

Análise de Interferência de Redes IEEE 802.11 sobre a Rede IEEE 802.15.1

Lucas C. Nicolau¹, Rogério A. Casagrande¹

¹Curso de Ciência da Computação – Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC) – Criciúma – SC– Brasil

lucasclaro10@hotmail.com, roc@unesc.net

Abstract. *This paper presents an interference analysis of IEEE 802.11 network over an IEEE 802.15.1 network operating in 2.4 GHz ISM band. Experimental tests were performed in a scenario composed of two IEEE 802.15.1 device and two IEEE 802.11 stations. The experiments were conducted by changing the distance between IEEE 802.11 Access Point and IEEE 802.15.1 standard device. Experimental results have shown that all analyzed variables interfere drastically in the efficiency of IEEE 802.15.1 networks.*

Resumo. *Este artigo apresenta uma análise de interferência entre redes IEEE 802.11 sobre uma rede IEEE 802.15.1 operando na faixa de frequência de 2.4 GHz. Foram realizados testes experimentais em um cenário com dois aparelhos IEEE 802.15.1 e duas estações IEEE 802.11. Os experimentos foram conduzidos alterando-se a distância entre o AP da rede IEEE 802.11 e um dispositivo no padrão IEEE 802.15.1. Os resultados demonstraram que todas as variáveis analisadas interferem na eficiência das redes IEEE 802.15.1.*

1. Introdução

Com o avanço da tecnologia, houve um crescimento nos diversos dispositivos que fazem uso da banda *Industrial Scientific and Medical* (ISM), tais como telefones sem fio, alarmes veiculares, enlaces ponto-a-ponto privados, dispositivos Bluetooth, micro-ondas e redes locais sem fio. Por consequência do uso desta frequência a principal desvantagem é a interferência gerada sobre ela, sendo que diversas vezes é dividido o mesmo espectro para a propagação do sinal dos equipamentos. Os dispositivos utilizam de diferentes padrões e protocolos e cada um deles trata a coexistência de uma forma diferente [Casagrande et al. 2016].

Ao decorrer do tempo, os dispositivos móveis tiveram um aumento considerável, boa parte deles possuem dois ou mais interfaces de comunicação sem fio. Dentre as interfaces mais utilizadas atualmente nesses dispositivos são Bluetooth e Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) 802.11, onde podem ser utilizadas simultaneamente, como por exemplo a interface Bluetooth para chamadas que não necessitam da utilização das mãos e a *Wireless Local Area Network* (WLAN), sendo utilizada como ponte de acesso à internet, porém as duas comunicações fazem uso da mesma banda de frequência a ISM de 2.4 GHz, desta forma acabam causando uma interferência de rádio entre si quando utilizadas simultaneamente [Nagai et al. 2012].

Quando é mencionada a faixa de frequência de 2.4 GHz, significa que esta faixa foi segmentada em vários intervalos diferentes, sendo considerados os canais de comunicação, definidos pelas agências de regulamentação. Desta forma, uma faixa de frequência é subdividida em várias outras subfrequências menores, para que assim possa existir uma transmissão em sinais diferentes. As redes 802.11 utilizam a faixa de 2.4 GHz divididas em 14 canais, possibilitando assim que os canais 1, 6 e 11 não se sobreponham, como pode ser visto na Figura 1 [Araújo 2017].

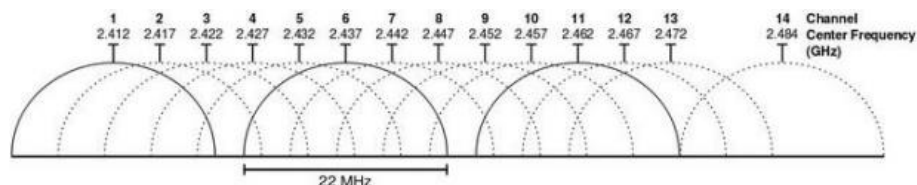


Figura 1. Divisão de canais em redes 802.11

Fonte: Araújo (2017)

As redes Bluetooth tem como definição ser dividida em mestre e escravos, onde a organização, transmissão e recepção de dados são responsabilidades inteiramente atribuídas ao mestre, que deve disponibilizar estes recursos a todos os escravos. Dentro desta rede não existem diferenças significativas de hardware entre mestre e escravos, com a possibilidade de qualquer dispositivo ser um mestre. O mestre tem como objetivo controlar o tráfego de mensagens e informações, realizando uma busca em todos os dispositivos, avaliando se algum dispositivo verificado possui pacotes a serem transmitidos. O envio desta informação somente ocorre pelo escravo, quando é solicitado pelo mestre. Uma grande vantagem desta rede estar sendo controlada pelo mestre é que não haverá dois escravos se comunicando ao mesmo tempo, evitando assim que ocorram colisões indesejadas [Moraes 2010].

Os dispositivos conectados na piconet utilizam um salto de frequência padrão, sendo o mesmo definido através de campos disponíveis no endereço do dispositivo e no relógio do mestre da rede. Este salto é feito sobre os 79 canais de frequências disponíveis na banda ISM, com o padrão de salto podendo ser utilizado para excluir uma parte da frequência em uso por dispositivos interferentes. Cada canal é dividido em *slots* de tempo, onde cada *slot* está vinculado a uma determinada frequência de salto, que ocorre 1600 vezes por segundo [IEEE 2005].

O Bluetooth faz uso do protocolo *Radio Frequency Communication* (RFCOMM) na camada de transporte, constituindo um protocolo simples que disponibiliza a emulação das portas seriais, sendo encapsulado pelo protocolo *Logical Link Control Adaptation Protocol* (L2CAP). Este protocolo tem o suporte de até 60 conexões simultâneas entre dois dispositivos. A porta serial que foi emulada manipula os dados utilizando o protocolo *Universal Asynchronous Receiver/Transmitter* (UART), que tem como função converter os dados seriais em dados paralelos e vice-versa [Aneesh, Sreekumari e Jiju 2012].

Em sua camada de enlace existe o *Automatic repeat request* (ARQ) que garante a entrega consistente dos dados, obtendo um percentual pequeno de que esses dados sejam perdidos. O que ocorre quando sofre interferência sobre WLAN é a redução na taxa de entrega de transferência e um aumento na latência da rede [IEEE 2003].

A comunicação *Asynchronous Connection-Less* (ACL) adota a retransmissão de pacote quando ocorrer algum erro ou perda no envio. Isso é possível pois o protocolo aguarda uma mensagem de confirmação. O receptor define o valor ARQ no cabeçalho do retorno do pacote e, dentro do retorno, o transmissor consegue o valor do *Acknowledgement* (ACK), uma vez que, retornado 1, indica que a transmissão foi efetuada com sucesso, e 0, que houve falha na transmissão [Anil et al. 2010].

Caso a transmissão do pacote seja efetuada com sucesso, o receptor deve enviar a confirmação com um ACK ao transmissor. Uma vez que o transmissor não recebe a confirmação ACK durante o intervalo do *time-out*, ele tem como resposta que o pacote foi perdido e o reenvia. Essa retransmissão não ocorre instantaneamente após o *time-out*, porque o pacote enviado pode ter sido perdido ou apenas houve a perda da confirmação enviada pelo receptor [Figueiredo 2008].

Através de um estudo realizado, foi possível, por meio de uma análise probabilística, confirmar que existe uma taxa de erros de pacotes Bluetooth na presença de redes IEEE 802.11. Os autores indicaram a probabilidade de um pacote com erro ser recebido em um dispositivo Bluetooth por interferência de um dispositivo IEEE 802.11 e ainda assumem que a probabilidade de um pacote Bluetooth ser sobreposto por um pacote WLAN no tempo e na frequência depende da posição deste pacote com relação àquele e às frequências de transmissão. Ambos trabalham com espalhamento de frequência, portanto existe uma probabilidade de colisões ocorrerem no mesmo tempo e frequência [Golmie and Mouveaux 2001].

Em outro estudo, foi comprovado que o Wi-Fi na presença do Bluetooth era pouco afetado. Mesmo em cenários onde o transmissor Bluetooth foi posicionado próximo à estação Wi-Fi, considerado o pior caso, não se obteve uma interferência considerável. Por outro lado, o Bluetooth, ao sofrer interferência com a presença de Wi-Fi, registrou uma queda de desempenho de até 68%. Outro ponto levantado pelos autores foi a técnica *Frequency-Hopping Spread Spectrum* (FHSS) que o Bluetooth utiliza para contornar a interferência. Porém, em testes realizados, não se revelou muito eficaz na redução da interferência de Wi-Fi, visto que 22 canais do Bluetooth foram cobertos por um único canal do Wi-Fi [Garroppo et al. 2011].

Dados os problemas de interferência, se faz necessária uma análise no posicionamento dos equipamentos, mitigando o atraso e perda de dados, uma vez que as técnicas de coexistência não se fazem eficiente para a redução da interferência. Sendo assim este trabalho se propôs a avaliar a interferência das redes IEEE 802.11 sobre as redes IEEE 802.15.1, e demonstrar um cenário ideal e melhores práticas para redução da mesma.

2. Materiais e Métodos

A execução dos testes foi realizada em um cenário *indoor* de uma casa livre de interferências de outras redes, sendo assim, podem ser evitadas as alterações nos dados coletados provenientes de outras fontes. Para garantir a veracidade do ambiente livre, durante os testes foram realizadas varreduras no espectro, garantindo a inexistência de outras redes sem fio e sensores sem fio.

A realização dos testes empregou uma rede IEEE 802.15.1 composta por 1 mestre e 1 escravo, ambos utilizaram notebook com sistema operacional Kali Linux 2020.3v, conectados através do ORICO USB Bluetooth Adapter 4.0. Para gerar a interferência foi utilizada uma rede IEEE 802.11, composta por roteador D-Link DSL-2740E, Xiaomi 9T Pro e iPhone SE.

Para gerar o tráfego da rede Bluetooth, foi criado um *software* utilizando a linguagem Python 3.7. A conexão entre os aparelhos foi feita com o módulo PyBluez, que utilizou o protocolo RFCOMM; o envio e recebimento dos dados, foi feito através do módulo Socket. Para a realização dos testes, foi definido o envio de 10.000 pacotes com o tamanho de 14 bytes, tendo o intervalo de tempo entre cada envio programado em 0.005 segundos. A métrica que foi analisada para identificação da interferência no cenário definido, foi o atraso fim-a-fim, uma vez que a comunicação ACL garante a entrega dos pacotes através do ACK, porém, esta garantia acaba gerando um aumento na latência da rede, comprovada através da análise efetuada. Para a obtenção dos tempos, foi contabilizado através da primeira recepção do escravo, até o recebimento de uma mensagem de conclusão enviada pelo mestre. Foram estabelecidos quatro cenários para realização dos testes. Devido aos cenários serem reproduzidos em um ambiente *indoor*, os dispositivos ficaram conectados a uma distância de 10 metros e, entre a conexão, existiam duas paredes de concreto de 12 cm, não havendo nenhum outro móvel ou equipamento em meio à comunicação dos dispositivos.

2.1. Rede IEEE 802.15.1 Livre de Interferência

Inicialmente foi implementado o cenário livre de interferência, onde os dispositivos Bluetooth não sofreram interferência de nenhuma outra rede. Neste cenário, a potência do sinal recebido foi em média de -75 dBm pelo escravo. Na Figura 1 é possível visualizar uma representação do cenário definido.

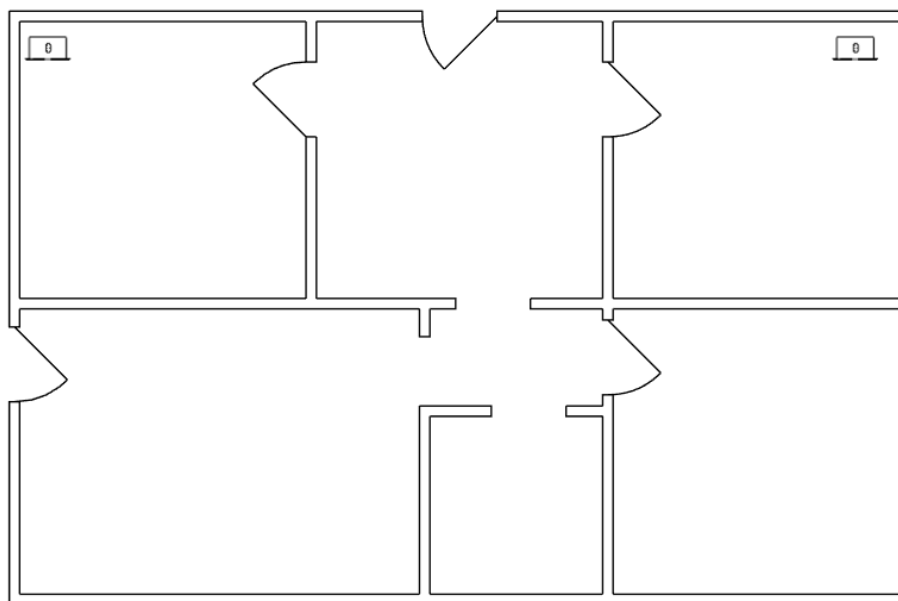


Figura 2. Cenário 1- Rede 802.15.1 em um ambiente livre de interferência

2.2. Rede IEEE 802.15.1 sobre Interferência a 20 cm do Transmissor

Neste cenário foi acrescentado o roteador a 20 cm do transmissor e os aparelhos conectados a ele, com um dos equipamentos ficando a 20 cm do transmissor e o outro a 1.70 m. A rede IEEE 802.11 e seus dispositivos se mantiveram no mesmo cômodo do transmissor. Neste cenário, a potência do sinal recebido foi em média de -90 dBm, e a potência de interferência média sobre o transmissor foi de -22 dBm. Na Figura 2 é possível visualizar uma representação do cenário definido.

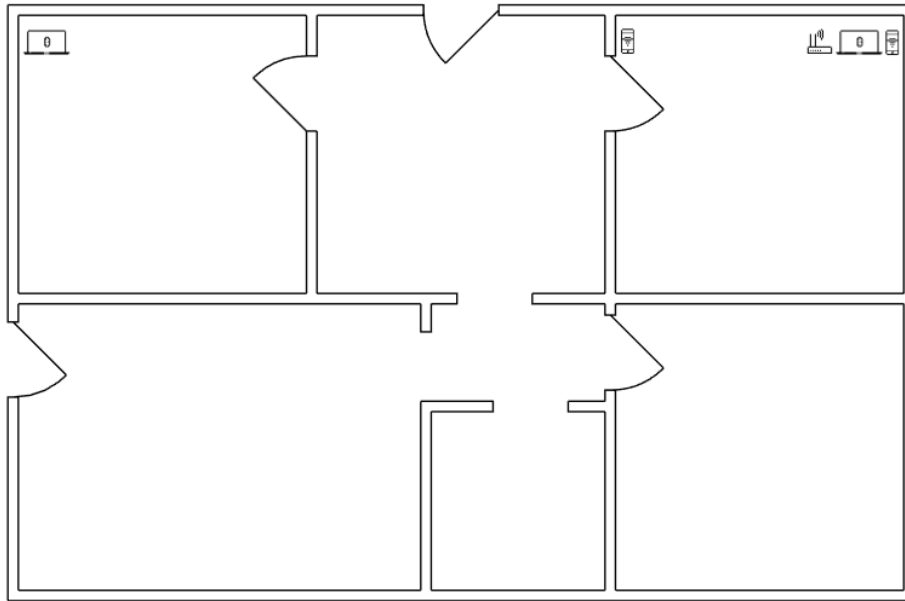


Figura 2. Cenário 2 - Rede 802.15.1 com interferência a 20 cm do transmissor

2.3. Rede IEEE 802.15.1 sobre Interferência a 20 cm do Receptor

Neste cenário, o roteador foi movido a 20 cm do receptor, mantendo-os no mesmo cômodo, porém, os aparelhos conectados não foram movidos. Neste cenário, a potência do sinal recebido foi em média de -96 dBm e a potência de interferência média sobre o receptor foi de -12 dBm. Na Figura 3 é possível visualizar uma representação do cenário definido.

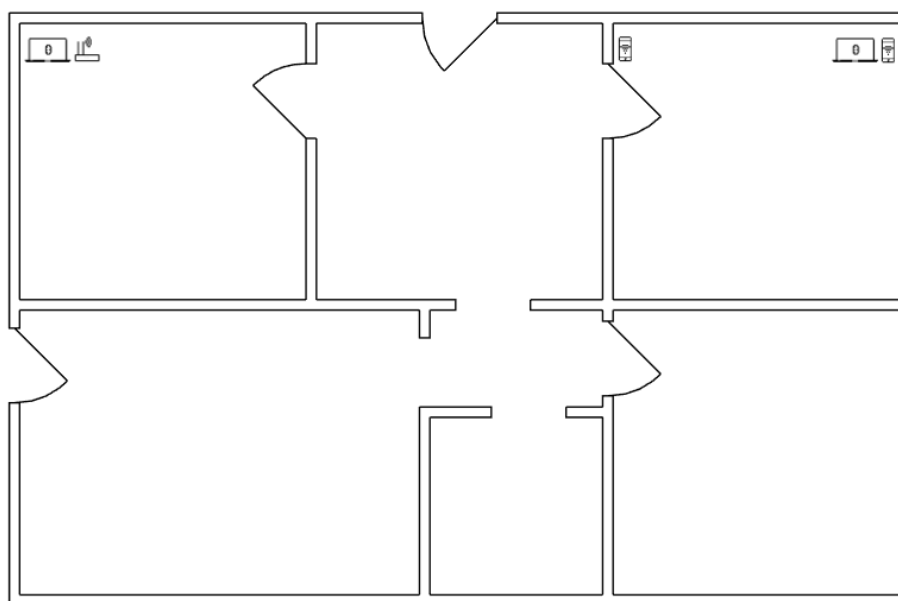


Figura 3. Cenário 3 - Rede 802.15.1 com interferência a 20 cm do receptor

2.4. Rede IEEE 802.15.1 sobre Interferência a 5 Metros de Ambos

Neste cenário, o roteador foi movido para o meio da conexão Bluetooth, ficando a 5 metros de ambos os pontos, porém, sem realizar a movimentação dos aparelhos conectados. O roteador ficou no cômodo entre o receptor e o transmissor. Neste cenário, a potência do sinal recebido foi em média de -78 dBm, e a potência de interferência média sobre o transmissor foi de -55 dBm e sobre o receptor de -43 dBm. Na Figura 4 é possível visualizar uma representação do cenário definido.

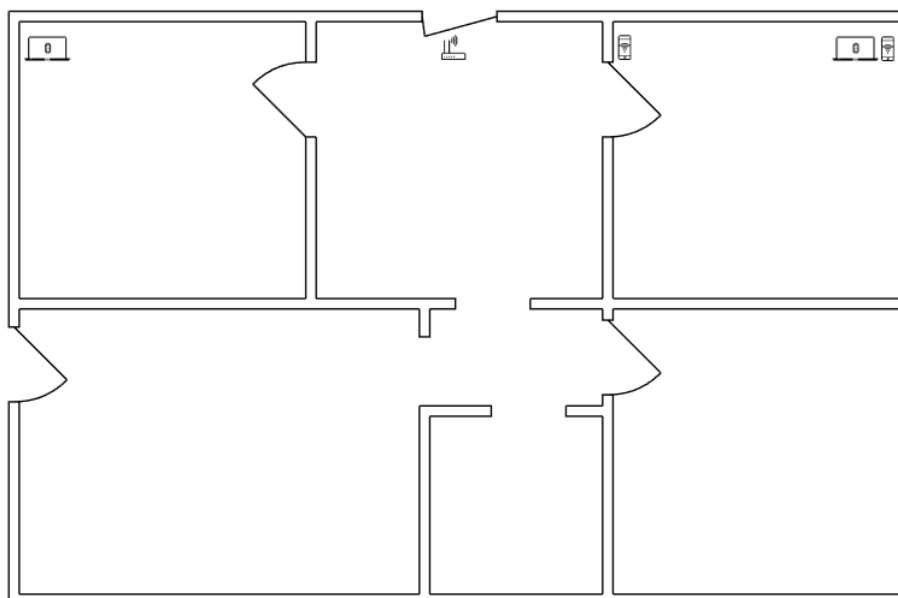


Figura 4. Cenário 4 - Rede 802.15.1 com interferência a 5 metros de ambos

2.5. Definições de Interferência

A cada teste realizado sobre interferência, realizava-se a repetição dos mesmos 10 vezes, variando entre os protocolos 802.11-n, 802.11-g e 802.11-b para a rede Wi-Fi. O teste utilizou do canal 6 em todos os protocolos. A rede 802.11-n operou com uma faixa de frequência de 40 MHz e os demais operaram na faixa de 22 MHz. Para gerar o tráfego de interferência, foi utilizado o aplicativo Magic iPerf no Android e WiFiPerf Endpoint no IOS. O protocolo 802.11-n trabalhou com a taxa de 3,75 Mbps, o 802.11-g com 2,5 Mbps e o 802.11-b a 1 Mbps.

Garantindo a integridade da interferência, foi utilizado o *software* Aircrack-ng, foi responsável por garantir que não existia outra rede interferindo nos testes realizados. A preferência por sua escolha baseou-se no fato de que, além de demonstrar todas as redes disponíveis, também exibe as redes que tenham o *Service Set Identifier* (SSID) oculto. Desta forma, foi possível garantir que não havia nenhum outro equipamento Wi-Fi interferindo.

2.6. Método Estatístico

A coleta dos dados foi efetuada através de uma amostragem aleatória simples, que possibilitou uma amostra eficaz e com exatidão. Os dados coletados foram analisados com o auxílio do software IBM *Statistical Package for the Social Science* (SPSS) versão 21.0. As variáveis quantitativas foram expressas por média e desvio padrão. Os testes estatísticos foram realizados com um nível de significância $\alpha = 0,05$ e, portanto, confiança de 95%. A distribuição dos dados quanto à normalidade foi avaliada por meio da aplicação do teste de Shapiro-Wilk.

A comparação da média das variáveis quantitativas entre as categorias das variáveis qualitativas dicotômicas foi realizada por meio da aplicação do teste U de Mann-Whitney. A comparação da média das variáveis quantitativas entre as categorias das variáveis qualitativas politômicas foi realizada por meio da aplicação do teste H de Kruskal-Wallis seguido do *post hoc* teste de Dunn quando observada significância estatística.

3. Resultados

Em cada cenário, o teste foi repetido dez vezes, movimentando apenas o roteador de acordo com os cenários definidos para os testes.

Com os resultados dos testes aplicado para o Cenário 1, obteve-se um valor constante de 52.656942 segundos para o envio dos pacotes do transmissor até o receptor. Utilizando este valor como base para a comparação com os demais testes realizados com a presença de interferências, obteve-se uma diferença significativa em alguns dos demais cenários, devido aos valores de p serem menores que 0,050.

Com os resultados dos Cenários 2 e 3, quando comparados com o Cenário 1, foi possível perceber uma variação significativa no atraso da entrega dos dados, pois, ao compará-los, é visível um aumento considerável na média dos tempos de entrega dos dados ao receptor, quando aproximado o roteador ao transmissor ou ao receptor. O padrão que mais se destaca quando aproximado ao transmissor é o IEEE 802.11-n, que teve um tempo médio de atraso de 12 segundos, quando comparado ao tempo de entrega

dos dados sem interferência. Quando movido o roteador para próximo ao receptor, é indicado que o padrão IEEE 802.11-n continua interferindo, com um atraso um pouco menor, na casa de 7 segundos. Porém, o IEEE 802.11-g passa a ser o padrão que mais causa atraso na entrega dos dados, com valor médio de atraso de 43 segundos. Esses valores podem ser confirmados através das Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Resultados da Significância de Interferência - Cenário 1 com Cenário 2

Média ± DP			
	20 cm do Transmissor	Sem Interferência	Valor-p [†]
IEEE 802.11-b	53480510,9 ± 1278494,8	52656942,1 ± 58523,7	0,015
IEEE 802.11-g	55427634,0 ± 3522257,6	52656942,1 ± 58523,7	0,002
IEEE 802.11-n	64975452,0 ± 11098708,6	52656942,1 ± 58523,7	0,001

[†]Valor obtido após a aplicação do teste U de Mann-Whitney.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Tabela 2. Resultados da Significância de Interferência - Cenário 1 com Cenário 3

Média ± DP			
	20 cm do Receptor	Sem Interferência	Valor-p [†]
IEEE 802.11-b	53607756,1 ± 982921,8	52656942,1 ± 58523,7	0,002
IEEE 802.11-g	95861533,5 ± 38454741,5	52656942,1 ± 58523,7	<0,001
IEEE 802.11-n	56916109,9 ± 3568615,54	52656942,1 ± 58523,7	<0,001

[†]Valor obtido após a aplicação do teste U de Mann-Whitney.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Ao analisar o Cenário 4, não foi possível encontrar uma diferença significativa nos valores, dado que o valor de p passou a ser maior que 0,050. Desta forma não foi possível identificar um nível significativo de interferência, onde passou a ter um atraso máximo de 0,8 segundo, de acordo com os dados da Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da Significância de Interferência - Cenário 1 com Cenário 4

Média ± DP			
	Entre o Transmissor e Receptor	Sem Interferência	Valor-p [†]
IEEE 802.11-b	52731137,0 ± 136556,2	52656942,1 ± 58523,7	0,353
IEEE 802.11-g	52654085,2 ± 22676,2	52656942,1 ± 58523,7	0,912
IEEE 802.11-n	52700863,7 ± 127094,32	52656942,1 ± 58523,7	0,631

[†]Valor obtido após a aplicação do teste U de Mann-Whitney.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

Como pode ser visto na Tabela 4, quando comparado os valores de atraso relacionados com a distância, é possível visualizar que quanto mais próximo o roteador está do transmissor ou do receptor, existe um atraso maior, exceto quando utilizado o padrão IEEE 802.11-b que, em ambos os cenários, obteve-se um atraso baixo, com a média de 1,9 segundo quando aproximado do transmissor ou do receptor e quando movido entre a comunicação dos dispositivos, o atraso gerado foi de 0,1 segundo.

Tabela 4. Resultados da Significância de Interferência Conforme as Distâncias

Média ± DP			
	20 Centímetros	5 Metros	Valor-p [†]
IEEE 802.11-b	53544133,5 ± 1111829,1	52731137 ± 136556,2	0,013
IEEE 802.11-g	75644583,7 ± 33713235,1	52654085,2 ± 22676,2	<0,001

IEEE 802.11-n	60945780,9 ± 9026312,8	52700863,7 ± 127094,3	<0,001
---------------	------------------------	-----------------------	--------

†Valor obtido após a aplicação do teste U de Mann-Whitney.

Fonte: Dados da pesquisa, 2020.

3.1 Discussão dos Resultados

Os resultados obtidos apontam um nível considerável de interferência ao posicionar o roteador próximo às extremidades da comunicação Bluetooth, ou mover o roteador para próximo ao transmissor ou ao receptor, obtendo-se uma variação de 1 segundo e 43 segundos na entrega dos dados, respectivamente, devido ao padrão de comunicação da interferência e a taxa de transmissão. Ao posicionar o roteador longe das extremidades, a interferência passou a ficar pouco perceptível, com atraso médio máximo de 0,8 segundo.

De acordo com os resultados obtidos, confirmam-se os achados dos estudos de Garroppo et al. (2011), onde foi comprovado que o FHSS não se faz eficiente na redução da interferência, tendo casos onde a média de atraso teve um aumento de até 82% de acordo com o padrão de comunicação do Wi-Fi e a distância. Quando utilizado o padrão 802.11-n, que trabalhou com uma faixa de frequência de 40 MHz, acabou-se ocupando 40 canais do Bluetooth.

Conforme IEEE (2003), o ARQ, que garante a entrega dos dados, quando colocado em um cenário de interferência, causa um atraso na entrega dos dados e uma latência na rede. Isso pode ser comprovado através dos resultados obtidos, onde é exposto que, em cada cenário que existe interferência, gerando um atraso na entrega dos dados, devido ao reenvio de dados.

4. Conclusões

Este trabalho demonstrou através de experimentos práticos o atraso fim-a-fim da interferência das redes IEEE 802.11-b, IEEE 802.11-g e IEEE 802.11-n sobre a rede IEEE 802.15.1, considerando o atraso na entrega dos dados ao receptor e a distância entre o roteador em relação à comunicação Bluetooth. Comprovou-se que a interferência existe entre todos os protocolos do Wi-Fi, e, quanto mais próximo o roteador da comunicação Bluetooth, maior é o atraso fim-a-fim. A partir dos dados coletados e comparados, pode-se reduzir o nível de interferência posicionando o roteador afastado dos pontos de transmissão ou recepção de dados Bluetooth, obtendo uma redução de até 30% no nível de interferência. Comprovou-se que, ao utilizar o protocolo IEEE 802.11-b, o atraso na interferência foi muito pequeno, devido à baixa taxa de transmissão utilizada pelo protocolo.

As dificuldades encontradas para a realização dos testes foram em relação à falta de ferramentas de análise de interferência fim-a-fim, definição de canal e análise do espectro de rede Bluetooth, onde se faz necessário um *appliance sniffer*, para que possa ser definido o canal de comunicação, captura de perda e reenvio de pacotes Bluetooth.

Como trabalhos futuros, sugere-se: Analisar a interferência fim-a-fim variando a taxa de transmissão das redes Wi-Fi; Avaliar a perda e reenvio de pacotes através de um *sniffer* de rede Bluetooth; Variar a carga de dados enviadas na rede Bluetooth.

Referências

- Aneesh, R., Sreekumari., B. and Jiju., K. (2012). Design and implementation of Bluetooth MAC core with RFCOMM on FPGA. In 2012 Annual IEEE India Conference, INDICON 2012.
- Anil, M., Chandrababu, N., Elleithy, K., Syed, R. and Laiali, A. (2010). Interference of 802.11B WLAN and Bluetooth: Analysis and Performance Evaluation. International journal of Computer Networks and Communications, v. 2.
- Araújo, I. de A. (2017). Redes Sem Fio: Aplicação da metodologia Site Survey para análise de propagação do sinal na rede 802.11 da UNIFESSPA. p. 66.
- Casagrande, R., Negri, J., Cechinel, A., Montez, C. and Moraes, R. (2016). Análise Experimental da Interferência de Comunicação de redes IEEE 802.11n sobre redes IEEE 802.15.4.
- Moraes, A. F. (2010). Redes sem fio: Instalação, Configuração e Segurança - Fundamentos. Saraiva Educação S.A.
- Figueiredo, L. C. (2008). Uma análise da QoS na transmissão em redes 802.11G sob presença de interferência Bluetooth. p. 171.
- Garroppo, R. G., Gazzarrini, L., Giordano, S. and Tavanti, L. (2011). Experimental assessment of the coexistence of Wi-Fi, ZigBee, and bluetooth devices. In 2011 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2011 - Digital Proceedings.
- Golmie, N. and Mouveaux, F. (2001). Interference in the 2.4 GHz ISM band: Impact on the bluetooth access control performance. In IEEE International Conference on Communications.
- IEEE (2003). Part 15.2: Coexistence of Wireless Personal Area Networks with Other Wireless Devices Operating in Unlicensed Frequency Bands. IEEE Computer Society,
- IEEE (2005). Part 15.1a: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Wireless Personal Area Networks (WPAN). IEEE Std 802.15.1-2005 (Revision of IEEE Std 802.15.1-2002), p. 1–700.
- Nagai, Y., Hori, T., Yokoyama, Y., et al. (2012). Advanced wireless cooperation mechanisms for interference mitigation in the 2.4 GHz ISM band. In 2012 IEEE Consumer Communications and Networking Conference, CCNC'2012.