

Modelo para Simulação Realista de Redes de Sensores sem Fio Industriais

Ruan D. Gomes, Diego V. Queiroz, Iguatemi E. Fonseca, e Marcelo S. Alencar

Resumo— Este artigo apresenta um modelo de simulação que pode ser aplicado na avaliação de desempenho de protocolos para Redes de Sensores sem Fio (RSSF) industriais. O modelo proposto é capaz de capturar os efeitos de desvanecimento em larga escala, atenuação em pequena escala, sombreamento log-normal e as características não-estacionárias do canal em longos períodos de tempo. Por meio do modelo é possível avaliar protocolos para RSSFs industriais considerando um ambiente de propagação realista e as variações dinâmicas nas características dos canais, que podem ocorrer devido a modificações na topologia e no perfil de multipercurso do ambiente. Além disso, é discutida uma arquitetura para simulação de protocolos multicanais, em que cada canal apresenta características distintas. Isso é justificável pelo fato de os canais serem descorrelacionados em frequência em ambientes que apresentam grande espalhamento de atraso eficaz, como é o caso de ambientes industriais. Isso permitirá a avaliação de protocolos de alocação dinâmica de canal em RSSFs industriais.

Palavras-chave— Redes de Sensores sem Fio Industriais, Simulação de RSSFs, Protocolos Multicanal.

I. INTRODUÇÃO

O uso de Redes de Sensores sem Fio (RSSF) para implementar sistemas de monitoramento e controle em ambientes industriais apresenta algumas vantagens quando comparado com o uso de redes cabeadas, como o baixo custo e flexibilidade [1]. No entanto, é necessário lidar com problemas típicos de redes sem fio, como a alta atenuação, devido à presença de muitos objetos metálicos e obstruções [2].

Uma alternativa para lidar com os problemas da comunicação sem fio em ambientes industriais, e com a variação da qualidade dos canais no decorrer do tempo, é o desenvolvimento de protocolos que utilizam múltiplos canais. O uso de protocolos multicanais permite alcançar uma melhor utilização do canal, aumentando a capacidade de transmissão da rede, por meio da transmissão em simultâneo usando vários canais diferentes. Também é possível atender às variações espaciais de qualidade dos canais [3].

Algumas soluções usam múltiplos canais simultaneamente, com múltiplos transceptores nos nós, ou com a transmissão por diferentes canais em diversos locais da rede [4]. Outras soluções utilizam salto em frequência, como os protocolos MAC dos padrões WirelessHART e ISA100 [5]. Esses mecanismos são tipicamente implementados na camada de acesso ao meio. Alguns trabalhos focam no uso de mecanismos de alocação dinâmica de canal [6], em que a RSSF troca de canal se problemas devido à presença de fontes de interferência ou problemas devido à atenuação por multipercursos são identificados.

Embora vários protocolos com múltiplos canais já tenham sido propostos na literatura, existe uma dificuldade em avaliá-los, e comparar as diferentes abordagens, devido à falta de um *testbed* comum e a carência de simuladores que apresentem modelos acurados para simular ou emular características dos múltiplos canais simultaneamente. Muitos protocolos multicanais são implementados apenas em simuladores com suposições simplistas [3]. Para avaliar os reais benefícios de protocolos multicanais deve-se levar em consideração um modelo realista de propagação e também o atraso relativo à troca de canais [7].

Em ambientes industriais, diferenças nas características dos canais podem ser observadas devido ao perfil de multipercurso do ambiente, uma vez que os canais são descorrelacionados em frequência e o impacto do multipercurso é diferente em canais diferentes [6]. Além disso, mudanças na topologia do ambiente (exemplo, a movimentação de uma grande estrutura metálica) podem provocar mudanças nas características dos canais ao longo do tempo, o que pode causar diferença no valor médio da potência recebida, mesmo o transmissor e receptor permanecendo estáticos. Dessa forma, o canal sem fio no ambiente industrial pode permanecer durante várias horas apresentando as mesmas características e após esse período uma mudança brusca nas características do canal pode ocorrer [8].

O uso de simuladores permite avaliar o desempenho de novos protocolos para RSSFs, com múltiplos nós e em diferentes cenários, sem a necessidade de implementação física da rede, o que provoca uma grande diminuição nos custos. No entanto, os simuladores precisam se basear em modelos que se aproximem da realidade. Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo realista para simulação de protocolos multicanais para RSSFs em ambientes industriais. A implementação do modelo foi realizada utilizando o simulador Castalia, que é baseado no *framework* Omnet++ [9]. A implementação do modelo de camada física do Castalia para a simulação de RSSFs considera o uso de apenas um canal e não considera as características não estacionárias do canal em longos períodos de tempo.

II. CARACTERIZAÇÃO DO CANAL SEM FIO EM AMBIENTES INDUSTRIAIS

A. Perda no Caminho em Larga Escala

Os ambientes industriais usualmente possuem objetos metálicos e objetos móveis, como robôs, carros e pessoas. Isso influencia tanto o desvanecimento em larga escala como a atenuação em pequena escala. Alguns estudos experimentais

foram realizados para verificar os efeitos do ambiente industrial no canal sem fio [2].

A potência do sinal recebido em um receptor depende daquela de transmissão, do ganho da antena, da distância entre receptor e transmissor e dos efeitos causados pelo ambiente. A Equação 1 mostra a perda no caminho em dB para uma distância d entre transmissor e receptor [10].

$$L(d) = L(d_0) + 10n \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X_\sigma, \quad (1)$$

em que n é o expoente de perda no caminho. Existe uma variação na potência recebida, dependendo do local onde a medição é realizada. Para capturar essa variação, uma variável aleatória X_σ é incluída na equação 1. X_σ é uma distribuição gaussiana de média zero e desvio padrão σ , em que os dois parâmetros são representados em dB. X_σ é conhecida como sombreamento log-normal.

B. Atenuação em Pequena Escala

Além da perda no caminho em larga escala e do sombreamento, é necessário analisar também a atenuação em pequena escala devido a rápidas mudanças no perfil de multipercursos do ambiente causado pelo movimento de objetos ao redor do receptor e do transmissor. Experimentos demonstraram que em um ambiente industrial a atenuação temporal segue a distribuição de Rice. Essa distribuição descreve a atenuação em pequena escala quando existe um sinal estacionário dominante e componentes aleatórios que se sobrepõem com o componente principal. O fator K de Rice representa a relação entre a potência do caminho direto e a potência relativa aos outros percursos. Em ambientes industriais, o fator K de Rice possui um valor alto [2]. Isso pode ser explicado pela natureza aberta dos prédios industriais e pela ocorrência de muitos materiais refletivos. Dessa forma, existem vários raios invariantes no tempo e apenas uma pequena parte do perfil de multipercursos é afetada por objetos móveis [2].

C. Perfil de Atraso de Potência e Largura de Banda de Coerência

Alguns trabalhos foram realizados para verificar o espalhamento de atraso eficaz e o atraso máximo de excesso em ambientes industriais. Stenumgaard et al. e Ferrer-Coll et al. [11] [12] 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 multipercursos e apresentam espalhamento de atraso eficaz 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 [13] 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 [11] e [12] provavelmente deve-se ao fato de os experimentos descritos em [13] terem sido realizados com antenas direcionais, o que diminui a quantidade de componentes de multipercursos.

A largura de banda de coerência de um canal é o intervalo de frequência (Δf) em que um canal é correlacionado. Dois sinais transmitidos em frequências que possuem separação maior que Δf são afetados de maneira diferente pelo canal [14]. A largura de banda de coerência pode ser definida de acordo com (2) [15].

$$\Delta f \approx \frac{1}{\alpha \tau_{rms}}, \quad (2)$$

em que τ_{rms} é o espalhamento de atraso eficaz (*RMS delay spread*), dado em segundos, e α é um fator que pode variar de acordo com a forma do perfil de atraso de potência (*power delay profile*) [15].

O valor de α pode ser igual a 50 quando a correlação entre frequências é maior que 90% ou igual a 5 quando a correlação entre frequências é maior que 50% [16]. Considerando $\tau_{rms} = 294.19$ ns para um ambiente industrial [11] e considerando $\alpha = 5$, $\Delta f \approx \frac{10^9}{5 \times 294.19} \approx 680$ kHz. O padrão IEEE 802.15.4 define 16 canais na banda de 2.4 GHz e a distância entre os canais é 5 MHz. Para esse cenário os canais são descorrelacionados em frequência. Experimentos descritos em [17] mostraram que trocar o canal de comunicação pode levar a uma diferença de até 30 dB na potência recebida, com os nós posicionados em locais fixos e em um ambiente de escritório. Essa diferença pode ser ainda maior em ambientes com muitos multipercursos.

D. Modelagem do Desvanecimento para Longos Períodos de Tempo

O canal sem fio pode ser modelado como estacionário no sentido amplo, por um período curto de tempo, apesar das movimentações ao redor do transmissor e do receptor. No entanto, as propriedades do canal podem se alterar significativamente em um período de poucas horas devido a mudanças ocorridas na topologia do ambiente. O movimento de objetos, metálicos ou não, pode causar modificações aleatórias no canal no decorrer do tempo, que não são levadas em consideração nas distribuições utilizadas para modelar o desvanecimento. Isso pode requerer novo cálculo dos parâmetros das distribuições, uma vez que esses parâmetros podem se tornar obsoletos no decorrer do tempo [18].

A Figura 1 mostra valores de RSSI adquiridos em um experimento realizado pelos autores, com dois rádios IEEE 802.15.4 operando na faixa de 2.4 GHz, em um ambiente industrial. No gráfico são mostrados valores de RSSI para um período de aproximadamente trinta minutos. Pode-se observar que uma modificação brusca nas características do canal ocorre em um determinado momento, o que indica, para um grande intervalo de tempo, que o canal se comporta de maneira não estacionária.

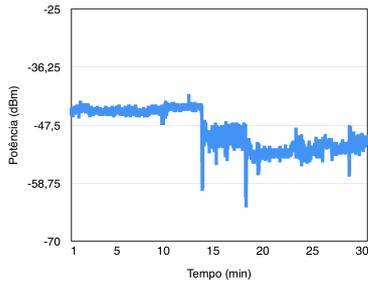


Fig. 1. Valores de RSSI obtidos durante cerca de uma hora.

Em [8] uma caracterização do canal em um ambiente industrial foi realizada para avaliar as características do canal em um longo período de tempo (20 horas). Os resultados mostraram que a distribuição de Rice apenas modela a potência recebida em pequenos períodos de tempo, em que o valor médio da potência recebida permanece constante. O movimento de uma grande estrutura metálica pode modificar o perfil de multipercurso relacionado ao conjunto de raios que permanecem invariantes por um longo período de tempo, o que modifica o valor médio da potência recebida, embora o transmissor e o receptor permaneçam estáticos. No experimento, a potência recebida variou ao redor de -55 dBm durante sete horas, e após esse período o valor médio mudou abruptamente para -46 dBm.

Agrawal *et al.* [18] propuseram o uso de uma distribuição composta para capturar tanto os efeitos de sombreamento, que causam modificações no valor médio de potência recebida no decorrer do tempo, quanto as alterações devido à atenuação por multipercurso. O modelo foi denominado Nakagami-m/Log-normal. O parâmetro da distribuição de Nakagami define o nível de atenuação e os parâmetros da distribuição log-normal definem o efeito do sombreamento.

A validação da distribuição foi realizada utilizando valores obtidos por meio de experimentos em ambientes industriais e considerando a função cumulativa de probabilidade das distribuições de probabilidade de Rice, Rayleigh, Nakagami, Log-normal e Nakagami-m/Log-normal. A validação foi baseada na cauda inferior, uma vez que essa região é responsável pela maior parte dos erros de transmissão. Verificou-se que as distribuições tradicionais para desvanecimento superestimam em até 10 vezes a ocorrência de desvanecimento profundo. A distribuição para sombreamento log-normal apresentou maior relação com os valores experimentais, no entanto para essa região a distribuição subestimou em 10 vezes a ocorrência de desvanecimento profundo. A distribuição Nakagami/Log-normal, por outro lado, conseguiu capturar os efeitos de desvanecimento e sombreamento para um longo período de tempo.

Wang *et al.* [19] aplicaram detecção de mudança Bayseana para modelar as modificações que ocorrem nas características do canal em um longo período de tempo. A detecção de mudança Bayseana identifica o momento em que a distribuição de probabilidade de um processo estocástico muda. Embora o trabalho descrito em [19] não tenha sido desenvolvido para ambientes industriais, ele pode ser aplicado para esse tipo de

ambiente.

A distribuição utilizada para modelar o desvanecimento por multipercurso foi a Nakagami-m. Para validação, foi gerada uma sequência de valores com distribuição Nakagami-m e foi realizada uma divisão manual em quatro segmentos. Cada segmento apresentou valores diferentes para o parâmetro da distribuição. Experimentos foram realizados e os segmentos nos valores obtidos foram detectados para o cálculo do parâmetro da distribuição de Nakagami em cada segmento.

Embora os trabalhos de [18] e [19] tenham proposto modelos que capturam as modificações nas características dos canais em um longo período de tempo, os modelos são adequados apenas para a avaliação analítica do desempenho de RSSFs, uma vez que ao gerar valores aleatórios seguindo as distribuições propostas, os valores não correspondem ao observado na prática, embora a Função Cumulativa de Probabilidade (FCP) do modelo apresente boa aderência à FCP obtida por meio de dados experimentais.

III. MODELO DE SIMULAÇÃO PARA O DESVANECIMENTO EM LONGOS PERÍODOS DE TEMPO

Para permitir a simulação de protocolos de RSSFs em ambientes industriais que utilizam múltiplos canais é necessária a construção de um modelo que permita capturar as características dos canais por um longo período de tempo e que permita a simulação de múltiplos canais em simultâneo, com cada canal apresentando características distintas.

Para modelar o efeito do desvanecimento no canal por um longo período de tempo utilizou-se uma abordagem baseada em uma cadeia de Markov de dois estados. A Figura 2 mostra a cadeia de Markov proposta neste trabalho.

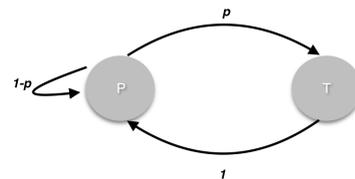


Fig. 2. Cadeia de Markov de dois estados.

Enquanto a cadeia permanecer no estado P as características do canal permanecem inalteradas. Os valores de potência recebida por um nó são gerados a partir de alguma distribuição de probabilidade, como Rice ou Nakagami-m. Considera-se também o desvanecimento em larga escala, obtido por meio da utilização do modelo log-distância, e o sombreamento log-normal. A transição para o estado T ocorre com probabilidade p . Quando isso ocorre, os parâmetros dos modelos do canal são modificados, de modo que há uma mudança brusca nas características do canal. Ao realizar a troca dos parâmetros do canal, a cadeia retorna para o estado P com probabilidade um.

O valor de p define a frequência com que mudanças nas características do canal ocorrem. Dessa forma, é possível simular ambientes que permanecem inalterados por muito tempo e ambientes que apresentam modificações na topologia com maior frequência.

O primeiro passo para a redefinição das características do canal, quando a cadeia de Markov atinge o estado T , é a definição da potência de recepção média ($P_R(d, t)$ dBm) para uma distância d e no tempo t , de acordo com

$$P_R(d, t) \text{ dBm} = P_T - L(d). \quad (3)$$

Em que P_T é a potência de transmissão. $L(d)$ possui uma parte determinística, relacionada apenas com a distância entre transmissor e receptor, e uma parte aleatória, referente ao sombreamento log-normal, de acordo com a Equação 1. Dessa forma, considerando uma mesma distância entre transmissor e receptor, o valor de $P_R(d, t)$ dBm apresentará uma variação aleatória referente a X_σ , que pode aumentar ou diminuir o valor médio de potência recebida.

Após a definição do valor de potência média em dBm, o valor correspondente de potência em mW é utilizado como parâmetro para a distribuição de Rice, que é amostrada para definir o valor de potência recebida em cada instante.

Para modelar as variações no nível de atenuação em pequena escala, a variância da potência recebida também muda sempre que ocorrem mudanças nas características dos canais. Esse tipo de comportamento foi observado tanto em experimentos realizados pelos autores como em outros trabalhos [18]. Dessa forma, o valor do desvio padrão $\sigma(t)$ da distribuição de Rice é amostrado a partir de uma distribuição uniforme sempre que a cadeia de Markov atinge o estado T .

A Equação 4 mostra a distribuição de probabilidade que modela o valor de potência recebida em cada instante, considerando o valor da potência média P_R e da variância $\sigma(t)$ no tempo t .

$$p_r(x) = \frac{x}{\sigma(t)^2} e^{-\frac{(x+P_R)^2}{2\sigma(t)^2}} I_0\left(\frac{P_R \cdot x}{\sigma(t)^2}\right). \quad (4)$$

Em que $P_R = 10^{\frac{P_R(d, t) \text{ dBm}}{10}}$ é a potência média em mW para uma distância d e no tempo t .

IV. RESULTADOS

Para testar o modelo de simulação, inicialmente foram gerados valores aleatórios utilizando uma aplicação em C++ que realiza a simulação de valores de potência recebidos em um receptor, com distância $d = 20$ m e considerando os valores de $n = 1,69$, $d_0 = 15$ m, $L(d_0) = 80,48$ dB e $\sigma = 8,13$ dB, que são aplicados no cálculo do desvanecimento em larga escala e do sombreamento, utilizando o modelo de sombreamento log-normal. Esses valores foram obtidos a partir de experimentos em ambiente industrial descritos em [2]. Na figura são mostradas 10.000 amostras.

O valor de $\sigma(t)$ foi amostrado partir de uma distribuição uniforme entre 0 e 1,5. O valor de p foi definido em 0,1%. Por exemplo, ao considerar um intervalo de cinco segundos entre cada amostragem da cadeia de Markov, essa probabilidade representa uma modificação das características dos canais a cada 5000 segundos (1,4 horas), em média.

Pode-se observar que o modelo é capaz de capturar o comportamento do canal em longos períodos de tempo, considerando o comportamento não estacionário do canal sem fio

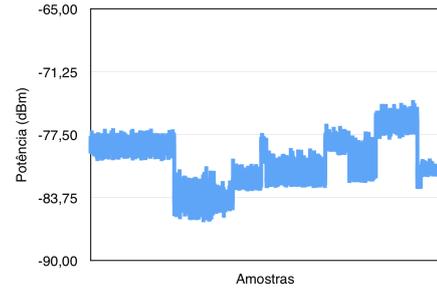


Fig. 3. Valores de RSSI obtidos por meio de simulação, utilizando o modelo proposto.

em ambientes industriais. Os resultados obtidos pelo modelo são compatíveis com resultados de experimentos realizados em ambiente industrial e descritos em artigos que fizeram análise do comportamento do canal em longos períodos de tempo [8] [18] [19].

A. Integração do modelo com o Castalia

Após a validação inicial do modelo, realizou-se a integração com o simulador Castalia, que implementa a camada de acesso ao meio do padrão IEEE 802.15.4. Na camada física, são usados parâmetros de rádios IEEE 802.15.4 reais e um modelo de camada física baseado no modelo de sombreamento log-normal. O simulador também permite variação temporal na potência recebida pelos nós, a partir de amostras que simulam o comportamento de um canal sujeito a atenuação por multipercursos. No entanto, o modelo implementado pelo simulador considera que o canal é estacionário; ou seja, suas características permanecem inalteradas no decorrer do tempo.

Para realizar a integração, foram realizadas modificações na classe *WirelessChannel*, para capturar as variações temporais nas características dos canais em um longo período de tempo. Após a integração do modelo, foi realizada uma simulação considerando um nó transmissor e um nó receptor. Os parâmetros da simulação são detalhados na Tabela I. Os parâmetros para o modelo log-distância e sombreamento log-normal são os mesmos que foram utilizados na Seção IV.

TABELA I
PARÂMETROS UTILIZADOS NA SIMULAÇÃO.

Parâmetros da Simulação	
Distância entre os nós	70 metros
Camada física e MAC	IEEE 802.15.4
Tempo de simulação	18000 s (5 horas)
Potência de transmissão	0 dBm
Taxa de transmissão de pacotes	0,2 pacotes/s
Probabilidade de transição (p)	0,1%

A Figura 4 mostra a potência recebida no nó durante as cinco horas de simulação. É possível observar os momentos em que ocorrem variações nas características dos canais, tanto com relação ao valor médio de potência, como com relação à severidade da atenuação por multipercursos. A Figura 5 mostra a Taxa de Recepção de Pacotes (TRP) durante as cinco horas. É possível observar uma correlação entre a TRP com as características do canal em cada momento. Esse tipo

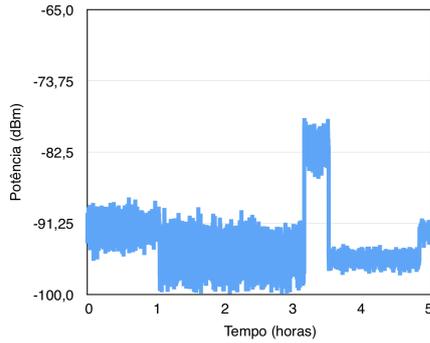


Fig. 4. Potência recebida durante a simulação.

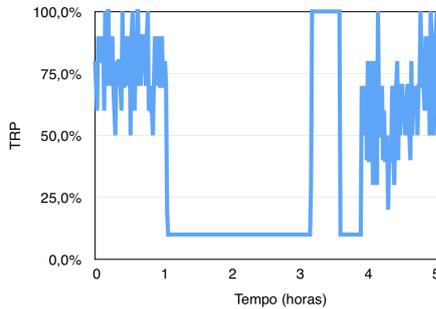


Fig. 5. Taxa de recepção de pacotes durante a simulação.

de comportamento é realista em ambientes dinâmicos, que provocam variações na qualidade dos canais no decorrer do tempo, como é o caso de ambientes industriais.

Como os canais em ambientes industriais são descorrelacionados em frequência, para simular protocolos que utilizam múltiplos canais pode-se utilizar uma instância do modelo para cada canal disponível para comunicação. Nesse cenário, realizar troca de canais pode melhorar a qualidade de serviço da rede, uma vez que a rede se torna capaz de se adaptar às variações de qualidade de canal. Para permitir a avaliação de protocolos multicanaís com o Castalia se faz necessário realizar modificações na interface entre o módulo que implementa o modelo do canal sem fio com os módulos que implementam os protocolos de camadas superiores.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um modelo realista para o canal sem fio em RSSFs industriais. O modelo considera as variações temporais na qualidade do canal, e leva em conta suas características não estacionárias. A partir do modelo, é possível simular o comportamento de protocolos de alocação dinâmica de canal. Além disso, foi discutida uma arquitetura para simulação de protocolos que utilizam múltiplos canais, uma vez que os canais apresentam características distintas em cada momento. Os resultados mostraram que o modelo permitiu capturar a dinâmica do canal sem fio em ambientes industriais. Para trabalhos futuros, pretende-se desenvolver e avaliar protocolos de alocação dinâmica de canal para RSSFs industriais.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às seguintes instituições: Instituto de Estudos Avançados em Comunicações (Iecom), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Copele e Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

REFERÊNCIAS

- [1] R. D. Gomes, M. S. Alencar, I. E. Fonseca and A. C. Lima Filho. "Desafios de Redes de Sensores sem Fio Industriais". *Revista de Tecnologia da Informação e Comunicação*, vol. 4, pp. 1–12, 2014.
- [2] E. Tanghe, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, H. Capoen, K. V. 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, pp. 2740–2751, 2008.
- [3] O. D. Incel. "A survey on multi-channel communication in wireless sensor networks". *Computer Networks*, vol. 55, no. 13, pp. 3081–3099, 2011.
- [4] P. Huang, L. Xiao, S. Soltani, M. Mutka and N. Xi. "The Evolution of MAC Protocols in Wireless Sensor Networks: A Survey". *Communications Surveys Tutorials, IEEE*, vol. 15, no. 1, pp. 101–120, First 2013.
- [5] 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.
- [6] R. D. Gomes, G. B. Rocha, A. C. Lima Filho, I. E. Fonseca and M. S. Alencar. "Distributed Approach for Channel Quality Estimation Using Dedicated Nodes in Industrial WSN". In *Proceedings of IEEE 25th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, pp. 1–6, 2014.
- [7] R. Souza and P. Minet. "Multichannel assignment protocols in wireless sensor networks: A comprehensive survey". *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 16, pp. 2–21, 2015.
- [8] P. Agrawal, A. Ahlen, T. Olofsson and M. Gidlund. "Characterization of long term channel variations in industrial wireless sensor networks". In *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp. 1–6, June 2014.
- [9] T. Chamberlains. *Learning Omnet++*. First Edition. Packt Publishing, 2013.
- [10] T. S. Rappaport. *Comunicações sem Fio - Princípios e Práticas*. Segunda Edição. Pearson, 2009.
- [11] P. Stenumgaard, J. Chilo, P. Ferrer-Coll and P. Angskog. "Challenges and conditions for wireless machine-to-machine communications in industrial environments". *IEEE Communications Magazine*, vol. 51, no. 6, pp. 187–192, June 2013.
- [12] J. Ferrer-Coll, P. Angskog, J. Chilo and P. Stenumgaard. "Characterization of highly absorbent and highly reflective radio wave propagation environments in industrial applications". *IET Communications*, vol. 6, pp. 2404–2412, 2012.
- [13] K. A. Remley, G. Koepke, C. Holloway, Camell and G. D. "Measurements in Harsh RF Propagation Environments to Support Performance Evaluation of Wireless Sensor Networks". *Sensor Review*, vol. 29, pp. 211–222, 2009.
- [14] J. Proakis. *Digital Communications*. Third Edition. McGraw-Hill, 1995.
- [15] M. Varela and M. Sanchez. "RMS delay and coherence bandwidth measurements in indoor radio channels in the UHF band". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 50, pp. 515–525, 2001.
- [16] H. MacLeod, C. Loadman and Z. Chen. "Experimental studies of the 2.4-GHz ISM wireless indoor channel". In *Proceedings of the 3rd Annual Communication Networks and Services Research Conference*, pp. 63–68, 2005.
- [17] D. M. Amzucu, H. Li and E. Fledderus. "Indoor Radio Propagation and Interference in 2.4 GHz Wireless Sensor Networks: Measurements and Analysis". *Wireless Personal Communications*, vol. 76, pp. 245–269, 2014.
- [18] P. Agrawal, A. Ahlén, T. Olofsson and M. Gidlund. "Long Term Channel Characterization for Energy Efficient Transmission in Industrial Environments". *Communications, IEEE Transactions on*, vol. 62, no. 8, pp. 3004–3014, Aug 2014.
- [19] N.-C. Wang and K. Yao. "Characterizing fading channel under abrupt temporal variations". In *Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2013 IEEE International Conference on*, pp. 5056–5060, May 2013.