

## Prototipagem de sistemas IEEE802.11ad usando o ns-3

Malco D. de C. Dantas<sup>1</sup>, Ravan N. de Oliveira<sup>1</sup>,  
Daniel L. Flor<sup>2</sup>, Daniel R. Luna<sup>2</sup>, Vicente A. de Sousa Jr.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia de Comunicações (DCO)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal – RN – Brasil

{malco,ravan}@ufrn.edu.br

<sup>2</sup>Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação (PPGEEC)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) – Natal – RN – Brasil

{danielflor,danielro,vicente.sousa}@ufrn.edu.br

**Abstract.** *This paper aims to present the main features of the IEEE 802.11ad standard, which is the 802.11-family system that focuses on high data throughput via millimeter waves. We discuss the main characteristics of the PHY layer, and some of the challenges that a system working at 60 GHz must overcome. We also introduce an 802.11ad prototyping module available for the ns-3, as well as an experiment, created with the simulator, which showcases the sensibility of 802.11ad regarding the distance between transmitter and receiver.*

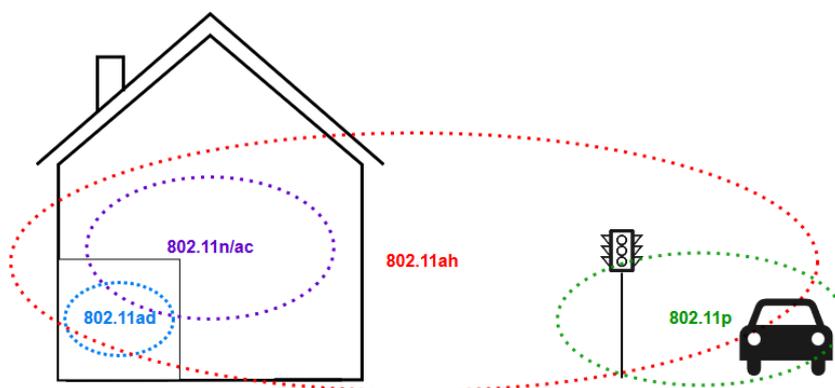
**Resumo.** *Este artigo tem como objetivo apresentar as principais características do padrão do IEEE 802.11ad, o sistema da família 802.11 focado em altas taxas de transmissão por ondas milimétricas. São discutidas as principais características das camadas PHY, e alguns dos desafios enfrentados por um padrão que opera na faixa de 60 GHz. É apresentado também um módulo do IEEE 802.11ad disponível para o simulador ns-3, bem como um experimento realizado com esta ferramenta que ilustra a sensibilidade do sistema 802.11ad à distância entre transmissor e receptor.*

### 1. Introdução

A chegada do 5G, a quinta geração de sistemas de comunicações móveis, mudará o modo de utilização dos sistemas de comunicações sem fio. Além da evolução natural da internet móvel com o 5G *enhanced Mobile BroadBand* (eMBB), mais dois casos de uso estão sendo concebidos: o *massive Machine Type Communications* (mMTC), que suporta bilhões de dispositivos conectados; e o *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC), para aplicações de baixa latência e alta confiabilidade, como a comunicação entre veículos e carros autônomos. Esses casos de uso materializam o crescimento e a diversidade de serviços proporcionados pelo 5G [ITU 2017]. Desse modo, fatores como consumo de energia, taxa de erro, número de dispositivos simultâneos suportados, latência, entre outros, ganham tanta importância quanto velocidade de transmissão e cobertura.

Seguindo essa tendência, o IEEE buscou diversificar o escopo da família de sistemas 802.11, abrangendo um variedade de aplicações e cenários que vão além do acesso à internet em residências e escritórios. A Figura 1 apresenta alguns dos protocolos da família 802.11 e seus cenários de uso. Os padrões 802.11n e 802.11ac são os mais comuns, usados para acesso à internet tanto em ambientes *indoor*, como em *outdoor* de curto alcance. O padrão 802.11ah alcança uma grande área de cobertura por operar em frequência mais

baixas, objetivando aplicações em Internet das Coisas (IoT). Já o padrão 802.11p foca nas comunicações veiculares (V2X). Finalmente, o padrão 802.11ad, conhecido comercialmente como WiGig, busca atender à demanda de alta taxa de transmissão para aplicações como *streaming* de vídeos em alta resolução (4K). Como tecnologia habilitadora, o 802.11ad utiliza bandas largas disponíveis na faixa de ondas milimétricas (mmWaves de 30 a 300 GHz), sofrendo com o efeito colateral do encurtamento do alcance, limitando-o a aplicações *indoor*.



**Figura 1. Variedade de cenários de uso da família de padrões redes sem fio 802.11.**

Dada a importância da alta taxa de transmissão para o 5G e para a evolução da família de sistemas 802.11, é essencial conhecer as funcionalidades da tecnologia 802.11ad. É de igual importância disponibilizar e/ou ajudar a desenvolver ferramentas de simulação para prototipar e testar melhorias para tal sistema. O principal objetivo deste trabalho é disponibilizar um material de discussão e apresentação de ferramentas de prototipagem do 802.11ad, realizando um estudo demonstrativo do uso simulador ns-3 na simulação de um sistema com uma estação (STA) e um ponto de acesso (AP). O restante do trabalho está organizado como a seguir. A Seção 2 descreve as camadas físicas (PHY) do padrão 802.11ad. A Seção 3 apresenta as principais ferramentas de prototipagem de rede e seu suporte ao padrão 802.11ad. A Seção 4 apresenta o módulo 802.11ad do ns-3 e um caso de estudos simples para ilustrar seu uso. As conclusões e perspectivas de trabalhos futuros fecham o artigo na Seção 5.

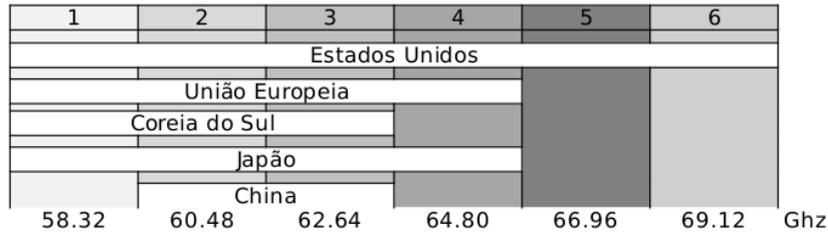
## 2. O padrão IEEE 802.11ad

### 2.1. Camada Física (PHY)

Para permitir taxas elevadas, o IEEE 802.11ad prevê seis canais com largura de banda de 2,16 GHz, com portadora operando em torno de 60 GHz [whi 2017, Alliance 2016]. Apesar dessa faixa ser não-licenciada, ela já está alocada para outros serviços em alguns países, portanto, não é uma alocação de frequência global. Como ilustrado na Figura 2, apenas os Estados Unidos tem os seis canais previstos.

A solução encontrada em alguns países foi a utilização de canais em outras faixas de frequência. No Japão, por exemplo, foi criada uma variação do padrão 802.11ad nomeada 802.11aj, que utiliza canais tanto em 60 GHz quanto em 45 GHz. Como o canal 2 está disponível nas principais potências mundiais, ele foi escolhido para ser o canal de controle padrão do protocolo.

Como mostrado na Tabela 1, o padrão 802.11ad prevê três tipos de camada física, cada uma com um conjunto *Modulation and Code Schemes* (MCSs) possíveis. O MCS define um compromisso entre qualidade de canal, taxa de transmissão e confiabilidade, com o MCS 0



**Figura 2. Disponibilidade do espectro na faixa de mmWaves [whi 2017, Alliance 2016].**

tendo a menor taxa, mas a maior confiabilidade devido a modulação utilizada. A camada de controle e a *single carrier* (SC PHY) são obrigatórias. A SC PHY LP (Single Carrier Low Power) é uma variação da SC PHY projetada para poupar energia, e é destinada para dispositivos que utilizam baterias, como dispositivos móveis e óculos de realidade virtual sem fio.

**Tabela 1. Alocação de MCS para os tipos de camadas PHY do 802.11ad.**

Camada PHY	MCS
Camada de Controle	0
Single Carrier (SC PHY)	1 - 12
Single Carrier Low Power (SC LP PHY)	25 - 31
OFDM	13 - 24

A Figura 3 mostra a estrutura do pacote do 802.11ad, que é a mesma em todas as camadas físicas. O campo *Short Training Field* (STF) é responsável por sincronização temporal e para fins de controle automático de ganho. O *Channel Estimation* (CE) é usado para estimação de canal e de SNR para a adaptação de enlace (mudança do MCS dependendo da qualidade do canal). O cabeçalho é o que muda para cada camada física, ele informa quais MCS estão sendo usados para a transmissão, por exemplo. O campo de dados é onde a informação útil é inserida, e o *Training for beamform* (TRN) é um campo opcional usado para aprimorar o *Beamforming*. O *Beamforming* é uma técnica que utiliza múltiplas antenas para gerar um diagrama de radiação altamente direcional, promovendo ganho por diversidade. Esta é uma técnica muito importante para comunicações na faixa do mmWave [Nitsche and Cordeiro 2014].



**Figura 3. Estrutura de um pacote PHY do 802.11ad [TGad 2010].**

Cada tipo de camada PHY tem sua funcionalidade, das quais se destacam:

- **Camada de Controle:** é obrigatória em todas as implementações. Seu papel é enviar sinais de controle e manter estável a comunicação com os dispositivos. É modulada em  $\pi/2$ -DBPSK por ser mais robusta, oferecendo proteção contra o canal;
- **Single Carrier:** projetada para obter alta taxa de transmissão [whi 2017]. Enquanto o cabeçalho e o preâmbulo são modulados em  $\pi/2$ -DBPSK (para robustez ao canal), o *payload* usa os MSCs 1 a 12 dependendo do estado do canal reportado no campo CE;
- **Single Carrier Low Power:** uma variação da SC PHY, projetada para alta taxa de transmissão aliada a economia de energia. A ideia é atingir em torno de 2,5 Gbps se as modulações 32QAM e 64QAM, devido ao seu maior consumo de energia;

- **OFDM:** tem implementação opcional e pode suportar velocidades de 693 Mbps até 6,757 Gbps. Por razões de complexidade para dispositivos com bateria limitada [Nitsche and Cordeiro 2014], a transmissão por OFDM está ficando obsoleta para o 802.11ad [whi 2017], e é discutida a possibilidade de excluí-la em futuros *releases*. A tendência é que a camada OFDM seja usada apenas em aparelhos que estejam ligados na rede elétrica como TVs e projetores, por exemplo.

### 3. Ferramentas de Prototipagem do Padrão 802.11ad

O uso de simuladores de redes é imprescindível no estudo e projeto de sistemas de comunicação sem fio. Muitas vezes é muito custoso ou até mesmo inviável a construção de um protótipo em hardware do sistema. Dessa forma, simuladores em software tornam-se uma alternativa mais rápida e barata, além de permitir facilmente o teste de diferentes configurações e funcionalidades do sistema. Nesta Seção serão apresentadas as ferramentas de prototipagem que podem ser utilizadas para simular e testar o desempenho do padrão Wi-Fi 802.11ad em seus cenários.

Existem várias ferramentas de prototipagem de redes de comunicação disponíveis, como mostra a Tabela 2. Além das diferenças de funcionalidades entre os simuladores, como o suporte para módulos Wi-Fi, LTE, NR e redes submarinas, há também diferenças de custo comercial e requisitos mínimos de hardware. Grande parte dos simuladores são escritos em C ou C++, mas interface gráfica é um recurso mais aperfeiçoado em ferramentas comerciais. Mesmo considerando o OMNeT++ uma ferramenta muito atrativa (é *open source*, possui interface gráfica e é multiplataforma), infelizmente, ela não possui um módulo dedicado ao 802.11ad.

**Tabela 2. Principais simuladores de rede e suas características.**

Simulador	Linguagens Suportadas	Tipo de Licença	Interface Gráfica	Sistemas Operacionais	Módulos dedicados ao 802.11ad
ns-3.30.1 <sup>1</sup>	C++	Open Source	Não	Linux	não
Wigig-Tools Simulator <sup>2</sup> (baseado no ns-3.26)	C++	Open Source	Não	Linux e MAC OS	Sim
OMNeT++ <sup>3</sup>	C++	Open Source	Sim	Linux, MAC OS e Windows	Não
Riverbed Modeler <sup>4</sup> (antigo OPNET)	C e C++	Comercial	Sim	Windows e Linux	Não
NetSim <sup>5</sup>	C	Comercial	Sim	Windows	Não

Por outro lado, o simulador Wigig-Tools como foi mostrado na Tabela 2 tem suporte ao 802.11ad, sendo este baseado no ns-3.26. O ns-3 é um simulador popular, tanto para iniciativas de educação como para pesquisa em redes, é *opensource*, constituído por um conjunto de bibliotecas, que simulam os diversos aspectos de um sistema de comunicação. Por esses motivos, o simulador Wigig-Tools foi o escolhido para o desenvolvimento do nosso trabalho.

### 4. Prototipagem do 802.11ad em ns-3

Nesta Seção são apresentadas algumas características do simulador escolhido e os resultados alcançados com o estudo demonstrativo proposto. O Wigig-Tools é desenvolvido por Hany

<sup>1</sup> <https://www.nsnam.org/>.

<sup>2</sup> <https://github.com/wigig-tools/ns3-802.11ad>.

<sup>3</sup> <https://omnetpp.org/>.

<sup>4</sup> <https://www.riverbed.com/products/steelcentral/steelcentral-riverbed-modeler.html>.

<sup>5</sup> <https://www.tetcos.com/>.

Assasa, baseado no ns-3.26, o qual suporta os padrões 802.11 a/b/g/n/ac. A Tabela 3 resume as principais características do módulo 802.11ad.

**Tabela 3. Principais funções e limitações do módulo 802.11ad do ns-3.**

Funções Suportadas		Limitações
Períodos de acesso ao canal	Alocação Dinâmica de Canal	Não suporta a agregação A-MPDU
Treinamento do Beamform	Alocação via Pooling	Dificuldade com operações de múltiplos APs
Modelo Direcional de Antena	Revezamento (Full e Half duplex)	Dificuldade de Implementações de Cenários Complexos
Fast Session Transfer (FST)	Modelo de Camada PHY para DMG	Modelo de erro simples

O módulo 802.11 padrão implementa o DCF com antenas omnidirecionais. Para implementar as diferentes funcionalidades do 802.11ad, como a comunicação direcional e o protocolo EDCA, o módulo foi organizado em quatro camadas [Assasa and Widmer 2016]:

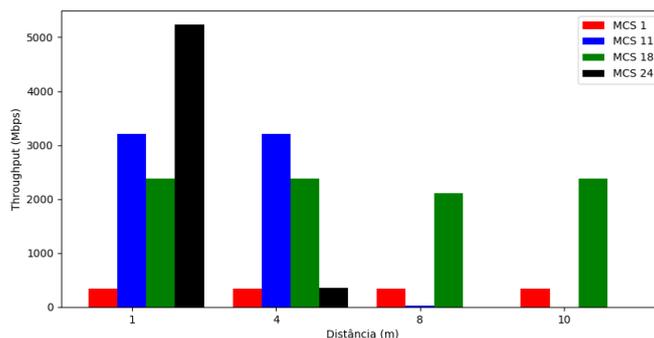
1. **MAC High Layer:** modela serviços básicos da infraestrutura da rede, como a criação de uma BSS para a rede;
2. **MAC Low Layer:** responsável pelos pacotes RTS e CTS, e parte do acesso ao meio com os protocolos DCF e EDCA;
3. **Physical Layer:** abstração da camada PHY do Wi-Fi, modelando o erro na recepção dos pacotes (dependendo da qualidade do sinal recebido);
4. **Channel Layer:** modela a conexão entre as camadas PHY de diferentes dispositivos, além de simular os efeitos de propagação do canal em fio.

Para realizar um teste do módulo, foi feita uma simulação utilizando os códigos de exemplos fornecidos no módulo. Foi simulado um cenário com um AP e uma STA, inicialmente separados por um metro de distância. Essa separação foi, então, aumentada até uma distância de 10 metros, com o objetivo de ilustrar a sensibilidade do 802.11ad em relação o efeitos de propagação. Para realizar a simulação foi usado o comando:

```
./waf --run "evaluate_dmg_throughput --dist=1 --simulationTime=60"
```

Como esse comando, a distância entre o *Access Point* e a estação (no caso, 1 metro) e o tempo total de simulação (60 s) foram configurados. As demais configurações disponíveis, como por exemplo o número máximo de pacotes, o tamanho de cada pacote e tipo de *socket* usado na conexão, foram deixadas nas opções padrão. Para criação do canal, foi usado o modelo de propagação de Friis do ns-3, o *FriisPropagationLossModel*, e um modelo de atraso, o *ConstantSpeedPropagationDelayModel*, que junto com o modelo *SensitivityModel60GHz*, compõem a modelagem da propagação em 60 GHz. O resultado da simulação, que já avalia a vazão útil (*throughput*) para diferentes valores de MCS, é mostrado na Figura 4. As seguintes observações podem ser apontadas:

- MCS 1 (SC PHY, modulação  $\pi/2$ -BPSK, taxa de código 1/2 e taxa de enlace teórica de 385 Mbps): é mais robusto por usar modulação de ordem menor (manteve a taxa para distâncias maiores), contudo com menor taxa de transmissão;
- MCS 11 (SC PHY, modulação  $\pi/2$ -16-QAM, taxa de código 5/8 e taxa de enlace teórica de 3850 Mbps): tem maior taxa de transmissão que as MCSs 0 e 18, contudo, não é robusto ao aumento da distância comparado ao OFDM (MCS 18), mesmo com mais proteção do codificador de canal (maior taxa de código que a do MCS 18);
- MCS 18 (OFDM PHY, modulação 16-QAM, taxa de código 1/2 e taxa de enlace teórica de 2772 Mbps): menos protegido pelo codificador de canal que a MCS 11, mas tem maior robustez à distancia devido a proteção contra multipercursos do OFDM;
- MCS 24 (OFDM PHY, modulação 64-QAM, taxa de código 13/16, e taxa de enlace teórica de 6756,75 Mbps): mesmo com alta taxa de código (maior proteção), a modulação de alta ordem promove alta taxa de transmissão ao custo de baixa robustez à distância.



**Figura 4. Resultados da simulação realizada, exibindo o *throughput* entre AP e STA para diferentes distâncias e MCSs. Fonte: Autores.**

## 5. Conclusão

Este trabalho apresentou as principais características do protocolo 802.11ad, o padrão mmWave para altas taxas de dados da família 802.11, bem como sua implementação no ns-3.

O caso de estudo evidenciou que, devido as características particulares dessa faixa, torna-se desafiador o projeto de sistemas capazes de lidar com as altas perdas, tanto no sentido de melhorar o *link budget*, como para conceber protocolos de camada MAC para os cenários específicos desses sistemas.

Além da sensibilidade do sistema em relação a distância, a simulação mostra que o 802.11ad foi capaz de atingir taxas no patamar de Gbps, contudo, ainda longe do requisito do eMBB (20 Gbps de *throughput* de pico). Não obstante, o padrão 802.11ad está sendo aperfeiçoado no IEEE 802.11ay, incluindo, entre outras, novas técnicas como MIMO e o aumento da banda via *channel bound* (ambas focadas no aumento de taxa de transmissão). Esse novo conjunto de especificações poderá dotar o 802.11ay a atingir taxas de transmissão em torno de 100 Gbps, com alcance por volta de 300 m, mesmo trabalhando em 60 GHz. O 802.11ay, poderia, então, atender a cenários urbanos eMBB, e poderia até substituir a topologia dos cabos *ethernet* em escritórios e residências.

Entender como o 802.11ad funciona é a chave para entender o 802.11ay, este último esta com o seu *draft 4.0* para ser aprovado em maio de 2019 pelo IEEE. Em trabalhos futuros, pretende-se realizar simulações em cenários mais complexos com modelos de deslocamento de usuários em ambientes *indoor* e com mais de um AP, mudando e testando os melhores parâmetros possíveis para uma comunicação estável e com baixa perda.

## 6. Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Esta pesquisa tornou-se possível graças ao Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

## Referências

- [whi 2017] (2017). 802.11ad - WLAN at 60 GHz A Technology Introduction. *rohde-schwarz*.
- [Alliance 2016] Alliance, W.-F. (2016). Wi-Fi CERTIFIED WiGig™: Wi-Fi® expands to 60 GHz. Disponível em <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-certified-wigig>.

- [Assasa and Widmer 2016] Assasa, H. and Widmer, J. (2016). Implementation and Evaluation of a WLAN IEEE 802.11Ad Model in Ns-3. In *Proceedings of the Workshop on Ns-3, WNS3 '16*, pages 57–64, New York, NY, USA. ACM.
- [ITU 2017] ITU (2017). ITU-R Rep. M.2410-0: Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s).
- [Nitsche and Cordeiro 2014] Nitsche, T. and Cordeiro, C. (2014). IEEE 802.11ad: Directional 60 GHz Communication for Multi-Gbps Wi-Fi.
- [TGad 2010] TGad (2010). TGad D0.1 - PHY/MAC Complete Proposal Specification. Disponível em [http://www.ieee802.org/11/Reports/tgad\\_update.html](http://www.ieee802.org/11/Reports/tgad_update.html).