

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/270137615>

Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais

Article in *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação* · July 2013

DOI: 10.12721/2237-5112.v04n01a03

CITATIONS

14

READS

2,037

4 authors, including:



Ruan Delgado Gomes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba

54 PUBLICATIONS 485 CITATIONS

SEE PROFILE



Marcelo Alencar

Institute of Advanced Studies in Communications

647 PUBLICATIONS 1,702 CITATIONS

SEE PROFILE



Iguatemi Fonseca

Universidade Federal da Paraíba

113 PUBLICATIONS 908 CITATIONS

SEE PROFILE

Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais

Ruan D. Gomes^{*†‡}, Marcelo S. Alencar^{†‡}, Iguatemi E. Fonseca^{‡§} e Abel C. Lima Filho[§]

^{*}Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Guarabira, PB, Brasil

[†]Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil

[‡]Instituto de Estudos Avançados em Comunicações, Campina Grande, Brasil

[§]Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil

E-mail: ruan.gomes@ifpb.edu.br, malencar@dee.ufcg.edu.br, iguatemi@ci.ufpb.br, abel@les.ufpb.br

Resumo—As Redes de Sensores sem Fio (RSSF) industriais usualmente são empregadas para realizar o monitoramento de equipamentos, visando otimizar o processo de produção, por meio do provimento de informações importantes sobre o funcionamento destes equipamentos. A implantação de RSSF em ambientes industriais apresenta vantagens em comparação com as redes cabeadas, como a facilidade de instalação e manutenção e o baixo custo. No entanto, é necessário lidar com problemas típicos de redes sem fio, como interferência eletromagnética causada por outras redes ou por equipamentos industriais e alto nível de atenuação de pequena e larga escala, devido à existência de muitos objetos metálicos nestes ambientes. Além disso, os nós sensores usualmente possuem restrições de consumo de energia, processamento e largura de banda disponível para comunicação. Todas essas restrições devem ser levadas em consideração no projeto de uma RSSF para operação em ambiente industrial. Este artigo tem como objetivo discutir os aspectos sobre a implantação de RSSF em ambiente industrial e os desafios que devem ser enfrentados.

Palavras-chave—Redes de Sensores sem Fio Industriais, Qualidade de Serviço em RSSF, Estimação de Qualidade de Canal.

I. INTRODUÇÃO

TRADICIONALMENTE, os sistemas de monitoramento industrial trabalham de forma *offline* ou fazem uso de redes cabeadas para transmissão das informações até uma central de monitoramento. Em sistemas de monitoramento baseados em redes cabeadas, o processo de instalação dos cabos e sensores possui usualmente um custo muito mais alto que os próprios sensores [1]. Além disso, essa abordagem apresenta pouca flexibilidade, o que dificulta o processo de instalação e manutenção da rede.

Uma alternativa para construção de sistemas de monitoramento industrial de baixo custo é a utilização de redes sem fio, que apresentam significativas vantagens, incluindo maior flexibilidade, baixo custo e facilidade de instalação e manutenção [2]. Mais especificamente, as Redes de Sensores sem Fio (RSSF) apresentam ainda outras vantagens, como a capacidade de auto-organização e processamento local, aparecendo como uma plataforma promissora para a implementação de sistemas *online* e remotos de monitoramento e controle em ambientes industriais.

As RSSF são formadas por nós equipados com sensores ou atuadores e capacidade de comunicação via radiofrequência. Os nós podem ainda possuir capacidade de processamento, o que permite a inserção de inteligência nos dispositivos, possibilitando melhorar a utilização do canal de comunicação [3]. Os nós sensores possuem restrições de recursos, apresentando baixo poder de processamento e em alguns casos restrições de consumo de energia [4].

Em uma RSSF industrial, sensores são implantados em equipamentos industriais para monitorar parâmetros críticos, como vibração, temperatura, pressão e eficiência [5]. As medidas obtidas pelos sensores são transmitidas sem fio até um nó sorvedouro, que provê as informações para análise em uma central de monitoramento. Baseado nessas informações, é possível reparar ou substituir equipamentos antes que maiores prejuízos ocorram [2].

No entanto, a utilização de RSSF para construção de sistemas de automação em ambiente industrial apresenta desafios que devem ser enfrentados. As redes sem fio utilizam um meio de comunicação inerentemente não confiável, o que pode ser agravado devido a ruídos e interferências na faixa de espectro utilizada para comunicação. A falta de confiabilidade do meio de transmissão nas redes sem fio torna difícil a definição de garantias de qualidade de serviço. Além disso, os nós sensores devem ter baixo custo, o que resulta em um conjunto de restrições, como a baixa taxa de transmissão disponível e a baixa capacidade de processamento. Por exemplo, o padrão IEEE 802.15.4 apresenta uma taxa de transferência nominal de apenas 250 *kbit/s*.

Diferentes tipos de fontes de interferência para RSSF podem ser encontrados em ambientes industriais, como equipamentos de solda, fornos microondas e outros equipamentos de comunicação sem fio, como redes locais sem fio e redes *Bluetooth*. Além disso, em ambientes industriais existem muitas máquinas e objetos metálicos. Dessa forma, observa-se um alto nível de atenuação em larga escala e em pequena escala nesses ambientes [6].

Muitos sistemas de monitoramento industrial necessitam processar sinais heterogêneos que mudam rapidamente e devem ser obtidos utilizando uma alta taxa de amostragem [5] [7]. Além disso, esses sistemas usualmente requerem alta confiabilidade. Algumas aplicações como o monitoramento de eficiência e a detecção de falhas de motores de indução se encaixam nesse tipo de aplicação [1] [3] [5] [7] [8]. Devido às limitações das RSSF, principalmente com relação

Artigo recebido em 29 de dezembro de 2013. Artigo aceito em 16 de junho de 2014.

à baixa taxa de transmissão e à falta de confiabilidade, a implementação desse tipo de sistema se torna ainda mais desafiadora.

A caracterização de ambientes industriais, verificando as fontes de interferência e as características de propagação, é um passo importante para o desenvolvimento de novas aplicações que fazem uso de redes sem fio e para o aprimoramento das atuais tecnologias [9]. Dessa forma, estudos experimentais para identificação de fontes de interferência e a análise de desempenho de rádios operando no ambiente industrial podem gerar informações valiosas para o desenvolvimento de novas técnicas e protocolos para redes de sensores sem fio industriais.

Neste artigo são discutidos alguns desafios que devem ser enfrentados para a implementação de RSSF em ambientes industriais, como problemas de coexistência em banda não licenciada e problemas de atenuação por multipercurso. Além disso, são descritos alguns padrões empregados para a construção dessas redes e quais mecanismos esses padrões definem para mitigar os problemas de confiabilidade.

II. RUÍDO E INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM RSSF

Devido ao aumento na quantidade de aplicações que utilizam tecnologias de comunicação sem fio, o espectro disponível para comunicação tende a ficar mais poluído, aumentando a interferência e reduzindo a qualidade de serviço das redes que coexistem em um mesmo ambiente.

A abordagem de alocação estática de espectro tende a não funcionar de maneira satisfatória à medida que muitos dispositivos presentes no ambiente compartilham o mesmo canal de comunicação [10]. Dessa forma, mecanismos que permitam uma utilização mais inteligente do espectro devem ser desenvolvidos para mitigar os problemas relativos à interferência de redes coexistentes.

Muitos dispositivos sem fio operam na banda *Industrial, Scientific and Medical* (ISM) de 2,4 GHz, como rádios *Bluetooth*, Wi-Fi e telefones sem fio. Além disso, outros dispositivos que não são destinados para comunicação podem causar interferência nessa faixa de frequências, como fornos microondas.

Os padrões de comunicação sem fio, como o IEEE 802.11 e o IEEE 802.15.4, definem um conjunto de canais ao longo da faixa de frequência. Como eles compartilham a mesma faixa de frequência, existe uma sobreposição entre os canais definidos por esses padrões.

A Figura 1 mostra os canais definidos pelos padrões IEEE 802.11 (Wi-Fi) e IEEE 802.15.4 na banda de 2,4 GHz. Na Figura 1, apenas três canais (1, 6 e 11) do padrão IEEE 802.11 são mostrados, mas o padrão define 14 canais (apenas 11 permitidos no Brasil) que são dispostos no espectro, de modo que existe sobreposição entre canais vizinhos.

No padrão IEEE 802.15.4 todos os canais são separados por um intervalo de 5 MHz. Entretanto, devido à modulação utilizada na camada física, uma pequena fração do sinal é espalhada para fora do intervalo de 5 MHz [11]. Dessa forma, redes IEEE 802.15.4 que estão funcionando em um mesmo ambiente e em canais adjacentes podem interferir uma na outra.

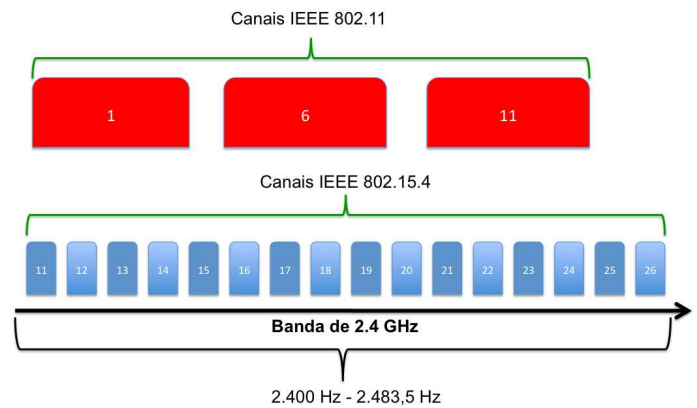


Figura 1. Canais definidos pelos padrões IEEE 802.15.4 e IEEE 802.11 na banda de 2,4 GHz.

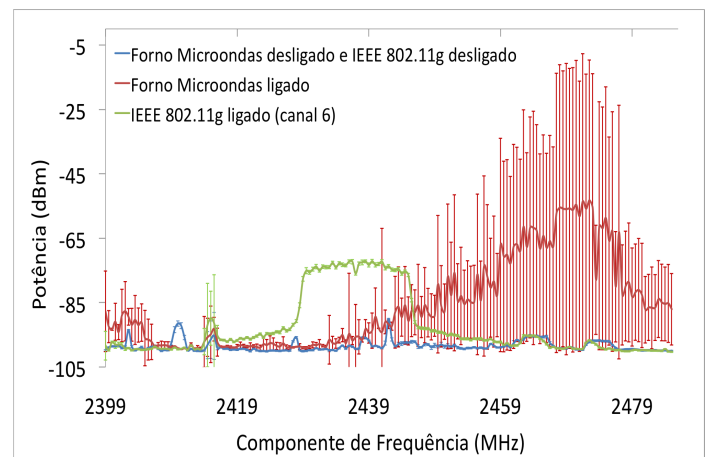


Figura 2. Potência induzida nas componentes de frequência [3].

A Figura 2 mostra a potência induzida nas componentes de frequência da banda de 2,4 GHz durante experimentos com uma rede IEEE 802.11 operando no canal 6, um forno microondas e uma rede IEEE 802.15.4 operando no canal 13 [3]. No cenário representado pela Figura 2 é possível observar que o nível de potência médio das fontes de interferência é muito alto em comparação com o nível de potência do rádio IEEE 802.15.4.

A. Estudos Experimentais para Avaliação do Ruído e Influência das Fontes de Interferência no Desempenho de RSSF

Alguns trabalhos foram realizados visando identificar possíveis fontes de interferência em diferentes ambientes [9] [12]–[15].

Chilo *et al.* [12] realizaram um estudo sobre a intensidade do campo elétrico de trabalho e a distribuição de probabilidade de amplitude (APD) do ruído em uma indústria de papel. A APD é definida como o percentual de tempo em que um sinal impulsivo excede um determinado limite. Os resultados obtidos mostraram que os equipamentos mais comuns que

podem causar interferência na faixa de 2,4 GHz são fornos microondas, aquecedores industriais, sistemas de iluminação por radiofrequência e equipamentos de solda. No entanto, esses equipamentos nem sempre estão presentes na indústria.

Outras fontes de interferência usualmente encontradas nos ambientes industriais são motores elétricos, inversores de frequência e equipamentos de comunicação sem fio, como telefones sem fio e equipamentos para redes locais sem fio. Boa parte dessas interferências, principalmente as relacionadas aos equipamentos industriais, como motores e inversores de frequência apresentam interferência na faixa de algumas centenas de MHz, o que pode atrapalhar a comunicação em sistemas proprietários que utilizam esta faixa de frequência, mas não interferem em sistemas que usam a banda ISM de 2,4 GHz [13] [14].

Angskog *et al.* [15] verificaram as faixas de frequência afetadas por um conjunto de fontes de interferência. Os resultados mostraram que motores de combustão e equipamentos de solda causam interferência apenas abaixo de 1 GHz. No ambiente onde foram realizadas as medições observou-se grande poluição no espectro na faixa de 2,4 GHz devido a outros sistemas de baixo alcance que utilizam essa faixa, como redes Wi-Fi e *Bluetooth*.

Alguns trabalhos foram realizados com o objetivo de verificar o desempenho de rádios IEEE 802.15.4 sujeitos à interferência de redes IEEE 802.11 (Wi-Fi), *Bluetooth* e fornos microondas. Em [16] foi realizado um estudo experimental para verificar a correlação entre a taxa de perda de pacote e a potência média no canal de rádios IEEE 802.15.4 sujeitos à interferência de uma rede IEEE 802.11 e um forno microondas. Os resultados mostraram que essas fontes de interferência aumentam significativamente o nível de energia nos canais, tendo uma influência direta no desempenho de comunicação dos rádios. Em alguns cenários, a taxa de perda de pacote dos rádios IEEE 802.15.4 chegou a 90%, quando sujeitos à interferência da rede IEEE 802.11. Quando sujeitos à interferência do forno microondas, a taxa de perda de pacote no pior caso foi em torno de 50% quando os rádios IEEE 802.15.4 operavam nos canais 21 e 23.

Observou-se certa correlação entre o nível de potência médio no canal e a taxa de perda de pacote. No entanto, a relação entre potência média e taxa de perda de pacote é diferente para cada tipo de fonte de interferência. Dessa forma, métricas mais elaboradas precisam ser desenvolvidas para se escolher com acurácia o melhor canal de comunicação. Na Seção IV discute-se em mais detalhes sobre estimação de qualidade de canal.

Em [3] foram realizados experimentos para investigar o impacto de uma rede IEEE 802.11 e um forno microondas no desempenho de uma RSSF para monitoramento de motores em ambiente industrial. Resultados semelhantes aos descritos em [16] foram observados, com a taxa de perda de pacote chegando a cerca de 90% quando a RSSF estava sujeita à interferência de uma rede IEEE 802.11. Resultados semelhantes também foram descritos em [17]. Em [18] são descritos experimentos para verificar o impacto da distância entre transmissor e receptor e entre os nós sensores e as fontes de interferência (rádios *Bluetooth*, IEEE 802.11 e forno

microondas) em ambiente predial. Observou-se uma taxa de perda de pacote de até 25% devido às interferências da rede IEEE 802.11 e forno microondas para os cenários estudados. A interferência por parte dos rádios *Bluetooth* foi muito pequena. Isso se deve ao mecanismo de salto de frequência definido pelo padrão IEEE 802.15.1, que utiliza 79 canais de 1 MHz ao longo da banda de 2,4 GHz.

B. Modelagem do Ruído e Interferência

O ruído e as fontes de interferência são capazes de influenciar significativamente o desempenho de comunicação das RSSF. Dessa forma, é importante que avaliações de desempenho de novos protocolos e algoritmos para RSSF levem em consideração os efeitos causados por esses fatores. Para que isso seja possível, é necessária a construção de modelos que permitam capturar os efeitos de ruído e interferência na faixa de frequência utilizada para comunicação. O ruído total na banda de 2,4 GHz pode ser visto como uma soma do ruído de fundo com o ruído impulsivo, gerado principalmente por equipamentos de comunicação que utilizam esta faixa de frequência. O ruído de fundo em um sistema sem fio usualmente é modelado como um ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

Em [19] foi desenvolvido um modelo para o canal de RSSF em ambiente industrial, que leva em consideração ruído de fundo, fontes de interferência e características de multipercurso. O ruído em ambiente industrial foi modelado como a superposição de ruído AWGN e ruído impulsivo gerado por um processo de Markov, de acordo com

$$n(t) = w(t) + b(t)d(t), \quad (1)$$

em que $w(t)$ e $d(t)$ são variáveis gaussianas com média zero e $b(t)$ consiste em um processo de Markov. $n(t)$ consiste na soma do ruído AWGN de fundo e o ruído impulsivo. $b(t)$ é modelado como uma cadeia de Markov com dois estados, que definem se o ruído impulsivo está ativo ou não. Essa cadeia possui quatro probabilidades de transição. Os valores dessas probabilidades definem o intervalo entre rajadas de ruído impulsivo e o tempo de duração das rajadas. A amplitude dos impulsos é controlada por um parâmetro que define a variância da distribuição gaussiana de média zero $d(t)$. Em [20] uma abordagem semelhante foi utilizada para realizar a modelagem de ruído impulsivo e expressões foram derivadas para avaliar a taxa de erro de *bits* em esquemas de modulação digital considerando o ruído impulsivo.

Os parâmetros do modelo precisam ser estimados a partir de medições para o ambiente de propagação considerado. Em [19] não foram realizados experimentos para uma determinação acurada dos parâmetros e validação do modelo.

Em [21] foram propostas técnicas para modelagem de ruído, visando melhorar o modelo de taxa de entrega de pacotes em simuladores de RSSF. Foram realizadas medições em diversos ambientes e os modelos de simulação foram desenvolvidos utilizando três técnicas. Entre essas técnicas, a *Closest-Fit Pattern Matching* (CPM) apresentou melhor resultado. Os dispositivos que realizam comunicação baseada em pacotes geram ruído impulsivo com algum nível de correlação temporal. Dessa

forma, modelos mais acurados devem tentar capturar essa correlação temporal.

O método CPM considera correlação temporal com certo limite. São consideradas k amostras anteriores para poder estimar o valor da próxima amostra. Para cada combinação de k amostras anteriores existe uma distribuição de probabilidade que é amostrada para gerar o valor de ruído naquele momento. Quanto maior o valor de k , maior será a correlação temporal capturada, porém é mais difícil obter distribuições para todas as combinações possíveis. Em [21] não foram observadas todas as formas de interferência em 2,4 GHz e nem em ambientes industriais. No entanto, essa metodologia pode ser empregada para a construção de modelos também para esses ambientes.

A realização de estudos experimentais em ambientes industriais, visando caracterizar o ruído e a interferência, pode ajudar no refinamento e na validação desses modelos. Além disso, é importante realizar experimentos para identificar a influência do ruído e das fontes de interferência no desempenho de rádios no ambiente industrial, de modo que seja possível determinar a relação entre o nível de ruído e a qualidade de serviço da RSSF.

III. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL SEM FIO EM AMBIENTE INDUSTRIAL

A. Perda de Caminho em Larga Escala

Em ambientes industriais usualmente existem muitos objetos metálicos, além de objetos móveis, como robôs, automóveis e pessoas. Isso influencia tanto na atenuação em larga escala como no desvanecimento em pequena escala. Alguns estudos experimentais foram realizados para verificar os efeitos do ambiente industrial no canal sem fio [6] [22].

A potência do sinal recebido em um receptor depende da potência de transmissão, do ganho das antenas, da distância entre transmissor e receptor e dos efeitos causados pelo ambiente. A Equação 2 mostra a perda no caminho em dB para uma distância d entre transmissor e receptor. Nesse modelo de perda de caminho log-distância [23], a potência média do sinal recebido diminui logaritmicamente com a distância.

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (2)$$

A perda de percurso na distância d depende da perda no caminho em uma distância de referência d_0 e um expoente de perda n . A Equação 2 considera o valor médio da perda no caminho para as distâncias d e d_0 , considerando todos os valores possíveis de perda no caminho para essas distâncias. O valor de $L(d_0)$ pode ser determinado utilizando a perda no caminho de espaço livre, por meio da equação $L(d_0) = 20 \log(4\pi d_0/\lambda)$ ou por meio de medições em uma distância apropriada [6] [23]. λ é o comprimento de onda da portadora.

Existe uma variação entre a potência do sinal recebido, dependendo do local onde é feita a medição. Para capturar essa variação, uma variável aleatória X_σ é somada à Equação 2.

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log \left(\frac{d}{d_0} \right) + X_\sigma. \quad (3)$$

Essa variação na potência recebida em diferentes pontos com a mesma distância entre transmissor e receptor é conhecida como sombreamento log-normal [23]. Experimentos apresentados em [6] para ambientes industriais confirmaram que X_σ segue uma distribuição log-normal.

Em [6] são descritos resultados experimentais para determinação do expoente n e do sombreamento log-normal X_σ em ambientes industriais nas frequências de 900, 2.400 e 5.200 MHz. Foram realizados experimentos em uma indústria de processamento de metal e uma indústria de processamento de madeira. Foram considerados três tipos de ambientes. O primeiro tipo de ambiente permitia visada direta entre o transmissor e o receptor, enquanto o segundo e terceiro tipos de ambiente não permitiam visada direta. O terceiro tipo de ambiente apresentava mais estruturas circundantes aos rádios em comparação com o segundo tipo de ambiente, além de estruturas com altura maior que as antenas do transmissor (posicionada a 6 metros do chão) e receptor (posicionada a 2 metros do chão).

Para cada um dos tipos de ambiente e para cada uma das frequências, foram feitas as estimativas dos parâmetros n e X_σ do modelo apresentado na Equação 3. Foi considerado $d_0 = 15$ e o valor de $L(d_0)$ foi obtido por meio de medições. Essa estratégia apresentou maior acurácia em comparação com a utilização de um valor fixo, baseado na perda de espaço livre.

A Tabela I mostra os parâmetros obtidos em [6] para a banda de 2,4 GHz nos três tipos de ambiente. Em [22] também foram realizados experimentos para determinação de n e X_σ em alguns ambientes representativos no contexto de aplicações de *smart grids*, incluindo ambientes industriais.

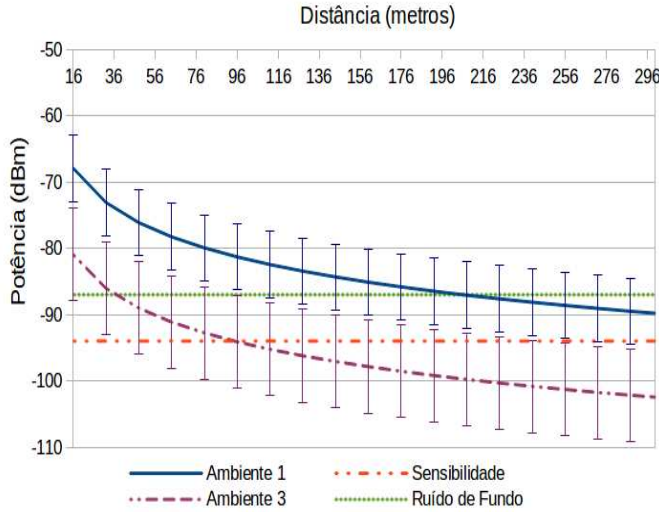
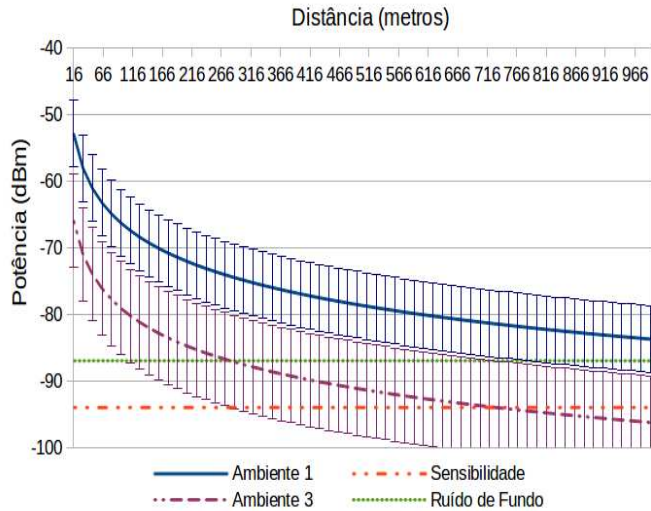
Tabela I. PARÂMETROS DO MODELO DE PERDA NO CAMINHO LOG-DISTÂNCIA.

Tipo do Ambiente	$L(d_0)$	n	X_σ
Ambiente 1	67,43 dB	1,72	4,73 dB
Ambiente 2	72,71 dB	1,52	4,61 dB
Ambiente 3	80,48 dB	1,69	6,62 dB

Considerando os valores da Tabela I pode-se fazer uma análise teórica de alcance de rádios IEEE 802.15.4 nos ambientes industriais considerados. Os gráficos nas Figuras 3 e 4 mostram a potência de recepção considerando potências de transmissão de 0 dBm e 15 dBm, respectivamente. São mostradas curvas para o primeiro tipo de ambiente e para o terceiro tipo de ambiente. Esses valores de potência de transmissão são encontrados em transceptores disponíveis no mercado, como os da família MRF24J40 [24], da *Microchip*™. A potência de recepção é calculada de acordo com [23]

$$P_R(d) = P_T - L(d), \quad (4)$$

em que P_T é a potência de transmissão (em dBm) e $L(d)$ é a perda no caminho (em dB), obtida por meio da Equação 2, e utilizando os parâmetros descritos na Tabela I. No gráfico também foram considerados os desvios padrão para cada caso. Para se ter uma ideia do alcance dos rádios, são mostrados no gráfico o valor médio do ruído de fundo encontrado nos experimentos realizados em [6] (-87 dBm) e a sensibilidade dos rádios (-94 dBm).

Figura 3. Potência de recepção para $P_T = 0$ dBm.Figura 4. Potência de recepção para $P_T = 15$ dBm.

Utilizar rádios com baixa potência (0 dBm) em ambientes industriais pode não ser viável, devido à perda no caminho acentuada observada nos cenários analisados. Considerando apenas o valor médio da potência recebida em determinada distância podemos observar que, no pior caso (ambiente 3), a uma distância de 30 metros o sinal já apresenta valor médio igual ao valor médio do ruído de fundo. Utilizando um rádio com 15 dBm o alcance é cerca de 10 vezes maior. Mesmo assim observa-se também uma perda acentuada, uma vez que os rádios com potência de transmissão de 15 dBm são projetados para alcances de até 1,2 km em visada direta. No cenário 1 (com visada direta), observa-se um alcance mais próximo do alcance especificado no *datasheet* do transceptor.

É importante notar que nessa análise não foi considerado

o ruído impulsivo que pode ser encontrado no ambiente industrial e é capaz de influenciar de forma considerável a taxa de erro de bit, mesmo para pequenas distâncias.

A utilização de rádios com maior potência aumenta o consumo de energia da RSSF. Caso existam nós sensores alimentados por bateria, o tempo de vida da rede pode ser bastante reduzido. Além disso, aumenta-se o nível de interferência entre nós da mesma RSSF. Uma solução alternativa para aumentar o alcance da rede é a utilização de múltiplos saltos, por meio de roteadores intermediários. Pode-se também explorar técnicas de agrupamento de RSSF, que podem prolongar o tempo de vida da rede [25]. No entanto, para canais que apresentam alta taxa de erro de bit, a probabilidade de um pacote ser entregue utilizando múltiplos saltos pode se tornar muito pequena.

B. Atenuação em Pequena Escala e Multipercursos

Além da perda no caminho, deve-se também analisar a atenuação em pequena escala nos ambientes industriais. Em [6] foram realizados estudos sobre a variação temporal no nível de energia dos canais. Essa variação temporal está ligada principalmente à movimentação de obstáculos ao redor do transmissor e do receptor e ocorre devido à modificação do perfil de multipercursos no tempo.

Os experimentos demonstrados em [6] validaram o uso da distribuição de Rice como modelo para a atenuação temporal. Essa distribuição descreve a atenuação em pequena escala quando existe um sinal dominante estacionário e os componentes aleatórios se sobrepõem a este componente principal [23]. Foram feitos estudos para determinar o fator K de Rice nos cenários estudados. A distribuição dos valores de K obtidos em todas as medições apresentou correspondência com uma distribuição log-normal, com valor médio de 12 dB e desvio padrão de 5,4 dB. O fator de Rice é obtido de acordo com a Equação 5 e a função densidade de probabilidade $p_R(x)$ da distribuição de Rice é mostrada na Equação 6 [23].

$$K = 10 \log \left(\frac{A^2}{2b^2} \right). \quad (5)$$

$$p_R(x) = \frac{x}{b^2} e^{-\frac{(x+A^2)}{2b^2}} I_0 \left(\frac{Ax}{b^2} \right), A \geq 0, x \geq 0, \quad (6)$$

em que A^2 representa a parte invariante no tempo, relativa à potência da componente estacionária e $2b^2$ corresponde à parte variável devido às movimentações que alteram o padrão das componentes de multipercursos. Nos ambientes industriais estudados em [6] observou-se um alto valor de K em comparação com o encontrado, por exemplo, em ambientes de escritório. Isso pode ser explicado pela natureza aberta dos prédios industriais e pela grande quantidade de materiais refletivos. Dessa forma, existem muitos raios invariantes no tempo no ambiente e apenas uma pequena parte do perfil de multipercursos é afetada pela movimentação de objetos.

Em [26] foi realizada uma caracterização do canal de comunicação em um ambiente com características industriais, utilizando rádios IEEE 802.15.4. Mais especificamente, foi estudado o efeito devido à topologia do ambiente no desempenho de comunicação de rádios IEEE 802.15.4. Durante os

experimentos todas as máquinas e equipamentos de rede foram desligados, de modo a não provocar interferência externa.

Foram verificadas variâncias temporais e espaciais no desempenho. Para verificar variação espacial, um galpão com tamanho 15 m x 11 m foi dividido em uma grade, com células de 1 m². O nó receptor foi posicionado no centro do ambiente e o nó transmissor foi posicionado em cada um dos outros locais na grade. Para cada local foram medidos a taxa de perda de pacote (TPP), o nível de energia no canal (RSSI) e o indicador de qualidade do canal (LQI). Para verificar variações temporais, os três parâmetros (TPP, RSSI e LQI) foram monitorados em uma posição específica durante 24 horas.

O RSSI consiste em uma medição da potência no canal. O LQI é uma caracterização da qualidade de um pacote recebido. Pode-se utilizar diferentes métricas para calcular o LQI, como RSSI ou a relação sinal ruído. Alguns transceptores [24] [27] calculam o nível de distorção dos símbolos recebidos nos primeiros períodos de símbolo, durante a recepção do preâmbulo do pacote.

Para os experimentos descritos em [26] foi utilizado o canal 26 nos rádios, com potência de transmissão de -5 dBm e pacotes de 94 bytes. Experimentos com outros canais poderiam fornecer as variações do perfil de multipercurso em diferentes frequências. Outra limitação do trabalho descrito em [26] é que o ambiente considerado foi muito pequeno (distância entre transmissor e receptor menor que 10 metros). Dessa forma, observou-se boa qualidade de comunicação em todos os pontos do ambiente (TPP menor que 6%). Mesmo com essa limitação foi possível observar variações de qualidade entre diferentes pontos. Mais especificamente, os locais que possuíam uma maior quantidade de materiais metálicos ao redor e sem visada direta apresentaram pior qualidade de canal, como esperado.

Outro fenômeno que pode ser observado em ambientes industriais é a assimetria de canal. Como o ambiente influencia de maneira diferente dois nós que estão comunicando entre si, a qualidade do canal pode ser melhor em uma direção do que em outra, como foi observado nos resultados descritos em [26].

Na análise temporal, observou-se mínima variação, uma vez que não existiam objetos móveis nem fontes de interferência no ambiente.

A identificação da relação entre a qualidade dos canais com a topologia do ambiente pode permitir o desenvolvimento de uma metodologia para prever a qualidade de um canal, dado um determinado leiaute do ambiente [26]. Mais especificamente, pode-se simular o perfil de multipercurso no ambiente. Por meio das informações obtidas nessa simulação o planejamento de implantação da rede pode ser feito visando mitigar os problemas de atenuação por multipercurso. As RSSF industriais podem ser implantadas de forma planejada, diferente de outros tipos de RSSF, como algumas redes para monitoramento ambiental [28].

Alguns trabalhos foram realizados para verificar o espalhamento de atraso eficaz e o atraso máximo de excesso em ambientes industriais [13] [14] [29]. O espalhamento de atraso eficaz representa a medida do tempo médio de resposta a um impulso no canal de rádio. O atraso máximo de excesso provê informações sobre o tempo máximo em que uma componente

de multipercurso pode chegar ao receptor após a recepção da primeira componente. Ambientes que apresentam valores altos para essas métricas podem provocar interferência entre símbolos, caso a taxa de símbolos seja muito alta.

Stenumgaard et al. e Ferrer-Coll et al. [13] [14] observaram as características de três tipos de ambientes industriais: ambientes muito refletivos, ambientes absorptivos e ambientes que se enquadram entre refletivos e absorptivos. Os resultados mostraram que ambientes refletivos apresentam muito mais componentes de multipercurso e apresentam espalhamento de atraso eficaz e atraso máximo de excesso maiores em todas as faixas estudadas. Por exemplo, na faixa de 2,4 GHz, observou-se um atraso máximo de excesso de 860 ns no ambiente refletivo e 42 ns no ambiente com características absorptivas. O espalhamento de atraso eficaz foi de 294,19 ns e 28,9 ns, respectivamente.

Em [29] foram descritas medições de propagação em ambientes industriais, visando avaliar fatores ambientais que influenciam na qualidade do canal, como a geometria do ambiente e as características dos objetos existentes no ambiente. O espalhamento de atraso eficaz para altas frequências (exemplo: 2,4 GHz) foi de 80 ns no pior caso. A diferença desse valor em comparação com os valores encontrados em [13] [14] provavelmente deve-se ao fato de os experimentos descritos em [29] terem sido realizados com antenas direcionais, o que diminui a quantidade de componentes de multipercurso.

Para ambientes externos o espalhamento de atraso eficaz é maior em comparação com o encontrado em ambientes industriais internos. Para os canais de rádio móvel o atraso é da ordem de microssegundos e em ambientes internos os atrasos são da ordem de nanossegundos [23]. Como os rádios utilizados em RSSF possuem uma taxa de símbolos relativamente baixa, interferência entre símbolos pode não ser um problema para essas redes em ambientes internos. Por exemplo, o padrão IEEE 802.15.4 apresenta uma taxa de símbolos de 62,5 kbaud na faixa de 2,4 GHz, o que representa um período de símbolo de 16 μ s.

IV. ESTIMAÇÃO DE QUALIDADE DE CANAL PARA RSSF

Para mitigar a falta de confiabilidade em RSSF faz-se necessário lidar tanto com o ruído e a interferência, que podem estar presentes no ambiente, como características ambientais que influenciam na qualidade do canal, como perfil de multipercurso em diferentes pontos do ambiente e a atenuação de larga escala. Esses problemas aparecem de forma severa em ambientes industriais, devido aos muitos equipamentos e objetos metálicos encontrados nestes ambientes.

Uma forma de lidar com as variações de qualidade dos canais em RSSF é a utilização de estratégias de alocação dinâmica de canal. O primeiro passo para realizar alocação dinâmica de canal é a estimação da qualidade dos canais, de modo que os rádios possam decidir qual o melhor canal a ser utilizado na rede. Além da capacidade de escolher o melhor canal, deve-se desenvolver estratégias para permitir uma rápida sincronização da rede em caso de troca de canais. A escolha de um canal pode ser prejudicada devido às variações espaciais de qualidade dos canais, de modo que um canal pode estar

com alta qualidade para um subconjunto de nós e com baixa qualidade para outro subconjunto de nós.

Os estimadores de qualidade de canal são blocos fundamentais na construção de diversos mecanismos para RSSF, como protocolos de roteamento e mecanismos de controle de topologia [30], além de mecanismos de alocação dinâmica de canal.

Protocolos de roteamento podem se basear em informações de qualidade de canal para escolher rotas mais confiáveis em uma RSSF *ad hoc*. Em [31] o algoritmo de roteamento *Collection Tree Protocol* foi testado utilizando diversos estimadores de qualidade de canal, considerando ambientes de *smart grid*. Pelos resultados, observou-se a importância de se considerar a assimetria dos canais na estimação de qualidade. Métricas que consideram simetria no canal apresentaram pior resultado.

No contexto de RSSF, os estimadores devem respeitar as restrições de recursos dos nós sensores. Dessa forma, algumas técnicas clássicas aplicadas a redes cognitivas podem não ser aplicáveis para RSSF [32]. Além disso, os estimadores devem possuir boa reatividade a mudanças e manter boa estabilidade, o que forma uma relação de compromisso [30].

Alguns estimadores são baseados em *hardware* (LQI, relação sinal ruído ou RSSI) e outros em *software* (taxa de entrega de informações, número de retransmissões etc) [30]. Os estimadores baseados em *hardware* têm a vantagem de não exigir recursos computacionais dos nós sensores, uma vez que as medições de qualidade são fornecidas pelo transceptor, como informações associadas aos pacotes recebidos. Estimadores baseados em *software* podem exigir a transmissão de pacotes de diagnóstico, no caso de estimadores ativos ou a realização de processamento extra para calcular a qualidade do canal.

Todos os pacotes recebidos por rádios IEEE 802.15.4 possuem um valor de RSSI e LQI associados. No entanto, RSSI pode também ser obtido independente do recebimento de um pacote. Nesse último caso, o transceptor realiza uma leitura do nível de energia no canal, independente da fonte; ou seja, o valor do RSSI é influenciado por qualquer dispositivo que gera ruído e interferência na faixa de frequência do canal. O LQI, por outro lado, apenas pode ser medido durante a recepção de um pacote, uma vez que a métrica se baseia geralmente na análise dos primeiros símbolos dos pacotes recebidos.

Estudos experimentais demonstraram que o LQI apresenta alta variância [18] [30], o que pode dificultar uma correta estimação da qualidade do canal. No entanto, esse problema pode ser mitigado utilizando uma média de vários valores de LQI [33]. Outro problema do LQI é que a qualidade do canal pode ser superestimada, uma vez que o LQI dos pacotes perdidos não é contabilizado [26]. O RSSI, quando medido apenas durante a recepção de pacotes, apresenta o mesmo problema.

O RSSI é mais estável que o LQI, exceto para ambientes muito refletivos, que apresentam maior atenuação de pequena escala devido ao multipercurso [26] [30]. O problema em utilizar RSSI em ambientes com multipercurso se deve ao fato de o nível de energia no canal ser atenuado ou amplificado de forma aleatória, o que pode prejudicar as conclusões tiradas utilizando essa informação.

Na presença de fontes de interferência, conclusões errôneas podem ser tiradas, uma vez que altos níveis de energia, e consequentemente altos valores de RSSI, podem ser observados devido às fontes de interferência e não aos nós sensores.

Uma alternativa é utilizar o RSSI de maneira inversa ao explicado anteriormente. Nessa abordagem, um alto valor de RSSI significaria um canal de má qualidade, uma vez que esse valor seria atribuído às fontes de interferência. No entanto, a medição do RSSI deve ocorrer em momentos em que os nós sensores próximos ao nó que está realizando a medição não estejam transmitindo. Outra alternativa seria obter um conjunto de valores de RSSI durante um intervalo de tempo e realizar uma análise do sinal, em busca de padrões que permitam identificar a potência relativa ao ruído de fundo, às transmissões dos nós sensores e às fontes de interferência que geram ruído impulsivo.

Em [34] foram propostas duas métricas para avaliar a qualidade do canal baseadas em vacâncias do canal. A primeira avalia o percentual de tempo em que um canal está livre e a segunda leva em consideração o tempo da vacância, dando prioridade aos canais que apresentam intervalos maiores de vacância. A segunda métrica apresentou melhor resultado, uma vez que a primeira métrica apresenta o viés de considerar canais que oferecem pequenos intervalos de tempo de canal livre como um canal com boa qualidade. Nos experimentos realizados com a primeira métrica, para valores de 0 até 0,4 na métrica (varia de 0 a 1), a taxa de perda de pacote foi de 100%. A segunda métrica apresentou boa correlação com a taxa de perda de pacote. No entanto, uma grande variância foi observada nos resultados, o que pode prejudicar a eficácia desse método de estimação.

Embora a métrica mostrada em [34] possa identificar canais menos afetados por fontes de ruído impulsivo, ela pode também apresentar problemas para estimar o melhor canal em ambientes com multipercurso, uma vez que usa RSSI para identificar a ocupação do canal. Dessa forma, no ponto de medição pode haver atenuação do sinal devido ao multipercurso, fazendo com que o nó conclua que o canal está ocioso.

Ansari *et al.* [32] propuseram um método para alocação dinâmica de canal, em que o canal a ser utilizado é escolhido antes de cada transmissão. Quando os nós não estão transmitindo, medições são realizadas para verificar se os canais estão ociosos. Por meio dessas medições os canais recebem pesos, e apenas canais com peso acima de um certo limiar são considerados na busca antes das transmissões. Uma vantagem dessa abordagem é que uma mesma RSSF pode operar com canais diferentes em localidades diferentes, respeitando a variação espacial da qualidade dos canais. A desvantagem é que o protocolo não garante convergência. Por exemplo, ao tentar transmitir, um nó pode selecionar um canal que não está no conjunto de canais aceitáveis do receptor.

Jindong *et al.* [35] propuseram métricas para estimar a qualidade do canal utilizando RSSI e LQI. Os valores de RSSI e LQI são combinados calculando-se a raiz quadrada da soma dos quadrados de RSSI e LQI. Essa métrica mostrou boa correlação com a TPP nos experimentos e pequena variância em comparação com o uso de apenas RSSI ou LQI. Na presença de fontes de interferência essa abordagem pode prover resultados

errôneos, uma vez que altos valores de RSSI indicam um bom canal nessa métrica. No entanto, a combinação com LQI mitiga esse problema. Além disso, o RSSI e LQI de pacotes perdidos não são levados em consideração na estimação.

Eskola *et al.* [36] propuseram uma técnica para identificar a qualidade do canal baseado na análise de histogramas do nível de energia recebido pelo nó. É realizada uma comparação entre os quatro momentos da distribuição obtida por meio dos valores de RSSI e os momentos obtidos a partir de distribuições que modelam cada caso possível (multipercorso Rayleigh, multipercorso Rice, com fontes de interferência e sem fontes de interferência). Os momentos de referência foram obtidos por simulação.

V. PADRÕES PARA REDES DE SENSORES SEM FIO INDUSTRIAIS

A. IEEE 802.15.4

O padrão IEEE 802.15.4 é designado para aplicações de RSSF e define as camadas física e de acesso ao meio, provendo comunicação sem fio com baixo consumo de energia e baixo custo para aplicações que não requerem alta taxa de transferência de dados. O padrão opera em bandas não licenciadas e um total de 27 canais para comunicação são definidos. A Tabela II mostra mais detalhes sobre a camada física definida pelo padrão [37].

Tabela II. INFORMAÇÕES SOBRE A CAMADA FÍSICA DEFINIDA PELO IEEE 802.15.4.

Faixa de Frequência	Tipo de Modulação	Taxa de bits	Taxa de símbolos	Quantidade de Canais
868 MHz	BPSK	20 kbit/s	20 kbaud	1
915 MHz	BPSK	40 kbit/s	40 kbaud	10
2,4 GHz	O-QPSK	250 kbit/s	62,5 kbaud	16

Como as bandas utilizadas pelo padrão são não licenciadas, os rádios que seguem esse padrão compartilham o meio de comunicação com outros dispositivos que implementam outras tecnologias, como rádios IEEE 802.11 (Wi-Fi) e IEEE 802.15.1 (Bluetooth). Embora esses padrões compartilhem a mesma faixa de frequência, é possível que múltiplas redes coexistam no mesmo ambiente sem causar interferência entre si, se os canais forem alocados de maneira adequada.

A taxa de *bits* máxima no padrão IEEE 802.15.4 é de 250 kbit/s nominal, quando operando na banda de 2,4 GHz. No entanto, o canal é sub-utilizado devido ao protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*) implementado na camada de acesso ao meio. Nesse protocolo, os nós esperam por pelo menos um período de *backoff* antes de tentar transmitir um pacote, mesmo se o meio de comunicação estiver livre. Estudos experimentais descritos em [38] mostraram que a taxa de bits máxima real é em torno de 153 kbit/s.

Para algumas aplicações industriais essa taxa de transferência pode ser suficiente, mas outras aplicações requerem a aquisição de uma grande quantidade de dados e necessitam transmitir muitas informações pela rede. Aplicações para monitoramento de motores se encaixam nesse tipo de

aplicação [3] [5]. Utilizando processamento local nos nós sensores, é possível reduzir a quantidade de dados transmitidos pela rede.

Além dessa limitação, é importante notar que a taxa de transferência de *bits* para um determinado nó sensor pode ser muito menor que 153 kbit/s ao considerar o compartilhamento do meio de comunicação com múltiplos nós na mesma RSSF e o baixo nível de qualidade do meio de comunicação devido à presença de fontes de interferência e pelo desvanecimento em pequena e larga escala no ambiente industrial.

O IEEE 802.15.4 define dois modos de operação. O primeiro é denominado *non-beacon mode*, e é baseado apenas no CSMA/CA. O segundo modo de operação é denominado *beacon mode*. No segundo modo, uma estrutura denominada *superframe* é definida. O *superframe* é delimitado por pacotes (*beacons*) transmitidos pelo coordenador e são então divididos em 16 *slots* de tempo iguais. O *superframe* possui uma porção ativa e uma porção inativa. A porção ativa é dividida em período de acesso por contenção (CAP) e período livre de contenção (CFP). No CAP os dispositivos utilizam CSMA/CA baseado em *slots* de tempo (*slotted-CSMA/CA*) para se comunicar, enquanto no CFP as transmissões são realizadas sem o uso do CSMA/CA. Para aplicações que requerem uma taxa de transferência específica, o coordenador pode dedicar porções da parte ativa, denominadas GTS (*Guaranteed Time Slot*), para determinados nós.

Em uma rede IEEE 802.15.4 os nós podem ser de dois tipos: FFD (*Full Function Device*) ou RFD (*Reduced Function Device*). Nós FFD podem agir como coordenador, nó final ou roteador intermediário. Nós RFD podem agir apenas como nós finais [39]. A topologia da rede pode ser organizada de três formas: estrela, árvore ou em malha. A Figura 5 ilustra as três topologias.

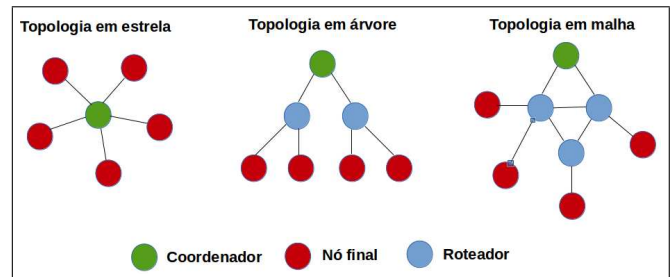


Figura 5. Topologias suportadas pelo padrão IEEE 802.15.4.

Alguns padrões para camadas superiores foram propostos para RSSFs baseadas no padrão IEEE 802.15.4. Entre eles, certamente o mais empregado é o padrão Zigbee [40]–[43], que define aspectos da camada de rede e aplicação para RSSF. Esse protocolo possui características desejáveis para RSSF como o baixo consumo de energia e a capacidade de ser executado em dispositivos com baixo poder de processamento e baixo custo. O protocolo ZigBee suporta as três topologias definidas pelo padrão e é muito utilizado para a construção de redes em malha.

Para aplicações industriais o padrão ZigBee não é adequado, uma vez que não implementa mecanismo de coexistência. O

padrão ZigBee utiliza uma abordagem de alocação estática do canal; ou seja, não existe mecanismo para mudança de canal, caso o canal sendo utilizado passe a oferecer baixa qualidade, devido à existência de fontes de interferência no ambiente.

Os rádios que implementam o padrão ZigBee utilizam apenas o mecanismo de controle de acesso ao meio para tentar minimizar a quantidade de colisões [18]. No entanto, a utilização do CSMA/CA não garante a qualidade de serviço da rede. Por exemplo, embora os rádios IEEE 802.15.4 sejam capazes de detectar transmissões de rádios IEEE 802.11, o contrário pode não ocorrer, uma vez que os rádios IEEE 802.15.4 usualmente possuem baixa potência de transmissão [44] [45].

O protocolo MiWi [46], desenvolvido pela MicrochipTM, é uma alternativa para construção de redes baseadas no padrão IEEE 802.15.4. Esse protocolo também suporta a construção de redes em malha. Embora seja semelhante ao ZigBee, o MiWi apresenta um mecanismo para realização de mudança dinâmica de canal, denominado *Frequency Agility*. Para escolher o novo canal, um nó FFD, denominado *initiator*, realiza uma varredura para obter o nível de energia em todos os canais e após isso envia uma mensagem de *broadcast* para os outros nós da rede informando o novo canal da rede. Caso algum nó não receba o pacote de *broadcast*, provavelmente devido a uma falha de transmissão, um processo de resincronização é realizado após um determinado número de pacotes serem transmitidos sem sucesso. A resincronização consiste em verificar todos os canais até encontrar o canal atualmente em uso.

Embora seja uma alternativa para melhorar a qualidade de comunicação, o mecanismo *Frequency Agility* ainda apresenta uma forte dependência da camada de aplicação, uma vez que a aplicação determina o momento em que uma possível troca de canal deve ocorrer. Além disso, deve-se atentar para a relação de compromisso entre a acurácia na escolha do melhor canal para a rede e a sobrecarga de processamento nos nós. O nó *initiator* pode precisar perder muito tempo realizando varreduras nos canais, para manter a rede sempre em um canal com qualidade. Por outro lado, os nós podem passar muito tempo sem oferecer informações durante o processo de resincronização. Outro ponto a se observar é que esse mecanismo não leva em consideração variações espaciais na qualidade dos canais.

O padrão ZigBee Pro inclui um mecanismo para troca de canal semelhante ao proposto no protocolo MiWi, mas o padrão não especifica como o coordenador da rede deve tomar a decisão para trocar os canais [47].

B. WirelessHart

O WirelessHART é considerado o primeiro padrão aberto voltado para aplicações de monitoramento e controle utilizando redes sem fio em ambiente industrial [48], tendo sido lançado em 2007. Esse padrão se baseia na camada física do IEEE 802.15.4, mas implementa a própria camada de acesso ao meio. O WirelessHART utiliza apenas 15 canais definidos na banda de 2,4 GHz, uma vez que o canal 26 não é permitido em alguns países [49]. O acesso ao meio é realizado utilizando acesso múltiplo por divisão no tempo (TDMA). O uso do TDMA visa reduzir colisões e diminuir o consumo de energia [50].

O WirelessHART define a utilização de um mecanismo de salto em frequência para mitigar os efeitos de interferência. Para evitar que os rádios utilizem canais com baixa qualidade é definido um mecanismo denominado *Blacklisting*. Nesse mecanismo, os canais que apresentarem baixo nível de qualidade não são utilizados na sequência pseudo-aleatória gerada pelo mecanismo de salto em frequência. No entanto, a configuração da *blacklist* não é feita automaticamente, e sim por um administrador de rede. Levando em consideração as características muito dinâmicas dos canais nas RSSF, tanto espacialmente como temporalmente [30], uma abordagem centralizada de definição da *blacklist* pode não prover boa qualidade de serviço.

Na camada de rede, o WirelessHART é baseado em uma rede em malha com rotas redundantes. Essa característica, que não é encontrada no ZigBee e MiWi, permite aumentar a confiabilidade e tolerância a falhas. As rotas são definidas de forma centralizada por uma unidade central (ou administrador de rede). Essa unidade centralizada também é responsável por escalonar o tempo entre todos os nós da rede, garantindo o correto funcionamento do mecanismo TDMA. Rotas redundantes também podem ser implementadas em rádios totalmente compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4.

Em [49] são apresentados estudos de desempenho de rádios WirelessHART. Foram realizados experimentos com os rádios sujeitos à interferência devido a três redes IEEE 802.11g, nos canais 1, 6 e 11. Os resultados mostraram que durante períodos de interferência, a taxa de perda de pacote chegou a 27,2%. Foi observada uma latência de aproximadamente dois segundos para a rede operando livre de fontes de interferência e em torno de 2,7 segundos quando a rede estava sujeita às fontes de interferência. Dessa forma, pode-se observar que os mecanismos empregados no padrão WirelessHART, como o TDMA e o salto em frequência, implicam grande latência. Observa-se também que sem um gerenciamento adequado da *blacklist* o desempenho dos rádios pode ser muito prejudicado por fontes de interferência.

Em [51] também foram apresentados resultados experimentais sobre o desempenho de uma rede WirelessHART. Nesses experimentos foi observada uma latência de um segundo entre o nó final e o *gateway* da rede. No entanto, os experimentos foram realizados sem considerar fontes de interferência e em ambiente não realista.

C. ISA100

A Sociedade Internacional de Automação (ISA) idealizou o padrão ISA100 [52], que é também designado para aplicações industriais. Assim como o WirelessHART, o ISA100 é baseado na camada física do IEEE 802.15.4 e utiliza os 16 canais da banda de 2,4 GHz, mas define sua própria camada de acesso ao meio. A camada de acesso ao meio é também baseada em TDMA, salto de frequência e *blacklisting*, para aumentar a confiabilidade.

Uma importante diferença do ISA100 com relação ao WirelessHART é que, em nível de aplicação, ele foi designado para suportar diversos padrões de redes industriais, e não apenas o padrão HART. Além disso, o esquema de salto em frequência

é mais flexível, fornecendo três padrões diferentes. O primeiro, denominado *slotted* define um canal diferente para cada transmissão de um rádio, enquanto o segundo, denominado *slow*, realiza troca de canais em intervalos de tempo bem definidos e mais longos. O terceiro é uma combinação dos dois primeiros [53]. A camada de rede também é diferente, uma vez que permite a utilização de cabeçalhos compatíveis com o protocolo IP [48].

Em [47] é descrito um estudo para verificar o desempenho de rádios ISA100 e ZigBee Pro no contexto de aplicações aeroespaciais. Os rádios ISA100 possuem custo consideravelmente maior quando comparados com rádios totalmente compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4, mas é capaz de suportar melhor a presença de interferências. Nos experimentos realizados em [47] os rádios ISA100 mantiveram bom desempenho mesmo na presença de interferência, enquanto os rádios ZigBee apresentaram uma queda de desempenho. No entanto, a latência das transmissões no ISA100 é bem maior. Nos experimentos foram realizados testes com taxas de transmissão de pacotes muito baixas (no máximo um pacote por segundo). Como rádios totalmente compatíveis com o padrão IEEE 802.15.4 oferecem uma maior taxa de transferência real e uma menor latência, uma melhor qualidade de comunicação poderia ser alcançada por meio da transmissão de pacotes redundantes.

Embora os padrões WirelessHART e ISA100 apresentem mecanismos para lidar com coexistência e para oferecer garantias de qualidade de serviço, ainda existe uma dependência do correto gerenciamento da *blacklist* para manter a rede operando com boa confiabilidade. Dessa forma, estudos sobre identificação de fontes de interferência e estimação de qualidade de canal se mostram muito relevantes também para esses padrões.

VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este artigo apresentou os desafios para a implantação de redes de sensores sem fio em ambientes industriais. As RSSF industriais podem ser empregadas em diversas aplicações de monitoramento e controle na indústria, oferecendo uma solução de baixo custo e grande flexibilidade, quando comparadas com soluções que utilizam redes cabeadas.

Devido às características dos ambientes industriais, que apresentam muitos equipamentos e objetos metálicos, problemas de interferência e atenuação podem surgir, tornando a qualidade de serviço dessas redes muito baixa. Para resolver o problema de falta de confiabilidade, mecanismos e protocolos devem ser desenvolvidos para mitigar os problemas existentes nos ambientes industriais.

No artigo também foi feita uma discussão sobre alguns padrões de RSSF que usualmente são empregados para a construção dessas redes. Alguns novos padrões são designados para aplicações industriais, como o WirelessHART e o ISA100, mas estes padrões apresentam um custo elevado quando comparado com o padrão IEEE 802.15.4, que é o mais empregado para aplicações de RSSF. Em contrapartida eles possuem mecanismos de coexistência que podem melhorar a qualidade de serviço das RSSF em ambientes industriais, a troco de um alto custo e de uma alta latência. Além disso, sem um correto gerenciamento das redes, a qualidade serviço pode também ser prejudicada.

Um tópico interessante para RSSF industriais é a estimação de qualidade de canal. Os estimadores de qualidade de canal são blocos fundamentais no desenvolvimento de técnicas de alocação dinâmica do canal, que podem permitir que as RSSF se adaptem ao ambiente onde estão inseridas, de modo a mitigar os efeitos de interferência e os efeitos ambientais na qualidade de serviço da rede. No entanto, a criação de um estimador de qualidade de canal capaz de identificar fontes de interferência, problemas de atenuação e que respeite as restrições de recursos das RSSF é um tópico desafiador. Uma possível solução é a combinação de diferentes técnicas para obter uma visão mais holística da qualidade do canal no ambiente.

Como trabalhos futuros pretendemos realizar estudos experimentais para contribuir na elaboração, refinamento e validação de modelos para ruído e fontes de interferência em ambiente industrial. Além de obter informações valiosas sobre a influência do ambiente de operação da rede na qualidade de serviço. Possíveis pontos a serem explorados são:

- Desenvolvimento de métrica baseada em RSSI e LQI para escolher o melhor canal de operação, a partir da identificação de fontes de interferência e problemas de atenuação;
- Desenvolvimento de uma arquitetura de RSSF com nós dedicados ao sensoriamento de qualidade de canal. Isso permitiria retirar dos nós sensores a responsabilidade de realizar sensoriamento espectral, diminuindo o consumo de recursos e evitando que os nós parem de realizar monitoramento dos parâmetros de interesse para realizar monitoramento de canal;
- Realização de estudos para determinar a correlação entre canais do padrão IEEE 802.15.4, visando otimizar o processo de monitoramento dos canais. Fontes de interferência como redes IEEE 802.11 e fornos microondas provocam interferência em vários canais vizinhos em simultâneo, de modo que os canais vizinhos podem apresentar alta correlação quando sujeitos a fontes de interferência externa;
- Elaboração de algoritmos para otimizar o processo de resincronização da rede em caso de troca de canais, fazendo uso de classificação de canais (alguns trabalhos já exploraram essa ideia [32] [34]). O conhecimento sobre a correlação entre canais pode auxiliar no processo de classificação;
- Elaboração de modelos para fontes de interferências em ambientes industriais e a incorporação destes modelos em simuladores de RSSF.
- Investigação da relação entre a qualidade dos canais e a topologia do ambiente, visando a elaboração de uma metodologia para identificação dos efeitos de multipercurso na qualidade dos canais, como suporte à implantação das RSSF.
- Explorar redundância de canais para aumentar a confiabilidade de RSSF em ambientes industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições: Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), Conselho Na-

cional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Universidade Federal da Paraíba (UFPB), e Eletrobras distribuição Alagoas (CEAL).

REFERÊNCIAS

- [1] B. Lu and V. Gungor. "Online and Remote Motor Energy Monitoring and Fault Diagnostics Using Wireless Sensor Networks". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 11, pp. 4651–4659, Nov 2009.
- [2] V. Gungor and G. Hancke. "Industrial Wireless Sensor Networks: Challenges, Design Principles, and Technical Approaches". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 56, no. 10, pp. 4258–4265, Oct 2009.
- [3] A. Lima-Filho, R. Gomes, M. Adissi, T. Borges da Silva, F. Belo and M. Spohn. "Embedded System Integrated Into a Wireless Sensor Network for Online Dynamic Torque and Efficiency Monitoring in Induction Motors". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 17, no. 3, pp. 404–414, June 2012.
- [4] M. P. Sousa and W. T. A. Lopes. "Desafios em Redes de Sensores sem Fio". *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 1, no. 1, pp. 41–47, 2011.
- [5] R. D. Gomes, M. O. Adissi, A. C. Lima-Filho, M. A. Spohn and F. Belo. "On the Impact of Local Processing for Motor Monitoring Systems in Industrial Environments Using Wireless Sensor Networks". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2013, pp. 1–14, 2013.
- [6] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. Van Herwegen and W. Vantomme. "The industrial indoor channel: large-scale and temporal fading at 900, 2400, and 5200 MHz". *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 2740–2751, July 2008.
- [7] H. Hou, L. and N. W. Bergmann. "Induction Motor Fault Diagnosis Using Industrial Wireless Sensor Networks and Dempster-Shafer Classifier Fusion". In *37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2992–2997, 2011.
- [8] E. Esfahani, S. Wang and V. Sundararajan. "Multisensor Wireless System for Eccentricity and Bearing Fault Detection in Induction Motors". *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 19, no. 3, pp. 818–826, Jun 2014.
- [9] J. Ferrer-Coll. "RF Channel Characterization in Industrial, Hospital and Home Environments". Phd, KTH School of Information and Communication Technology, 2012.
- [10] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran and S. Mohanty. "NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio Wireless Networks: A Survey". *Computer Networks*, vol. 50, no. 13, pp. 2127–2159, September 2006.
- [11] L. Bello and E. Toscano. "Coexistence Issues of Multiple Co-Located IEEE 802.15.4/ZigBee Networks Running on Adjacent Radio Channels in Industrial Environments". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 5, no. 2, pp. 157–167, April 2009.
- [12] J. Chilo, C. Karlsson, P. Ångskog and P. Stenumgaard. "EMI Disruptive Effect on Wireless Industrial Communication Systems in a Paper Plant". In *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 221–224, 2009.
- [13] P. Stenumgaard, J. Chilo, P. Ferrer-Coll and P. Ångskog. "Challenges and Conditions for Wireless Machine-to-Machine Communications in Industrial Environments". *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 187–192, June 2013.
- [14] J. Ferrer-Coll, P. Ångskog, J. Chilo and P. Stenumgaard. "Characterisation of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial applications". *IET Communications*, vol. 6, no. 15, pp. 2404–2412, October 2012.
- [15] P. Ångskog, C. Karlsson, J. F. Coll and P. Chilo, J. Stenumgaard. "Sources of Disturbances on Wireless Communication in Industrial and Factory Environments". In *Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 281–284, 2010.
- [16] R. Gomes, M. Spohn, A. Lima, E. Gomes dos Anjos and F. Belo. "Correlation between Spectral Occupancy and Packet Error Rate in IEEE 802.15.4-based Industrial Wireless Sensor Networks". *IEEE Latin America Transactions (Revista IEEE America Latina)*, vol. 10, no. 1, pp. 1312–1318, Jan 2012.
- [17] A. Sikora and V. Groza. "Coexistence of IEEE802.15.4 with Other Systems in the 2.4 GHz-ISM-Band". In *Proceedings of the IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2005. IMTC 2005.*, volume 3, pp. 1786–1791, May 2005.
- [18] W. Guo, W. Healy and M. Zhou. "Impacts of 2.4-GHz ISM Band Interference on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Network Reliability in Buildings". *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 61, no. 9, pp. 2533–2544, Sept 2012.
- [19] M. Cheffena. "Industrial Wireless Sensor Networks: Channel Modeling and Performance Evaluation". *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 297, pp. 1–8, September 2012.
- [20] E. R. Araújo, W. J. L. Queiroz and M. S. Alencar. "Ruído Impulsivo Gaussiano Gatilhado por um Processo de Markov e sua Aplicação em Sistemas de Comunicação Digital". In *XXXI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 1–9, 2013.
- [21] A. Lee, H. abd Cerpa and P. Levis. "Improving Wireless Simulation Through Noise Modeling". In *In Proceedings of ACM/IEEE International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, pp. 21–30, 2007.
- [22] V. Gungor, B. Lu and G. Hancke. "Opportunities and Challenges of Wireless Sensor Networks in Smart Grid". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, Oct 2010.
- [23] T. S. Rappaport. *Comunicações sem Fio - Princípios e Práticas*. Prentice Hall PTR, first edition, 2009.
- [24] Microchip. "MRFJ40MA Data Sheet". <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/70329b.pdf>. Acessado em: 23/06/2014.
- [25] M. S. Alencar, M. P. Sousa, W. J. L. Queiroz, W. T. A. Lopes and F. Madeiro. "Redes de Sensores sem Fio: Aplicações, Tendências e Desafios". In *XII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações*, pp. 1–8, 2013.
- [26] L. Tang, K.-C. Wang, Y. Huang and F. Gu. "Channel Characterization and Link Quality Assessment of IEEE 802.15.4-Compliant Radio for Factory Environments". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 3, no. 2, pp. 99–110, May 2007.
- [27] T. Instruments. "CC2420 Data Sheet". <http://www.ti.com/product/cc2420>. Acessado em: 23/06/2014.
- [28] F. B. S. Carvalho, G. L. Brauliro, J. V. Santos Filho, O. R. Baiocchi and W. T. A. Lopes. "Aplicações Ambientais de Redes de Sensores Sem Fio". *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 2, no. 1, pp. 14–19, 2012.
- [29] K. A. Remley, G. Koepke, C. Holloway, D. Camell and C. Grosvenor. "Measurements in Harsh RF Propagation Environments to Support Performance Evaluation of Wireless Sensor Networks". *Sensor Review*, vol. 29, no. 3, pp. 211–222, 2009.
- [30] N. Baccour, A. Koubâa, L. Mottola, M. A. Zúñiga, H. Youssef, C. A. Boano and M. Alves. "Radio Link Quality Estimation in Wireless Sensor Networks: A Survey". *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 8, no. 4, pp. 34:1–34:33, September 2012.
- [31] V. C. Gungor and M. K. Korkmaz. "Wireless Link-Quality Estimation in Smart Grid Environments". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, vol. 2012, pp. 1–10, 2012.
- [32] J. Ansari and P. Mähönen. "Channel Selection in Spectrum Agile and Cognitive MAC Protocols for Wireless Sensor Networks". In *Proceedings of the 8th ACM International Workshop on Mobility Management and Wireless Access*, pp. 83–90, 2010.

- [33] A. Bildea, O. Alphand, F. Rousseau and A. Duda. "Link Quality Metrics in Large Scale Indoor Wireless Sensor Networks". In *IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1888–1892, 2013.
- [34] C. Noda, S. Prabh, M. Alves, C. A. Boano and T. Voigt. "Quantifying the Channel Quality for Interference-aware Wireless Sensor Networks". *SIGBED Rev.*, vol. 8, no. 4, pp. 43–48, December 2011.
- [35] Z. Jindong, W. Shuanhu, M. Chunxiao, F. Baode and L. Yunhong. "Study and Prediction of Wireless Link Quality for Adaptive Channel Hopping". *Journal of Networks*, vol. 7, no. 11, pp. 1884–1891, 2012.
- [36] M. Eskola, T. Heikkilä and T. Peippola. "Identification of Radio Disturbances of Wireless Sensor Networks". In *Proceedings of the 2013 Summer Computer Simulation Conference*, pp. 1–6, 2013.
- [37] "IEEE Std 802.15.4™. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)", 2006.
- [38] J.-S. Lee. "Performance Evaluation of IEEE 802.15.4 for Low-rate Wireless Personal Area Networks". *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 52, no. 3, pp. 742–749, Aug 2006.
- [39] H. Karl and A. Willig. *Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks*. Wiley, first edition, 2005.
- [40] J. L. Alves dos Santos, R. C. Carvalho de Araújo, A. C. L. Filho, F. A. Belo and J. A. Gomes de Lima. "Telemetric System for Monitoring and Automation of Railroad Networks". *Transportation Planning and Technology*, vol. 34, no. 6, pp. 593–603, 2011.
- [41] P. Cheong, K.-F. Chang, Y.-H. Lai, S.-K. Ho, I.-K. Sou and K.-W. Tam. "A ZigBee-Based Wireless Sensor Network Node for Ultraviolet Detection of Flame". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 11, pp. 5271–5277, Nov 2011.
- [42] C. Caione, D. Brunelli and L. Benini. "Distributed Compressive Sampling for Lifetime Optimization in Dense Wireless Sensor Networks". *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 8, no. 1, pp. 30–40, Feb 2012.
- [43] A. C. Lima Filho, F. A. Belo, J. L. A. Santos and E. G. Anjos. "Self-Powered Telemetric Torque Meter". *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol. 133, no. 4, pp. 1–7, Apr 2011.
- [44] F. Penna, C. Pastrone, M. Spirito and R. Garelo. "Measurement-Based Analysis of Spectrum Sensing in Adaptive WSNs under Wi-Fi and Bluetooth Interference". In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pp. 1–5, April 2009.
- [45] C.-J. M. Liang, N. B. Priyantha, J. Liu and A. Terzis. "Surviving Wi-fi Interference in Low Power ZigBee Networks". In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems, SenSys '10*, pp. 309–322, New York, NY, USA, 2010.
- [46] Microchip. "MiWi Protocol". <http://www.microchip.com/miwi/>. Acessado em: 23/06/2014.
- [47] R. Wagner and R. Barton. "Performance Comparison of Wireless Sensor Network Standard Protocols in an Aerospace Environment: ISA100.11a and ZigBee Pro". In *2012 IEEE Aerospace Conference*, pp. 1–14, March 2012.
- [48] J. Song, S. Han, A. Mok, D. Chen, M. Lucas and M. Nixon. "WirelessHART: Applying Wireless Technology in Real-Time Industrial Process Control". In *IEEE Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium, 2008. RTAS'08.*, pp. 377–386, April 2008.
- [49] S. Petersen and S. Carlsen. "Performance Evaluation of WirelessHART for Factory Automation". In *IEEE Conference on Emerging Technologies & Factory Automation*, pp. 1–9, 2009.
- [50] J. Frey and T. Lennvall. *Networked Embedded Systems*, chapter Wireless Sensor Networks for Automation, pp. 27.1–27.43. CRC Press, 2009.
- [51] P. Ferrari, A. Flammini, S. Rinaldi and E. Sisinni. "Performance assessment of a WirelessHART network in a real-world testbed". In *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, pp. 953–957, May 2012.
- [52] "ISA 100 - Wireless Systems for Automation". <http://www.isa.org/isa100>. Acessado em: 23/06/2014.
- [53] I. Silva, L. A. Guedes, P. Portugal and F. Vasques. "Reliability and Availability Evaluation of Wireless Sensor Networks for Industrial Applications". *Sensors*, vol. 12, no. 1, pp. 806–838, 2012.