicas propostas para uso do período 3C com a utilização tradicional do GTS, faz-se uma análise de probabilidades perante erros na transmissão dos pacotes (PER – *Packet Error Rate*). Para impor um PER realista, adotou-se o modelo de Gilbert-Elliot apresentado em [12], que demonstrou proporcionar uma aproximação razoável para o problema do desvanecimento em ambientes industriais [13]. Este modelo utiliza uma cadeia de Markov com dois estados: `Good` e `Bad`, com *sojourn time* de T_G e T_B, respectivamente. Cada estado está associado a uma taxa de erro de bit constante (BER), e_G em *Good*, e_B em *Bad*, sendo $e_G \ll e_B$. Em cada estado é assumido que os erros ocorrem independentemente do outro estado. Por simplicidade, alguns estudos consideram $e_G = 0$ (0%) e $e_B = 1$ (100%), como por exemplo [14]. Em nossa análise, tomamos uma abordagem semelhante à [15] onde os *sojourn times* nos dois estados são exponencialmente distribuídos e varia-se T_G e T_B para obtenção de diferentes valores de PER. Simplificações são efetuadas (que não comprometem a análise) onde presume-se que um *slot* possui o tempo exato para conter uma única mensagem (dentro de um *slot* não é possível a retransmissão de mensagens) e todas mensagens tem igual tamanho.

Na Fig. 6(a) observa-se o diagrama de árvore de probabilidades da técnica `BlockACK`. Este diagrama mostra as probabilidades cumulativas, seja para falha ou sucesso, na sequência de troca de mensagens. Pode ser observado que em todos os caminhos existe uma probabilidade relativa que pode levar ao sucesso ou fracasso no envio de mensagens. Considerando que P_{FD} é a **p**robabilidade de **f**alha na transmissão de **d**ados, P_{FBA} é a **p**robabilidade de **f**alha no **B**lock**A**CK, Ⓢ é o sucesso e Ⓕ é a falha, com a análise da árvore de falhas é possível a obtenção da equação da **p**robabilidade geral de **f**alhas:

$$P_F = P_{FD} \cdot P_{FBA} + (1 - P_{FBA}) \cdot P_{FD}^2 \qquad (3)$$

Na Fig. 6(b) observa-se o diagrama de árvore de probabilidades para a técnica `Mestre/Escravo`. Considerando

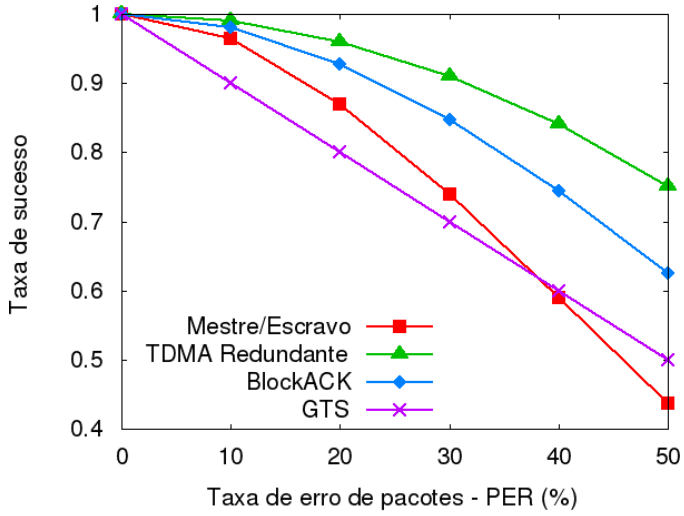


Fig. 7. Comparativo da taxa de sucesso entre as diversas técnicas.

que P_{FD} é a **p**robabilidade de **f**alha em **d**ados, P_{FR} é a **p**robabilidade de **f**alha na **r**equisição, Ⓢ é o sucesso e o Ⓕ é a falha, com uma análise da árvore de falhas pode-se obter a expressão da **p**robabilidade geral de **f**alhas:

$$P_F = P_{FR} \cdot [P_{FR} + (1 - P_{FR}) \cdot P_{FD}] + \\ +(1 - P_{FR}) \cdot P_{FD} \cdot [P_{FR} + (1 - P_{FR}) \cdot P_{FD}] \quad (4)$$

Já para a técnica `TDMA Redundante` a **p**robabilidade de **f**alha é obtida diretamente pela análise de probabilidades:

$$P_F = P_{FD}^2 \quad (5)$$

Finalmente, para o TDMA:

$$P_F = P_{FD} \quad (6)$$

Considerando-se as equações 3, 4, 5 e 6 e considerando-se todas as probabilidades intermediárias iguais ao PER corrente, pode-se efetuar o cálculo da taxa de sucesso na transmissão de mensagens em cada uma das técnicas para cada valor da PER, Fig. 7. Observando-se esta figura, pode-se verificar que a técnica com melhor desempenho é a `TDMA Redundante`. Isto deve-se ao fato de a mesma não utilizar mensagens de controle (mensagens do coordenador aos nodos) o que torna os eventos independentes. O fenômeno da dependência entre mensagens fica evidente com análise da curva da técnica `Mestre/Escravo`, nesta técnica o crescimento das perdas é praticamente exponencial com o crescimento da PER, já que para cada dado há a necessidade de troca de duas mensagens que podem ser perdidas: requisição e resposta. Neste caso, a partir dos 40% de perdas esta técnica tem um comportamento pior do que o GTS, mesmo com a possibilidade de retransmissão de mensagens. Na literatura alguns trabalhos, como por exemplo [10], consideram nula a probabilidade de perdas de mensagens curtas do tipo ACK (em nosso caso a requisição do coordenador), sob esta hipótese nossa abordagem *Mestre/Escravo* apresentaria e mesma curva da técnica *TDMA Redundante*. Estes resultados foram comprovados experimentalmente em [16].

VI. Conclusões

Neste trabalho foi apresentado um mecanismo para expandir as classes de uso do IEEE 802.15.4 em ambientes industriais, possibilitando a criação de uma nova classe de dispositivos que apresentem requisitos mais restritivos na confiabilidade de transmissão de mensagens.

Para comprovar o efetivo uso deste período extra, foram analisadas três técnicas tradicionais de retransmissão de mensagens, comparando-as com a utilização dos *slots* GTS previsto na norma. Foi mostrado que a taxa de sucesso das mesmas apresentam um melhor desempenho sob meio ruidoso na comparação com o GTS.

Referências

[1] D. U.S., "Industrial wireless technology for the 21st century," tech. rep., U.S. Department of Energy Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, San Francisco, California, 2002.

[2] L. Krishnamurthy, R. Adler, P. Buonadonna, and J, "Design and deployment of industrial sensor networks: experiences from a semiconductor plant and the north sea," *In Sensys'05: Proceedings of the 3rd international*, pp. 64–75, 2005.

[3] ISA, "ISA100.11a, Release 1 - An Update on the First Wireless Standard Emerging from the Industry for the Industry," *ISA*, 2007.

[4] I. LAN/MAN, "IEEE Standard for Information technology-Telecommunications and information exchange between systems-Local and metropolitan area networks-Specific requirementsâPart 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate WPANs," Tech. Rep. September, IEEE Computer Society, New York, 2006.

[5] T. Semprebom, C. Montez, R. Moraes, and F. Vasques, "Dynamic GTS Scheduling of Periodic Skippable Slots in IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks," *8th FET*, pp. 110–117, 2009.

[6] ZVEI, "Coexistence of Wireless Systems in Automation Technology. Explanations on reliable parallel operation of wireless radio solutions," tech. rep., ZVEI - German Electrical and Electronic Manufacturersâ Association, 2009.

[7] Y. Chen, J. Zhang, and I. Marsic, "Link-layer-and-above diversity in multihop wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, pp. 118–124, Feb. 2009.

[8] J. H. Park, S. Lee, and K. C. Lee, "Performance Evaluation of Time-Triggered IEEE 802.15.4 for Wireless Industrial Network," *ICCAS-SICE*, pp. 2187 – 2191, 2009.

[9] M. Jonsson and K. Kunert, "Towards Reliable Wireless Industrial Communication With Real-Time Guarantees," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 4, pp. 429–442, 2009.

[10] K. Kunert, E. Uhlemann, and M. Jonsson, "Predictable real-time communications with improved reliability for IEEE 802.15. 4 based industrial networks," in *Proc. 8th EEE International Workshop on Factory Communication Systems (WFCS 2010)*, (Nancy), pp. 13–22, IEEE, 2010.

[11] C. L. Liu and J. W. Layland, "Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment," *Journal of the ACM (JACM)*, vol. 20, no. 1, pp. 46–61, 1973.

[12] J. Ebert and A. Willig, "A Gilbert-Elliot bit error model and the efficient use in packet level simulation," *TKN Tech Rep TKN99002*, p. 31, 1999.

[13] A. Willig, "Antenna redundancy for increasing transmission reliability in wireless industrial LANs," *Emerging Technologies and Factory Automation, 2003. Proceedings. ETFA '03. IEEE Conference*, vol. 1, pp. 7–14, 2003.

[14] G. Anastasi, M. Conti, and M. Di Francesco, "A Comprehensive Analysis of the MAC Unreliability Problem in IEEE 802.15. 4 Wireless Sensor Networks," *Industrial Informatics, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 99, pp. 1–1, 2011.

[15] M. Nobre, I. Silva, L. Guedes, and P. Portugal, "Towards a WirelesHART module for the Ns-3 Simulator," in *Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), 2010 IEEE Conference on*, pp. 1–4, IEEE, 2010.

[16] O. T. Valle, A. V. Milack, C. Montez, P. Portugal, and F. Vasques, "Experimental Evaluation of Multiple Retransmission Schemes in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," *WFCS 2012*, 2012.