

Análise Experimental da Interferência de Comunicação de redes IEEE 802.11n sobre redes IEEE 802.15.4

Rogério Antônio Casagrande^{1,3}, Jonatas Negri², Alan Cechinel², Carlos Montez¹, Ricardo Moraes^{1,2}

Resumo— Este artigo apresenta uma análise de interferência de uma rede IEEE 802.11n sobre uma rede IEEE 802.15.4 operando na faixa de frequência de 2.4 GHz. Foram realizados testes experimentais em um cenário com dez nodos IEEE 802.15.4 e quatro estações IEEE 802.11n, operando em canais de comunicação sobrepostos e não sobrepostos. Os experimentos foram conduzidos alterando-se a distância entre o AP da rede IEEE 802.11 e o coordenador da rede IEEE 802.15.4, canais de comunicação e a taxa de ocupação da rede. Os resultados demonstraram que todas as variáveis analisadas interferem drasticamente na eficiência das redes IEEE 802.15.4.

Palavras-Chave— *RSSF, WiFi, Interferência.*

Abstract— This paper presents an interference analysis of IEEE 802.11n network over an IEEE 802.15.4 network operating in 2.4 GHz ISM band. Experimental tests were performed in a scenario composed of ten IEEE 802.15.4 nodes and four IEEE 802.11n stations operating in overlapping and non-overlapping communication channels. The experiments were conducted by changing distances between IEEE 802.11 AP and IEEE 802.15.4 coordinator, communication channels and the network load rate. Experimental results have shown that all analyzed variables interfere drastically in the efficiency of IEEE 802.15.4 networks.

Keywords— *WSN, WiFi, Interference*

I. INTRODUÇÃO

Em diversos países a utilização do espectro de rádio é regida através de órgãos reguladores, os quais definem a alocação de largura de banda para a radiodifusão (ex. TV e rádio digital), operadores de telecomunicações, forças armadas e demais usos. Diante de perspectivas de uso individual e específico de canais de radiofrequência (RF), essas organizações reservam algumas faixas de frequência para serem usadas de forma mais flexível. As mais comumente utilizadas são as frequências entre 902 MHz a 5925 GHz, que normalmente são divididas em três segmentos de espectro denominados de bandas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*): 902 MHz a 928 MHz, 2.400 MHz a 2.483,5 MHz e 5.725 MHz a 5.850 MHz [1]. O uso de bandas ISMs é regulado segundo vários acordos e permissões que dependem da região e/ou país de utilização.

Nos últimos anos houve um crescimento no uso destas faixas de frequência para diversos dispositivos de baixo consumo e curto alcance, tais como telefones sem fio, alarmes veiculares, enlaces ponto-a-ponto privados, dispositivos Bluetooth, micro-ondas e redes locais sem fio. Por conseguinte, a principal desvantagem do uso de bandas ISM é a interferência gerada pelos vários dispositivos que as utilizam em um mesmo ambiente. Dispositivos que operam nesta faixa

de frequência usam diferentes padrões e protocolos e cada um deles propõe formas diferentes de mitigar interferência. Os principais desafios para se resolver esses problemas estão relacionados com as diferenças existentes na camada física dos dispositivos [2].

As redes IEEE 802.15.4 estão se tornando um padrão *de facto* em nodos de Redes de Sensores sem Fio (RSSF) e também tem se tornado populares por terem suas camadas física (PHY) e de controle de acesso ao meio (MAC) utilizadas como base para outras importantes redes, tais como ZigBee e os padrões industriais ISA-100.11a e WirelessHART. Tipicamente utilizam a faixa de frequência de 2.4 GHz que atualmente é amplamente ocupada por outras redes, como por exemplo Bluetooth e WiFi.

Existem muitos fatores que afetam o nível de interferência, a destacar: a distância entre os dispositivos, o tráfego nas redes, a potência dos dispositivos, a taxa de dados, além dos diferentes tipos de informação que podem ter diferentes níveis de sensibilidade à interferência [3]. Neste trabalho analisa-se a interferência das redes IEEE 802.11n sobre redes IEEE 802.15.4. A principal motivação deste trabalho vem do fato que as redes IEEE 802.11n são as mais utilizadas atualmente e, principalmente, porque há poucos experimentos na literatura avaliando o impacto causado nas redes IEEE 802.15.4 [4-6] e nenhum deles segue as recomendações do padrão IEEE 802.15.2 [3]. Os trabalhos encontrados na literatura focam principalmente na análise do impacto dos padrões IEEE 802.11b e IEEE 802.11g sobre as redes IEEE 802.15.4 [7-10]. Além disso, na maioria das vezes somente um dos aspectos que afetam o nível de interferência é considerado. Por exemplo, Garroppo et al. [11] avaliaram as interferências mútuas das tecnologias WiFi, ZigBee e Bluetooth, porém, com os coordenadores de cada rede posicionados com distâncias fixas, apenas alternando a posição entre transmissores e receptores em várias possibilidades de interação.

A principal contribuição deste trabalho está relacionada com uma avaliação experimental, considerando o impacto da interferência nas dimensões propostas pelo padrão IEEE 802.15.2 [3], ou seja, em um cenário que varia a distância entre os coordenadores das duas redes, o canal utilizado e a taxa de ocupação do canal pelas redes IEEE 802.11n.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados, a Seção 3 descreve o cenário dos testes e a Seção 4 o resultado dos experimentos. A Seção 5 apresenta as conclusões e direcionamentos para trabalhos futuros.

¹PPGEAS – Pós-Graduação em Engenharia de Automação e Sistemas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, Brasil.

²DEC - Departamento de Engenharia de Computação, Universidade Federal de Santa Catarina, Araranguá-SC, Brasil.

³DCC- Departamento de Ciência da Computação, UNESC, Criciúma-SC, Brasil.
Email: roc@unesc.net, jonatasgrandini@hotmail.com, cechinel.a.k@gmail.com, {montez, ricardo.moraes}@ufsc.br

II. TRABALHOS RELACIONADOS

Garroppo et al. [11] realizaram testes de coexistência entre redes IEEE 802.15.4 (ZigBee), IEEE 802.15.1 (Bluetooth) e IEEE 802.11 (WiFi), cujos objetivos foram além de apenas caracterizar a interferência mútua entre pares de tecnologias compartilhando o mesmo espectro, mas também a coexistência entre as três tecnologias ativas no mesmo tempo e espaço, sendo um aspecto até então não evidenciado na literatura. Os autores demonstraram que o Bluetooth e o ZigBee são fortemente afetados pela presença de comunicação WiFi, mas a recíproca não é verdadeira. O cenário de pior caso ocorre quando os transmissores Bluetooth e ZigBee ficam próximos do receptor WiFi. Outras conclusões importantes desse trabalho é que o ZigBee é muito menos suscetível à posição do transmissor WiFi do que o Bluetooth e que, as tecnologias Bluetooth e ZigBee não possuem problemas significativos de coexistência.

Polepalli et al. [4] avaliaram a operação da rede IEEE 802.15.4 sob interferência da rede IEEE 802.11n, com a sobreposição dos canais de controle e de extensão. Os experimentos foram realizados em ambiente fechado com 15 nodos enviando pacotes de 112 bytes a uma taxa de 1 pacote por segundo, sendo utilizados como fonte de interferência uma rede infraestruturada com somente dois nós IEEE 802.11n, simulando um tráfego UDP de 63 KB entre as estações. As taxas de dados variaram entre 1 a 60 Mbps, analisando as seguintes métricas: taxa de perda média e latência média dos pacotes entregues com sucesso. O canal utilizado na rede IEEE 802.15.4 estava situado no meio do canal de extensão. Os autores observaram que o impacto da rede IEEE 802.15.4 sobre a operação da rede IEEE 802.11n para taxas de até 20 Mbps foram insignificantes, porém para taxas acima deste limiar, houve uma disputa entre as redes pelo canal de extensão, ocasionando perdas significativas no tráfego WiFi. Concluem que de fato o canal de extensão poderia não ser utilizado em baixas taxas de dados. Já os testes de operação da rede IEEE 802.11n interferindo sobre a rede IEEE 802.15.4 apresentaram um aumento significativo na taxa de perda (30-40%) e latência (160-180 ms) na medida em que a carga de dados aumentava, inviabilizando o funcionamento de muitas aplicações de RSSF. Com relação a sobreposição de canais, os autores concluíram que o impacto na rede IEEE 802.15.4 é muito mais severo quando existe a sobreposição com o canal de controle da rede IEEE 802.11n do que com o canal de extensão.

Cheng Leong et al. [5] utilizaram 2 nodos IEEE 802.15.4 e duas estações IEEE 802.11b/g/n para testar a performance da primeira rede sob interferência da segunda, analisando além das métricas LQI (*Link Quality Indicator*), BER (*Bit Error Rate*), PRR (*Packet Reception Rate*) e CCA (*Clear Channel Assessment*), uma nova métrica proposta e denominada PRRCCA – (*Packet Reception Rate with Clear Channel Assessment*). Os resultados mostram que as redes interferiram no funcionamento uma da outra e que a distância entre os nodos IEEE 802.15.4 e a fonte de interferência são fatores-chave para analisar a performance das redes sob interferência. Nesse trabalho os nodos receptores foram posicionados em distâncias de 1, 10 e 19 metros sem o deslocamento da fonte de interferência, atuando em função da frequência e da distância. Polepalli et al. [4] observaram a interferência mútua entre redes IEEE 802.11n e IEEE 802.15.4 variando a taxa de dados com sobreposição de canal, demonstrando a importância da taxa de ocupação do canal na análise de interferência.

Constatou-se na revisão da literatura, a importância de se avaliar a interferência em várias dimensões, sejam elas em

função do tempo, espaço ou a frequência, sendo que estas métricas não são observadas em um experimento único nos trabalhos encontrados. Petrova et al. [12] e Bertocco et al. [13] analisaram a interferência em função da frequência; Angrisani et al. [7] e Torabi et al. [14] em função da distância; Pollin et al. [8] e Polepalli et al. [4] em função do tempo. Diferentemente dos trabalhos encontrados na literatura, a análise experimental apresentada neste artigo, avalia a interferência nas dimensões propostas pelo padrão IEEE 802.15.2 [3], em um cenário que varia a distância entre os coordenadores das duas redes, o canal utilizado e a taxa de ocupação pelas redes IEEE 802.11n.

III. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

O experimento foi realizado em um laboratório livre de interferências de outras redes para evitar distorções nos dados provenientes de outras fontes. Para tanto, varreduras frequentes, utilizando um analisador de tráfego, foram realizadas para garantir a inexistência de outras redes sem fio.

A. Cenário de Testes

Foram estabelecidos os seguintes cenários de testes: a) Rede IEEE 802.15.4 sem a presença de redes de interferência; b) Rede IEEE 802.15.4 operando em canal sobreposto com uma rede IEEE 802.11n; c) Rede IEEE 802.15.4 operando em canal não sobreposto com uma rede IEEE 802.11n. Foi implementada uma rede padrão IEEE 802.15.4 com 10 nodos (z1-z10) transmitindo dados a uma taxa máxima até um nodo coordenador (ZC). Os nodos foram organizados em topologia estrela com distância fixa entre os nodos e o coordenador ($R = 1$ metro), e uma rede padrão IEEE 802.11n infraestruturada, com quatro nós e um *Access Point* (AP) como nó central a uma distância ($dw = 1$ metro). A Figura 1 ilustra o cenário construído.

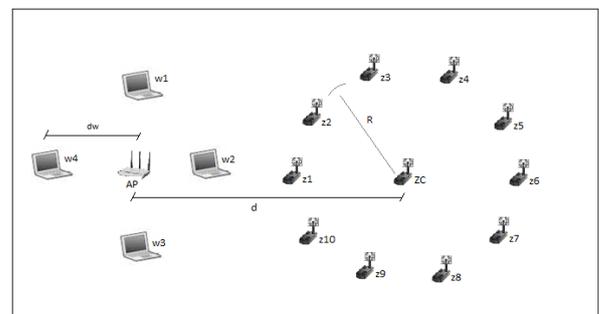


Fig. 1. Cenário de Testes.

Na inicialização da rede, o coordenador envia uma mensagem a todos os nodos indicando o início do monitoramento das mensagens recebidas. A partir desta mensagem a rede de interferência é ativada e os nodos iniciam o envio das mensagens. Os nodos atuaram no modo de saturação onde as mensagens foram enviadas em intervalos de tempo de 250 ms com *payload* de 100 bytes até um máximo de 500 pacotes por nodo, totalizando em cada experimento 5000 pacotes, enviados a uma taxa média de 42,5 Kbps. Para eliminar os problemas de perdas e atrasos devidos a oscilações das cargas das baterias dos nodos, estes foram alimentados por uma fonte externa e contínua de +5V. O nodo coordenador foi ligado a um notebook via porta USB para coleta dos dados. Os dispositivos XBee foram conectados a uma plataforma de prototipação de código aberto Arduino UNO R3 com placa microcontroladora baseada no ATmega328P com 32 KB de memória flash, sendo que para o coordenador da rede foi

utilizado o Arduino MEGA2560 com placa microcontroladora ATmega2560 com 256 KB de memória flash. Esta opção foi determinada após vários testes, variando a quantidade de nodos entre 1 e 10 para determinar o conjunto ideal de parametrizações que possibilitassem a recepção e processamento dos pacotes além da execução da aplicação pelo nodo coordenador para o cenário proposto. Foram observadas limitações dos dispositivos XBee, que em sua especificação oferece comunicação serial a 115200 *baud*, mas, em testes realizados com apenas 1 nodo e o coordenador não foi possível obter taxa maior que 57600 *baud* sem perda de dados. A Tabela I apresenta os parâmetros utilizados na rede IEEE 802.15.4.

TABELA I. PARÂMETROS DA REDE 802.15.4

Dispositivo	Digi XBee Series 1
Frequência	2,4 GHz
Modulação	O-QPSK
Taxa Transmissão	250 kbps
Potência	0 dBm
Canais	22 (centro em 2.460 MHz) 26 (centro em 2.480 MHz)
Sensibilidade	-85 dBm
Taxa de Dados	250 ms
Qtidade de Dados	100 bytes
Tamanho do Pacote	133 bytes
Modo	Non-beaconing
ACK	Ativado
Sleep Mode	Desativado

Como fonte de interferência foi implementada uma rede padrão IEEE 802.11n injetando um tráfego UDP de 1500 bytes com taxas de 10, 20 e 30 Mbps. Esta taxa foi dividida em dois fluxos de dados entre as estações w1, w3 e w2, w4 (Figura 1). Este tráfego foi gerado utilizando a ferramenta de simulação iPerf¹. A Tabela II apresenta os parâmetros definidos para a rede IEEE 802.11n.

TABELA II. PARÂMETROS DA REDE 802.11

Dispositivo	Draytek Vigor 2130vn
Frequência	2,4 GHz
Modulação	MIMO-OFDM
Largura do Canal	20/40MHz
Taxa de Dados	300 Mbps
Sensibilidade	-66 dBm
Canal	11 (centro em 2.462 MHz)
Tipo de Pacote	UDP
Tamanho do Pacote	1500 bytes

B. Métricas Analisadas

Nos experimentos foram avaliadas a taxa de perda de pacotes, o atraso fim-a-fim e a potência do sinal recebido RSSI (*Received Signal Strength Indication*). Estas métricas foram obtidas a partir do nodo coordenador da rede IEEE 802.15.4, sendo a taxa de perda média definida como a porcentagem de pacotes transmitidos que não chegam ao coordenador, devido principalmente, ao atraso excessivo, colisões e congestionamento. O atraso fim-a-fim foi obtido a partir da média de tempo entre o envio de uma mensagem do nodo para o coordenador e a chegada do seu reconhecimento (ACK). Para

obter esta medida, a partir de cada nodo foi enviada uma mensagem inicial para o coordenador para obter o primeiro tempo de envio/recepção, calculando assim o atraso. Para cada nova mensagem foi enviado junto ao *payload* o atraso fim-a-fim do pacote anterior, sendo ao final obtida a média do atraso de todos os pacotes no coordenador. A potência média do sinal recebido foi obtida a partir de uma função disponível no próprio dispositivo XBee do coordenador. Foi também registrada a perda por nodo com o objetivo de verificar o comportamento dos mesmos em relação à distância do AP.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Em cada cenário proposto, os testes foram repetidos 10 vezes para cada distância (d) entre o AP e o nodo coordenador (1, 2, 4 e 8m) e também para cada carga de tráfego WiFi entre as estações (10, 20 e 30 Mbps). Os dados foram coletados a partir do coordenador da rede IEEE 802.15.4 após cada repetição.

A. Redes IEEE 802.15.4 operando em ambiente livre de interferência

Inicialmente foi implementada uma rede padrão IEEE 802.15.4 sem a presença de outras redes, executando-se os testes para se obter um referencial de comportamento desta rede em um ambiente livre de interferência. Os resultados obtidos mostram que a rede IEEE 802.15.4 sem a presença de redes WiFi, apresentou uma taxa de perda média de pacotes de 12,07% com desvio padrão de 0,038; um atraso médio fim-a-fim de 4,76 ms com desvio padrão de 0,2375 e potência do sinal recebido média de -51,19 dBm com desvio padrão de 0,087. Estes valores de desvio padrão corroboram com a metodologia adotada e comprovam que 10 repetições são suficientes para a análise de cada cenário proposto, pois, o erro obtido com este número de repetições é relativamente baixo. Por exemplo, para um intervalo de confiança de 95%, o erro para a taxa de perda média de pacotes no ambiente livre de interferências é de $\pm 0,0235\%$ e; para o atraso médio fim-a-fim o erro é de $\pm 0,147$ ms. Valores desta mesma ordem foram obtidos nos demais cenários e, portanto, não farão parte da discussão apresentada.

B. Redes IEEE 802.15.4 operando em canal sobreposto com redes IEEE 802.11n

Neste cenário foi introduzida a rede WiFi posicionando o AP nas distâncias estabelecidas com a injeção de tráfego UDP entre as estações, avaliando-se desta forma a rede IEEE 802.15.4 sob interferência. Os canais utilizados foram o canal 22 (2460MHz) nos nodos IEEE 802.15.4 e o canal 11 (2462 MHz) nas estações IEEE 802.11n. A Figura 2 demonstra que o funcionamento de uma rede IEEE 802.15.4 é altamente influenciado por uma rede WiFi operando na mesma área de cobertura e com canal de comunicação sobreposto. Observa-se que a taxa de perda de pacotes diminui na medida em que a distância entre o AP e o coordenador IEEE 802.15.4 aumenta, além disso, esta taxa também aumenta na medida que a rede WiFi gera mais tráfego. Portanto, a perda de pacotes está diretamente relacionada com a distância da rede de interferência bem como a ocupação do canal WiFi.

Como os nodos foram posicionados de forma equidistante do coordenador, foi analisado o comportamento do nodo da rede IEEE 802.15.4 posicionado mais próximo do AP da rede WiFi (nodo z1) e do nodo mais distante (z6), conforme a Figura 3.

¹ <http://www.iperfwindows.com/>

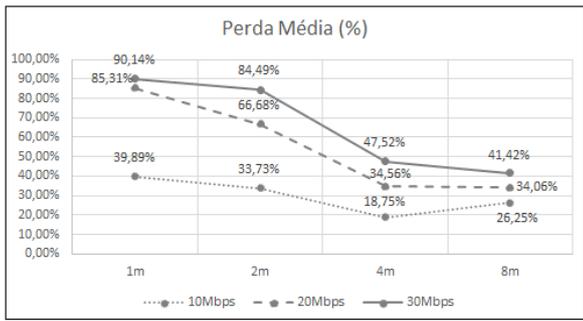


Fig. 2 Taxa de Perda de Pacotes.

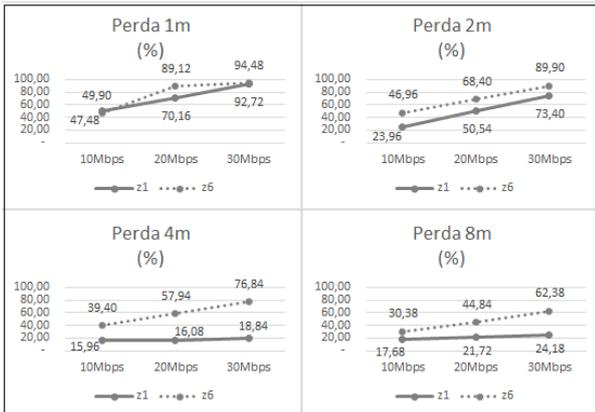


Fig. 3 Taxa de Perda nodos z1 e z6.

Pode-se constatar que o nodo mais distante do AP sofre maior influência da rede de interferência, e isto se explica porque o nodo z6 estando mais distante do AP demora mais tempo para detectar que uma transmissão WiFi está em curso e faz mais tentativas de transmissão com insucesso, pois quanto maior a distância maior o tempo de propagação, então pode-se concluir que, ao contrário do coordenador, os nodos mais próximos das fontes de interferência sofrem menos impacto no envio de pacotes. Na figura 4 pode-se verificar o comportamento da rede em relação ao atraso fim-a-fim. Atrasos maiores foram observados com a proximidade do AP e com o aumento do tráfego WiFi. Considerando-se o atraso fim-a-fim médio da rede IEEE 802.15.4 sem interferência WiFi de 4,76 ms, a proximidade do AP e com taxas de até 30 Mbps nas estações WiFi pode-se observar um aumento significativo do atraso (8,10 ms).

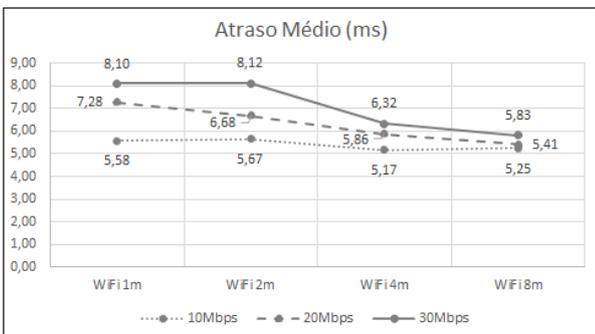


Fig. 4 Atraso fim-a-fim.

A Figura 5 apresenta os resultados relativos à potência do sinal recebido (RSSI), demonstrando que a qualidade do sinal diminuiu com o aumento da distância e a variação da taxa de ocupação do canal. Considerando a potência média do sinal da rede IEEE 802.15.4 sem a interferência WiFi de -51,19 dBm,

pode-se observar uma redução gradativa na potência do sinal recebido com a proximidade do AP e com taxas de até 30 Mbps nas estações WiFi.

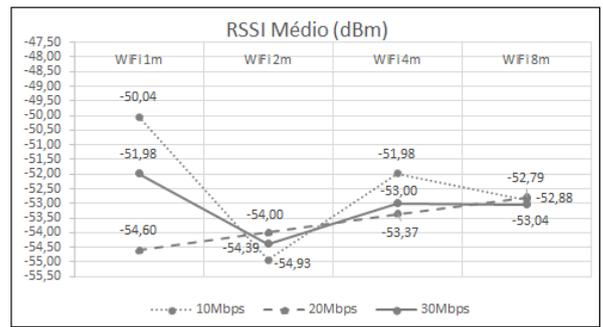


Fig. 5 Potência do Sinal Recebido (RSSI).

C. Redes IEEE 802.15.4 operando em canal não sobreposto com rede IEEE 802.11n

Para este experimento foi alterado o canal da rede IEEE 802.15.4 para uma faixa não sobreposta (2480 MHz), no canal 26. Nesta análise foi utilizado o pior cenário de interferência, ou seja, posicionando-se o AP a 1 metro do coordenador da rede IEEE 802.15.4 e com tráfego de 30 Mbps no conjunto de estações WiFi. A Tabela III apresenta os resultados considerando canais não sobrepostos em comparação ao cenário com canais sobrepostos e ao cenário sem interferência WiFi.

TABELA III. CANAIS SOBREPOSTOS E NÃO SOBREPOSTOS

Canal	Perda Média (%)	Atraso Médio (ms)	RSSI Médio (dBm)
22	90,14	8,10	-51,98
26	12,16	4,74	-49,44
Sem WiFi	12,07	4,76	-51,19

É possível constatar que a utilização de canais sem sobreposição apresentou uma melhoria significativa na eficiência da rede IEEE 802.15.4, mesmo no pior cenário de interferência WiFi analisado, com a utilização de canais não sobrepostos os resultados se assemelham ao cenário sem interferência WiFi.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstrou em experimentos práticos o impacto da interferência das redes IEEE 802.11n sobre as redes IEEE 802.15.4, considerando a distância, frequência e taxa de ocupação do canal. Foi verificada a variação na perda de pacotes, no atraso fim-a-fim e na potência do sinal recebido no coordenador da rede IEEE 802.15.4 em vários cenários. Constatou-se que a distância e a taxa de ocupação do canal são responsáveis pela degradação da rede IEEE 802.15.4, principalmente quando se usa canais sobrepostos pelos dois padrões. Os experimentos demonstraram que quanto mais próximo o coordenador da rede IEEE 802.15.4 estiver da fonte de interferência WiFi, maior será a perda de pacotes e o atraso fim-a-fim e menor a potência do sinal recebido. Observou-se que com o aumento da taxa de ocupação do canal pelo tráfego de dados das estações WiFi, a taxa média de perda de pacotes e o atraso fim-a-fim aumentaram significativamente, além da redução na potência do sinal recebido RSSI pelo coordenador IEEE 802.15.4.

Com a alteração do canal WiFi para uma faixa não sobreposta, os resultados evidenciaram que as redes WiFi não interferiram no tráfego da rede IEEE 802.15.4, pois, os resultados obtidos foram praticamente os mesmos do cenário sem interferência WiFi. No entanto, com o crescimento exponencial das redes WiFi, os APs são configurados ou se autoconfiguram para utilizar qualquer um dos 14 canais disponíveis, restando assim pouco ou nenhum espaço para outras redes sem sobreposição de canais. Diante disto, as soluções mais promissoras são aquelas que previnem a sobreposição de canais como por exemplo, utilizando técnicas de alocação dinâmica de canal. Por fim, observou-se os nodos individualmente, constatando-se que os nodos mais próximos do AP (z1) sofreram menos interferência que nodos mais distantes (z6) e, portanto, obtiveram melhores taxas de sucesso no envio de pacotes.

Mecanismos de coexistência, mitigação e análises de interferência entre tecnologias de redes sem fio têm sido extensivamente realizados, buscando a melhor eficiência das redes em ambientes heterogêneos. Este trabalho contribuiu apresentando resultados significativos nas três dimensões e serve como base para futuros trabalhos sobre interferência entre os demais padrões, como por exemplo IEEE 802.11ac. RSSFs estão cada vez mais presentes em diversas áreas de aplicação, e as interferências podem inviabilizar projetos que necessitam de respostas em tempo real e qualidade de serviço, como por exemplo na área da saúde. Diversos trabalhos encontrados na literatura analisaram um aspecto ou outro neste contexto de interferência e coexistência entre pares de padrões utilizando simuladores ou experimentos reais, mas ao que se observou não abordaram o conjunto de variáveis aqui apresentados em um experimento prático. Um aspecto não abordado neste trabalho foi qual seria a influência que o tipo de informação trafegada teria nos resultados, pois as informações podem ter níveis diferentes de sensibilidade à interferência. Estudos podem ser realizados nesta direção buscando avaliar a coexistência dos diversos padrões de redes sem fio, pois a interferência nas faixas ISM é uma realidade em ambientes heterogêneos, e padrões de comunicação precisam ser desenvolvidos considerando estes aspectos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve auxílio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq – Brasil – (400508/2014-1, 445700/2014-9).

REFERÊNCIAS

[1] ITU. (2012, 16/03/2015). *Radio Regulations, Edition of 2012*. Available: <http://www.itu.int/pub/R-REG-RR-2012>

[2] N. Azmi, L. M. Kamarudin, M. Mahmuddin, A. Zakaria, A. Y. M. Shakaff, S. Khatun, K. Kamarudin, and M. N. Morshed, "Interference issues and mitigation method in WSN 2.4GHz ISM band: A survey," *2nd International Conference on Electronic Design (ICED)*, 2014, pp. 403-408.

[3] IEEE802.15.2, "IEEE Recommended Practice for Information technology-- Local and metropolitan area networks-- Specific requirements-- Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed

Frequency Bands," *IEEE Std 802.15.2-2003*, pp. 1-150, 2003.

[4] B. Polepalli, W. Xie, D. Thangaraja, M. Goyal, H. Hosseini, and Y. Bashir, "Impact of IEEE 802.11n Operation on IEEE 802.15.4 Operation," in *International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA '09.*, 2009, pp. 328-333.

[5] L. Cheng Leong, M. Bolt, A. Syed, P. Ng, C. Goh, and L. Yun, "Dynamic performance of IEEE 802.15.4 devices under persistent WiFi traffic," in *International Conference on Recent Advances in Internet of Things (RIoT)*, 2015, pp. 1-6.

[6] N. J. LaSorte, S. A. Rajab, and H. H. Refai, "Experimental assessment of wireless coexistence for 802.15.4 in the presence of 802.11g/n," in *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, 2012, pp. 473-479.

[7] L. Angrisani, M. Bertocco, D. Fortin, and A. Sona, "Experimental Study of Coexistence Issues Between IEEE 802.11b and IEEE 802.15.4 Wireless Networks," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 57, pp. 1514-1523, 2008.

[8] S. Pollin, I. Tan, B. Hodge, C. Chun, and A. Bahai, "Harmful Coexistence Between 802.15.4 and 802.11: A Measurement-based Study," in *3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2008. CrownCom*, 2008, pp. 1-6.

[9] K. P. Subbu and S. Soman, "An interference mitigation scheme for IEEE 802.15.4 networks under IEEE 802.11b/g interference," in *International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT)*, 2014, pp. 1-6.

[10] L. Tytgat, O. Yaron, S. Pollin, I. Moerman, and P. Demeester, "Analysis and Experimental Verification of Frequency-Based Interference Avoidance Mechanisms in IEEE 802.15.4," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 23, pp. 369-382, 2015.

[11] R. G. Garroppo, L. Gazzarrini, S. Giordano, and L. Tavanti, "Experimental assessment of the coexistence of Wi-Fi, ZigBee, and Bluetooth devices," in *IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)*, 2011, pp. 1-9.

[12] M. Petrova, J. Riihijarvi, P. Mahonen, and S. LaBell, "Performance study of IEEE 802.15.4 using measurements and simulations," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2006, pp. 487-492.

[13] M. Bertocco, G. Gamba, and A. Sona, "Assessment of Out-of-Channel Interference Effects on IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks," in *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC)*, 2008, pp. 1712-1717.

[14] N. Torabi, S. Bhate, and V. C. M. Leung, "Robust sensing strategy for dynamic spectrum access in the 2.4 GHz ISM band," in *24th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2013, pp. 2713-2717.