

REDES DE SENSORES SEM FIO INDUSTRIAIS: PADROES, DESAFIOS E REQUISITOS

José Carlos Silva¹

Universidade Federal de Sergipe¹

85

Abstract. *Industrial wireless sensor networks are generally used to monitor equipment and machines, seeking to optimize production processes by collecting information about the operation of these equipment. The deployment of a wireless sensor network in industrial environments has advantages compared to wired networks, such as flexibility in installing and updating the network topology and reducing implementation costs. This article aims to present the main patterns and challenges in current industrial wireless sensor networks and their applications.*

Keywords— Industrial, Sensor, Networks, Patterns

Resumo. As redes de sensores sem fio industriais geralmente são utilizadas para realizar o monitoramento de equipamentos e máquinas, buscando otimizar os processos de produção, através da coleta de informações sobre o funcionamento destes equipamentos. A implantação de uma rede de sensores sem fio em ambientes industriais apresenta vantagens em comparação com as redes cabeadas, como por exemplo, flexibilidade na instalação e atualização da topologia da rede e redução de custos de implementação. Este artigo tem como objetivo apresentar os principais padrões e desafios em redes de sensores sem fio industriais atuais e suas aplicações.

Palavras – chaves: Industrial, Sensores, Redes, Padrões

1. INTRODUÇÃO

A conveniência e a capacidade de conectar dispositivos sem o uso de fios levam a uma crescente aceitação da tecnologia de transmissão sem fio pelas indústrias de bens de consumo [Willig et al. 2005]. Desta forma, destacam-se as redes de sensores sem fio.

Uma rede de sensor sem fio pode ser caracterizada pela utilização de uma certa quantidade de nós sensores capazes de se comunicar em variados ambientes para as mais diversas aplicações. Na indústria, por exemplo, existe uma grande diversidade de setores onde as redes de sensores sem fio podem ser implementadas: química, petroquímica, petróleo e gás, usinas nucleares, automação e controle da manufatura [reza Akhondi et al. 2010]. A utilização dessas redes permite eliminar a necessidade da presença humana em vários locais, incluindo áreas perigosas e de difícil acesso. Na implementação de sistemas de monitoramento e controle em ambientes industriais, as redes de sensores sem fio, em comparação com as redes de sensores cabeadas existentes, têm inúmeras vantagens [Gungor and Hancke 2009]: flexibilidade na instalação e atualização da topologia da rede, redução na implementação e custos de manutenção. Porém, apesar das vantagens, é preciso lidar com questões específicas relacionadas aos ambientes industriais, como, por exemplo, atenuação, ruídos, interferências e propagação multi-caminhos.

A atenuação pode ser causada devido à presença de estruturas metálicas e obstruções [Tang et al. 2007].

O ruído é um sinal aleatório e de origem térmica ou simplesmente sinais acoplados ao circuito e podem ser classificados como: ruído térmico, induzido, linha cruzada e de impulso [Forouzan 2007].

A interferência pode ser causada por inúmeras fontes, como, por exemplo, sistemas de comunicação sem fio e vários dispositivos operando na mesma faixa de frequência [Willig 2008].

Na propagação multi-caminho, o sinal alcança o receptor através de múltiplas re- flexões em estruturas metálicas, paredes de concreto, pisos e outros obstáculos do ambiente [Petersen et al. 2007]. Além dessas possibilidades mencionadas, outro fator que pode degradar o desempenho e prejudicar a

qualidade das comunicações sem fio é a existência de transmissões simultâneas em enlaces na própria rede de sensores sem fio [Soua and Minet 2015].

Em alguns sistemas, por exemplo, sistemas de monitoramento e controle industrial, usualmente requerem alta confiabilidade para monitorar parâmetros críticos (vibração, pressão), mas o meio de comunicação não é confiável devido às questões mencionadas anteriormente. Adicionalmente, além dos fatores mencionados, alterações na topologia do ambiente, como, por exemplo, a movimentação de uma grande estrutura metálica, podem provocar mudanças nas características dos canais (diferença no valor médio da potência recebida) ao longo do tempo, mesmo que o transmissor e o receptor estejam no mesmo local [Aakvaag et al. 2005].

Uma maneira de lidar com questões relacionadas à comunicação sem fio, no tocante à qualidade dos canais no ambiente industrial, é o desenvolvimento de protocolos que utilizam múltiplos canais. A utilização de protocolos multicanais permite alcançar uma melhor utilização das frequências, aumentando a capacidade da rede por meio da transmissão simultânea usando várias frequências diferentes, e minimizar interferências [Incel 2011]. O objetivo do nosso trabalho é descrever o padrão WirelessHART [Song et al. 2008] e o padrão ISA 100.11a [Standard 2009] que utilizam os mecanismos mencionados acima.

Desta forma, a caracterização de ambientes industriais, verificando-se as fontes de interferência e as características de propagação, é um passo importante para o desenvolvimento de novas aplicações e protocolos que fazem uso de redes sem fio [Ferrer Coll 2012].

2. Requisitos e Aplicações das Redes de Sensores sem Fio Industriais

Nos últimos anos, as redes sem fio ganharam uma importância significativa no contexto de sistemas de comunicação industrial, onde sua implantação está trazendo vários benefícios perceptíveis, por exemplo, a substituição de cabos para a conexão de dispositivos que não podem ser alcançados por sistemas tradicionais com fio [Zurawski 2014]. Além disso, o processo de instalação dos cabos e sensores possui geralmente um custo maior do que o custo dos próprios

sensores [Lu and Gungor 2009]; adicionalmente, apresenta pouca flexibilidade, o que dificulta o processo de instalação e manutenção da rede. Diferentemente das redes de sensores industriais cabeadas, as redes de sensores sem fio industriais necessitam satisfazer alguns requisitos específicos no domínio industrial, dentre eles estão [Ovsthus et al. 2014]:

- **Tamanho dos sensores e custo:** dispositivos compactos e de baixo custo são importantes para realizar implantações em grande escala;
- **Interoperabilidade:** redes de sensores sem fio industriais devem ser capazes de interagir com as redes de sensores cabeadas e redes de sensores sem fio já existentes no ambiente industrial;
- **Consumo de energia:** sensores devem economizar a energia de suas baterias para prolongar sua vida útil;
- **Autoconfiguração e auto-organização:** redes de sensores devem ter a capacidade de operar independentemente da intervenção humana por longos períodos de tempo;
- **Tolerância a falhas:** a rede de sensores necessita ser construída de tal forma que a falha de um ou de alguns nós sensores não resulte em falha de toda a rede;
- **Enlace confiável:** devido à baixa potência dos nós sensores, os enlaces em ambientes industriais podem degradar e levar à perda de pacotes e atrasos;
- **Garantias de tempo real:** alguns sistemas, como sistemas de controle, necessitam de comunicação com atrasos previsíveis;
- **Escalabilidade:** redes de sensores sem fio industriais devem ser escaláveis para suportar mudanças na topologia da rede, permitindo a inclusão ou remoção de vários nós na rede; e
- **Qualidade de serviço:** existe uma grande variedade de aplicações, onde cada uma necessita de requisitos diferenciados, como, por exemplo,

confiabilidade, latência e disponibilidade. Como exemplo de QoS, podemos mencionar o tempo de entrega das informações entre o sensor e o sink.

Em uma rede de sensores sem fio industrial, os nós sensores podem ser instalados em equipamentos industriais para monitorar alguns parâmetros críticos, como, por exemplo, temperatura, vibração, e verificar sua eficiência com base em uma combinação de medições. Após coletados, os dados monitorados são transmitidos através de um canal sem fio para uma central de monitoramento, que analisa os dados a partir de cada sensor, conforme ilustra a figura 1.

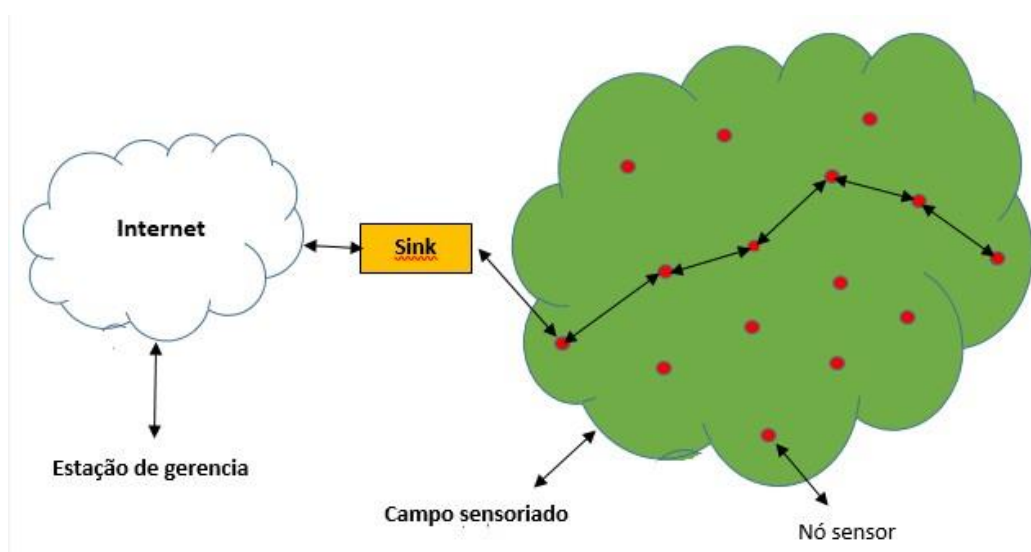


Figura 1. Rede de Sensores sem Fio - Fonte Adaptado de [Akyildiz et al. 2002]

A seguir destacam-se algumas aplicações das redes de sensores sem fio industriais.

Em [Zhao et al. 2011], uma rede de sensores sem fio é utilizada para medir a pressão anular da cabeça de um poço em uma plataforma de petróleo no oceano. Em outra aplicação, a temperatura de um secador rotativo industrial é controlada para garantir o processo de secagem.

Em [Rashvand and Calero 2012], o autor relata a utilização de uma rede de sensores pela General Motors, cujo objetivo é monitorar um equipamento responsável pela fabricação de correias e outras máquinas.

Conforme [Aakvaag et al. 2005], os autores relatam a instalação de uma rede de sensores sem fio em 200 bombas utilizadas no processamento de minério. Os sensores são instalados internamente nas bombas para coletar dados referentes ao desgaste de componentes internos. O objetivo é realizar a manutenção preventiva das bombas substituindo os componentes desgastados.

De acordo com [Lu and Gungor 2009], redes de sensores são utilizadas para monitorar possíveis falhas em motores elétricos. Já em [Tan et al. 2009], os autores as utilizam para monitorar o processo de usinagem em uma máquina com controle numérico computadorizado (CNC).

Como pode ser observado, existe uma grande diversidade de aplicações e domínios em que as redes de sensores sem fio podem ser utilizadas. Dessa forma, os requisitos necessários para aplicações de tais redes em ambientes industriais podem variar significativamente. Diante disso, o conhecimento da arquitetura e padrão a ser implementado é de extrema importância.

3. PADROES PARA REDES DE SENSORES SEM FIO INDUSTRIAS

3.1. WirelessHART

O WirelessHART (Wireless Highway Addressable Remote Transducer) é considerado o primeiro padrão aberto voltado para aplicações de monitoramento e controle para redes sem fio em ambientes industriais [Song et al. 2008], tendo sido lançado em 2007.

O padrão é representado através de uma versão simplificada do modelo de referência de interconexão de sistemas abertos (OSI, do inglês Open Systems Interconnection Reference Model) com apenas 5 camadas: física, enlace, rede, transporte e aplicação [Chen et al. 2010]. Cabe ressaltar que o modelo OSI possui sete camadas e seu objetivo era padronizar as regras para comunicação entre sistemas abertos independentemente do fabricante do hardware ou software [Zimmermann 1980].

A camada física do padrão WirelessHART implementa a camada física da especificação IEEE 802.15.4. Nessa camada, são definidos 16 canais (11-26). Dentre esses canais, apenas 15 canais (11-25) são utilizados. O canal 26 é

permitido apenas em alguns países [pet a]. O padrão opera apenas na frequência de 2,4 GHz. Além disso, na sua camada física o padrão implementa as técnicas de modulação espalhamento espectral de sequência direta e espalhamento espectral por salto de frequência [pet b]. Essas técnicas tornam as transmissões no WirelessHART menos susceptíveis a interferência em ambientes industriais.

Na camada de enlace, a comunicação no padrão WirelessHART é estruturada a partir de um superquadro (superframe). Um superquadro é uma coleção de intervalos de tempo (timeslots) que se repete periodicamente. A quantidade de intervalos (slots) existentes indica a periodicidade do superquadro. Adicionalmente, o controle de acesso ao meio é realizado pelo protocolo de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA, do inglês Time Division Multiple Access).

No TDMA, o tempo é dividido em intervalos de 10ms. Cada intervalo de tempo pode suportar até 15 canais, assim, teoricamente, 15 dispositivos podem simultaneamente transmitir em um mesmo intervalo de tempo [Silva et al. 2012]. A partir do TDMA o padrão proporciona um controle de acesso determinista e livre de colisões. Para isso, cada intervalo de tempo é dedicado à comunicação entre dois dispositivos (emissor e receptor). Opcionalmente, intervalos de tempo compartilhados podem ser utilizados.

O padrão define a utilização de um mecanismo de salto de canais (slotted hopping), para mitigar os efeitos de interferência. Dessa forma, cada transmissão na rede utiliza uma frequência diferente (canal). Essa sequência de salto de frequência é controlada pelo gerente da rede (Network Manager). Para evitar a utilização de canais de baixa qualidade, é definido um mecanismo denominado lista negra (blacklisting). Nesse mecanismo, os canais que apresentarem baixo nível de qualidade não são utilizados na sequência gerada pelo mecanismo de salto em frequência.

A camada de rede é responsável pelo roteamento dos pacotes da origem até o destino. Essa camada suporta dois tipos de roteamento: roteamento por grafo (Graph Routing) e roteamento na fonte (Source Routing).

O roteamento por grafos apresenta um conjunto de enlaces a dispositivos que podem fornecer rotas de comunicação redundantes entre a origem e o dispositivo final. Os caminhos em cada grafo são criados pelo gerente da rede e transferidos

para cada dispositivo individualmente.. O roteamento na origem inclui no próprio pacote a ser transmitido as informações necessárias para o encaminhamento. Quando um dispositivo ao longo do caminho recebe o pacote, é necessário apenas consultar o próximo destino informado no próprio pacote.

A camada de transporte é responsável pela comunicação entre a origem e o destino. Adicionalmente, essa camada suporta serviço com reconhecimento e sem reconhecimento. O serviço com reconhecimento é oferecido pelo protocolo de controle de transmissão (TCP, do inglês Transmission Control Protocol). Já o serviço sem reconhecimento é suportado pelo protocolo de data-grama do usuário (UDP, do inglês User Datagram Protocol) [Kim et al. 2008].

A camada de aplicação fornece uma interface para o usuário acessar informações sobre a rede. Adicionalmente, a camada de aplicação possibilita a comunicação entre dispositivos WirelessHART com dispositivos legados (HART), ou seja, dispositivos cabeados, como, por exemplo, sensores e atuadores.

O padrão WirelessHART define os seguintes dispositivos: gerente da rede, gerente de segurança, gateway, ponto de acesso, dispositivo de campo, adaptador, roteador e dispositivo portátil, conforme ilustra a figura 2.

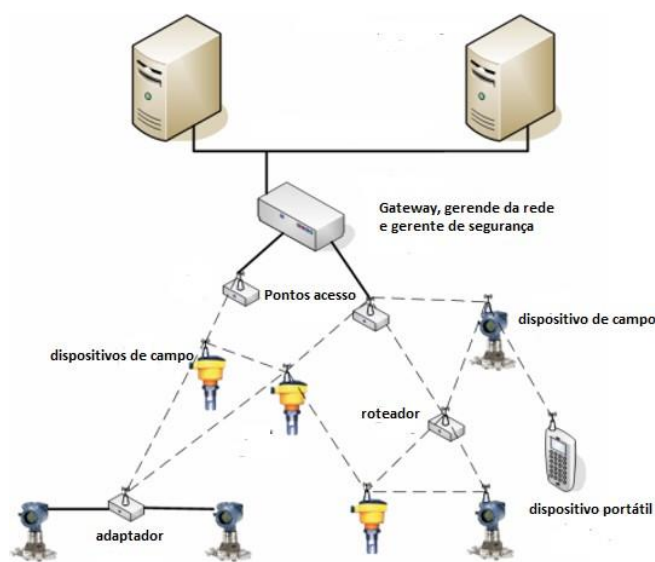


Figura 2. Rede WirelessHART e seus dispositivos - Fonte Adaptado de[Chen et al. 2010]

Os dispositivos básicos da rede são denominados dispositivos de campo. Esses dispositivos estão conectados diretamente aos processos que se deseja

monitorar, conforme ilustra a fig 3.

Os adaptadores são dispositivos cuja função é garantir a interoperabilidade entre os dispositivos WirelessHART com dispositivos legados HART.

Já os dispositivos portáteis são utilizados para configuração e calibração dos dispositivos de campo.

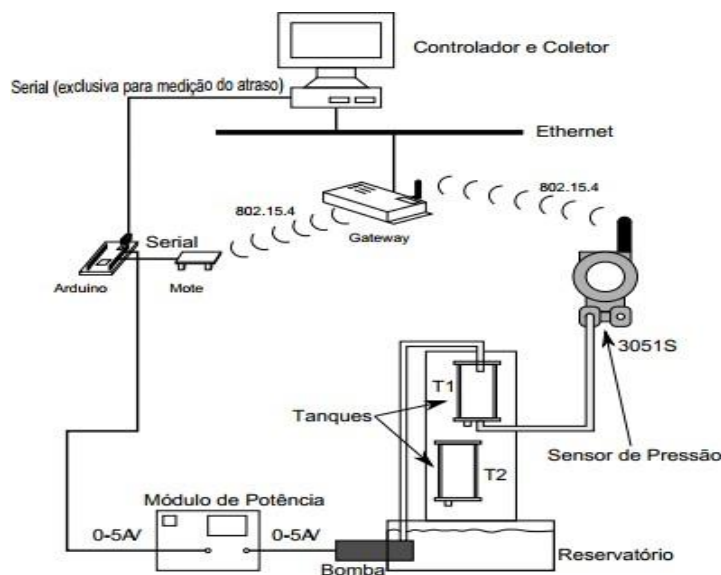


Figura 3. Rede WirelessHART e seus dispositivos - Fonte Adaptado de[Santos et al. 2014]

Os roteadores são utilizados para o encaminhamento de mensagens até o gateway.

O gerenciamento da rede é realizado de maneira centralizada através dos seguintes dispositivos: gateway, gerente de segurança e o gerente da rede.

O gateway realiza a conexão entre os dispositivos WirelessHART e uma rede de automação de fábrica. A comunicação entre o gateway e os dispositivos da rede é realizada através dos pontos de acesso.

O gerente de segurança é responsável por assegurar a segurança na rede, através da geração, do armazenamento, da distribuição e gerenciamento das chaves de sessão utilizadas para autenticar os dispositivos.

Semelhante ao gerente de segurança, o gerente da rede gerencia a rede

WirelessHART e os seus dispositivos. Entre as funções do gerente da rede, destacam-se, por exemplo: escalonamento das transmissões, detecção de falhas, coleta de informações sobre o desempenho da rede, roteamento e etc.

3.2. ISA 100.11a

Em setembro de 2009, a Sociedade de Automação, Sistemas e Instrumentação (ISA, do inglês Instrumentation, Systems, and Automation Society) iniciou o desenvolvimento do seu padrão para redes de sensores sem fio para automação industrial, denominado ISA 100.11a [ans].

Um dos objetivos do padrão é fornecer comunicação sem fio confiável e segura para aplicações com latência de 100ms [Ikram and Thornhill 2010]. Esse tempo de latência é típico de aplicações de monitoramento e controle industrial.

O padrão ISA 100.11a é representado através de uma versão simplificada do modelo de referência para interconexão de sistemas abertos onde estão presentes apenas 5 camadas: física, enlace, rede, transporte e aplicação.

A camada física suporta 16 canais (11-26), sendo o canal 26 opcional, ou seja, utiliza 15 canais, transmitindo apenas na frequência de 2,4 GHz.

Semelhante ao padrão WirelessHART, a camada física utiliza as técnicas de modulação espalhamento de espectro de sequência direta e espalhamento de espectro por salto de frequência [Granjal et al. 2015].

O padrão também oferece suporte ao mecanismo de lista negra de canais (blacklisting), o qual permite eliminar bandas de frequência que apresentem ruídos, com objetivo de melhorar a robustez contra interferências.

O padrão ISA.100.11a define os seguintes dispositivos: gerente do sistema, gerente de segurança, gateway, dispositivo portátil, roteador, dispositivos de entrada e saída e roteador de backbone, conforme ilustra figura 4.

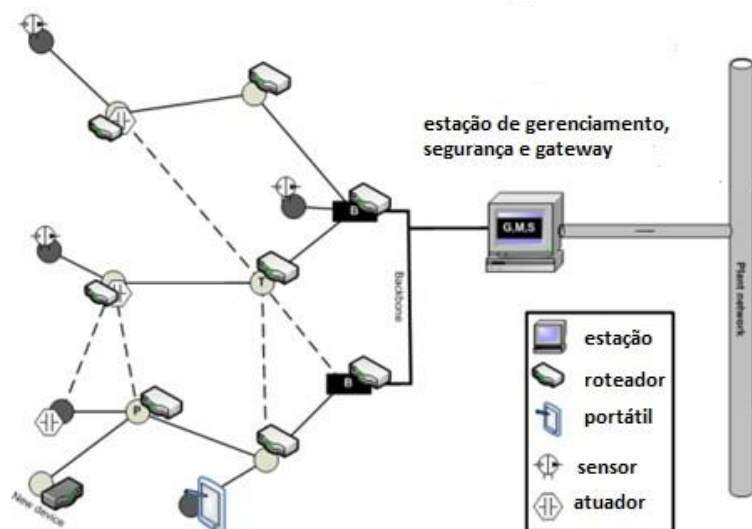


Figura 4. Rede ISA 100.11a e seus dispositivos - Fonte Adaptado de[Standard 2009]

Os dispositivos de entrada e saída, como, por exemplo, válvulas e sensores, são os responsáveis pelo monitoramento das variáveis do processo industrial.

O roteador e roteador de backbone são os responsáveis pelo roteamento na rede. O roteador suporta algumas funções, por exemplo, encaminhamento dos dados em direção ao gateway. Dentre as funções desempenhadas pelo roteador de backbone, podemos destacar o encaminhamento das informações coletadas pelos dispositivos de campo para a rede de automação da fábrica.

Os dispositivos que suportam a função de provisionamento podem inserir configurações necessárias para que outro dispositivo possa se juntar à rede. Já os dispositivos que suportam função temporal fornecem uma fonte de tempo única para todo o sistema.

De maneira semelhante à especificação WirelessHART, o gerenciamento do padrão ISA é centralizado em três dispositivos: gateway, gerente do sistema e gerente de segurança.

O gateway é o responsável pela interligação da rede de automação da fábrica aos dispositivos de entrada e saída da rede sem fio. O gerente de segurança é responsável pela garantia da troca de informações de maneira segura na rede.

Finalizando, o gerente da rede é responsável, dentre outras funções, pelo

escalonamento das transmissões.

Os dispositivos da rede podem formar as seguintes topologias: estrela, hub-and-spoke, malha e malha-estrela. Além dessas topologias, a especificação permite uma combinação entre as topologias citadas, para que seja possível melhor atender as necessidades da aplicação. A figura 5 ilustra uma topologia hub-and-spoke.

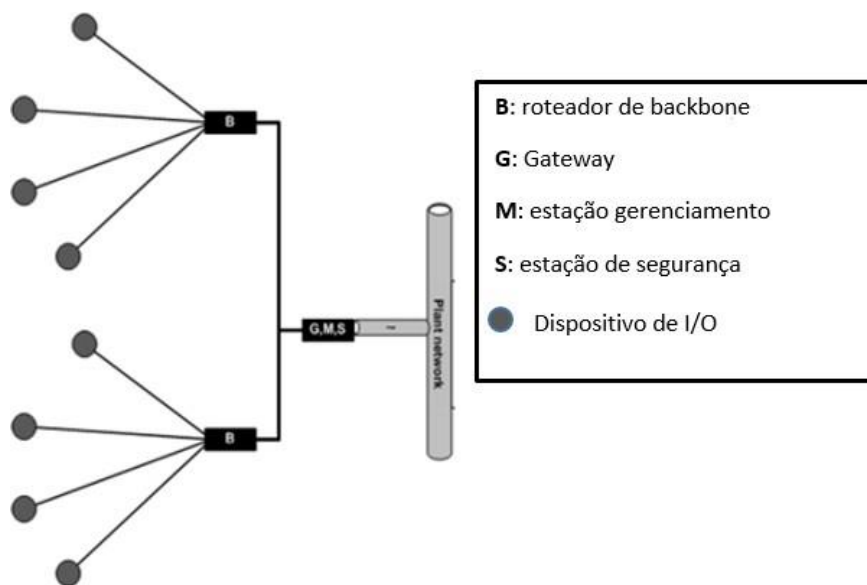


Figura 5. Topologia hub-and spoke - Fonte Adaptado de[Standard 2009]

A camada de enlace é dividida em três subcamadas: subcamada de controle de acesso ao meio (MAC, do inglês Media Access Control), extensão da subcamada MAC e uma subcamada de alto nível.

A subcamada MAC é um subconjunto da camada MAC da especificação IEEE 802.15.4.

Sua principal função é enviar e receber quadros. A extensão da subcamada MAC inclui modificações no protocolo de acesso múltiplo sensível à portadora com previsão de colisão, como, por exemplo, a introdução de mecanismos que suportem diversidade de frequência (saltos de frequência) e diversidade de tempo (TDMA). Finalizando, a subcamada de alto nível lida com questões referentes ao roteamento no nível de camada de enlace.

A comunicação no padrão ISA 100.11a é estruturada a partir de superquadros

(superframes), intervalos de tempo (timeslots), enlaces (links) e grafos.

Um superquadro é uma coleção de intervalos de tempo (timeslots) que se repetem ao longo do tempo de funcionamento da rede. Os intervalos de tempo são posicionados de maneira sequencial e do mesmo tamanho para formar a estrutura do superquadro. Cada intervalo tem duração entre 10ms e 12ms (configurável).

Os enlaces representam conexões entre dispositivos. Cada enlace refere-se a um intervalo em um superquadro. A atribuição de enlaces é de responsabilidade do gerente da rede.

Semelhante ao padrão WirelessHART, o padrão ISA 100.11a suporta roteamento em grafo e roteamento na origem. No padrão ISA 100.11a são definidos três esquemas de salto de canais: salto com intervalos (slotted hopping), salto lento (slow hopping) e salto híbrido (hybrid hopping).

A camada de rede tem como objetivo principal oferecer o encaminhamento de mensagens nos backbones. Para realizar essa tarefa, a camada de rede deve prover mecanismos para traduzir endereços de 16 bits utilizados pela camada de enlace para endereços de 128 bits usados na camada de rede.

A camada de transporte se preocupa basicamente com a comunicação fim a fim baseada em serviços sem conexão. Esses serviços são uma extensão do protocolo de datagrama do usuário (UDP, do inglês User Datagram Protocol) sobre o 6LoWPAN. Adicionalmente, essa camada suporta serviços de criptografia baseados no padrão de criptografia avançada de 128 bits (AES-128, do inglês Advanced Encryption Standard -128).

A camada de aplicação do padrão ISA 100.11a, através de um mecanismo denominado tunelamento, permite a interoperabilidade entre os seus dispositivos com dispositivos de tecnologias legadas, como, por exemplo, redes industriais HART, Foundation Fieldbus, Profibus e etc [Hasegawa et al. 2011]

3. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou os desafios para a implantação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais. As redes de sensores sem fio industriais podem ser empregadas em diversas aplicações de monitoramento e controle na indústria,

oferecendo uma solução de baixo custo e flexível com paradas com as redes cabeadas. Devido às características dos ambientes industriais, que apresentam muitos equipamentos, estruturas e objetos metálicos, problemas de interferência e atenuação podem surgir. Para minimizar a falta de confiabilidade do canal sem fio devido a questões relacionadas ao ambiente industrial, mecanismos e protocolos multicanais devem ser desenvolvidos para mitigar os problemas existentes nesses ambientes. Nesse artigo citamos os protocolos WirelessHART e ISA 100.11a como tecnologias com tais requisitos.

4. REFERENCIA

Aakvaag, N., Mathiesen, M., and Thonet, G. (2005). Timing and power issues in wireless sensor networks—an industrial test case. In *2005 International Conference on Parallel Processing Workshops (ICPPW'05)*, pages 419–426. IEEE.

Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y., and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer networks*, 38(4):393–422.

Chen, D., Nixon, M., and Mok, A. W. (2010). Real-time mesh network for industrial automation.

Ferrer Coll, J. (2012). *RF Channel Characterization in Industrial, Hospital and Home Environments*. PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology.

Forouzan, A. B. (2007). *Data communications & networking (sie)*. Tata McGraw-Hill Education.

Granjal, J., Monteiro, E., and Silva, J. S. (2015). Security for the internet of things: a survey of existing protocols and open research issues. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(3):1294–1312.

Gungor, V. C. and Hancke, G. P. (2009). Industrial wireless sensor networks: Challenges, design principles, and technical approaches. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 56(10):4258–4265.

Hasegawa, T., Hayashi, H., Kitai, T., and Sasajima, H. (2011). Industrial wireless standardization—scope and implementation of isa sp100 standard. In *SICE Annual Conference 2011*, pages 2059–2064. IEEE.

Ikram, W. and Thornhill, N. F. (2010). Wireless communication in process automation: A survey of opportunities, requirements, concerns and challenges. In *UKACC International Conference on Control, 2010*, pages 1–6. IET.

Incel, O. D. (2011). A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks. *Computer Networks*, 55(13):3081–3099.

Kim, A. N., Hekland, F., Petersen, S., and Doyle, P. (2008). When hart goes wireless: Understanding and implementing the wirelesshart standard. In *2008 IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, pages 899–907. IEEE.

Lu, B. and Gungor, V. C. (2009). Online and remote motor energy monitoring and fault diagnostics using wireless sensor networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11):4651–4659.

- Ovsthus, K., Kristensen, L. M., et al. (2014). An industrial perspective on wireless sensor networks—a survey of requirements, protocols, and challenges. *IEEE communications surveys & tutorials*, 16(3):1391–1412.
- Petersen, S., Doyle, P., Vatland, S., Aasland, C. S., Andersen, T. M., and Sjong, D. (2007). Requirements, drivers and analysis of wireless sensor network solutions for the oil & gas industry. In *2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007)*, pages 219–226. IEEE.
- Rashvand, H. F. and Calero, J. M. A. (2012). *Distributed sensor systems: practice and applications*. John Wiley & Sons.
- reza Akhondi, M., Talevski, A., Carlsen, S., and Petersen, S. (2010). Applications of wireless sensor networks in the oil, gas and resources industries. In *2010 24th IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications*, pages 941–948. IEEE.
- Santos, A., Lopes, D., Silva, I., César, J., Luciano, L., Neto, A., and Guedes, L. A. (2014). Avaliação de redes wireless em malhas de controle. In *CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA*, pages 2593–2600.
- Silva, I., Guedes, L. A., Portugal, P., and Vasques, F. (2012). Reliability and availability evaluation of wireless sensor networks for industrial applications. *Sensors*, 12(1):806–838.
- Song, J., Han, S., Mok, A., Chen, D., Lucas, M., Nixon, M., and Pratt, W. (2008). Wireless: Applying wireless technology in real-time industrial process control. In *2008 IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium*, pages 377–386. IEEE.
- Soua, R. and Minet, P. (2015). Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey. *Pervasive and Mobile Computing*, 16:2–21.
- Standard, I. (2009). Wireless systems for industrial automation: process control and related applications. *ISA-100.11 a-2009*, page 30.
- Tan, K. K., Huang, S., Zhang, Y., and Lee, T. H. (2009). Distributed fault detection in industrial system based on sensor wireless network. *Computer Standards & Interfaces*, 31(3):573–578.
- Tang, L., Wang, K.-C., Huang, Y., and Gu, F. (2007). Channel characterization and link quality assessment of IEEE 802.15.4-compliant radio for factory environments. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 3(2):99–110.
- Willig, A. (2008). Recent and emerging topics in wireless industrial communications: A selection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 4(2):102–124.
- Willig, A., Matheus, K., and Wolisz, A. (2005). Wireless technology in industrial networks. *Proceedings of the IEEE*, 93(6):1130–1151.
- Zhao, G. et al. (2011). Wireless sensor networks for industrial process monitoring and control: A survey. *Netw. Protoc. Algorithms*, 3(1):46–63.
- Zimmermann, H. (1980). OSI reference model—the ISO model of architecture for open systems interconnection. *IEEE Transactions on Communications*, 28(4):425–432.
- Zurawski, R. (2014). *Industrial communication technology handbook*. CRC Press.