

Uso do ns-3 como Ferramenta de Prototipagem de Sistemas 802.11ah

Eriberto de S. Silva¹, Victor da C. Silva¹, Daniel de L. Flor², Vicente A. de Sousa Jr.^{1,2*}

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

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

{eriberto.gppcom,victor.gppcom,danielflor,vicente.sousa}@ufrn.edu.br

Resumo. *As massive Machine-Type Communications (mMTC) podem dar um sentido muito abrangente as redes de comunicação, pois a comunicação entre máquinas automatizará ainda mais tarefas, promovendo customização, eficiência e redução de custo na indústria. Este artigo apresenta uma visão geral do protocolo IEEE 802.11ah, discutindo sua condição como alternativa para o caso de uso mMTC do 5G. São apresentadas as principais características das camadas PHY e MAC, assim como suas correspondentes implementações no simulador de rede ns-3. Por fim, é feita uma demonstração do uso do ns-3 como ferramenta de prototipagem dos sistemas 802.11ah por meio do recurso de visualização ahVisualizer do ns-3. A despeito da sua curva de aprendizagem, o ns-3 proporciona um arcabouço bem completo para concepção e teste de soluções para as redes 802.11 ah.*

Abstract. *Massive Machine-Type Communications (mMTC) can give a very broad sense to communication networks because the communication between machines will automate even more tasks, promoting customization, efficiency and cost reduction in the industry. This paper gives an overview of the IEEE 802.11ah protocol discussing its condition as an alternative to the 5GmMTC use case. The main characteristics of the PHY and MAC layers are presented, as well as their corresponding implementations in the ns-3 network simulator. Finally, a demonstration of the use of ns-3 as a tool of prototyping of the systems 802.11ah is made through the display feature ahVisualizer of ns-3. Despite its learning curve, ns-3 provides a very complete framework for designing and testing solutions for 802.11ah networks.*

1. Introdução

1.1. 802.11ah como opção para o 5G

Com a popularização das aplicações da Internet das Coisas (IoT), o número de dispositivos (sensores e atuadores) conectados a rede de comunicação cresce exponencialmente, tendo como previsão de serem 3,3 bilhões de dispositivos conectados em 2020 [Leyva-Mayorga et al. 2018].

De modo a atender essa e outras novas demandas para sistemas de comunicação sem fio, a quinta geração de redes móveis (5G) busca propor soluções de acordo com a necessidade

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

da aplicação. Por exemplo, pode-se priorizar a ampliação do alcance do sinal, o aumento do número de dispositivos conectados, da taxa de dados ou baixa latência, dependendo da demanda de cada serviço específico.

Esses diversos requisitos são agrupados pelo 5G em três casos de uso: *enhanced Mobile BroadBand* (eMBB), *Ultra-Reliable Low-Latency Communication* (URLLC) e *massive Machine-Type Communication* (mMTC). O eMBB deve suportar alta taxa de dados (100 Mbps por usuário e 20 Gbps de taxa agregada no ponto de acesso). O URLLC diz respeito a comunicações de baixa latência (<1 ms) e alta confiabilidade de transmissão e recepção dos dados (99.999% de sucesso na entrega de pacotes). Já o mMTC busca suportar pontos de acesso com cobertura extensa (10-15 km), um número massivo de dispositivos conectados (densidade de um milhão por km²), com um baixo consumo energético, para que a bateria desses dispositivos durem de 10 a 15 anos [ITU 2017].

Os requisitos do caso de uso mMTC estão alinhados com as necessidades da tecnologia IoT. A literatura sobre IoT costuma classificar os padrões de redes em dois grupos: *Wireless Personal Area Network* (WPAN), caracterizado pela baixa cobertura e alta taxa de dados, e *Low-Power Wide-Area Network* (LPWAN), com alta cobertura e baixa taxa de dados [Tian et al. 2016]. Uma comparação simples entre taxa de transmissão e cobertura de algumas tecnologias para IoT é mostrada na Figura 1.

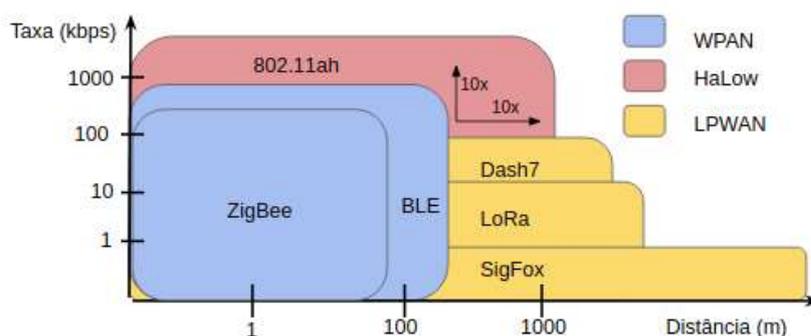


Figura 1: Comparação entre WPAN, LPWAN e IEEE 802.11ah. IEEE 802.11ah pode suportar longa distância com alta taxa de transmissão [Tian et al. 2018].

Como ilustrado da figura, o padrão IEEE 802.11ah, também conhecido Wi-Fi HaLow, busca misturar algumas características do WPAN e do LPWAN, podendo ser uma alternativa viável de solução para atender aos requisitos do mMTC. O HaLow suporta uma densa conectividade de dispositivos em uma única rede, enquanto possibilita altas taxas de transmissão de dados, se comparado com as outras tecnologias WPAN e LPWAN, além de um alcance elevado com um baixo consumo de energia.

1.2. Simuladores de Rede

O uso de softwares de simulação de sistemas é imprescindível na engenharia de concepção, pois a realização de um projeto de criação sem uma prototipagem antecipada é uma ação extremamente arriscada, que pode influenciar negativamente no cronograma do projeto, em seu custo, na complexidade, na precisão e na estrutura do sistema concebido. No caso do mMTC, a densa conectividade de dispositivos torna inviável a configuração e a análise de uma rede sem o auxílio de simuladores, devido ao alto custo de adquirir milhares de dispositivos e o difícil trabalho de configuração e teste da rede.

Para se ter uma ideia, as especificações técnicas do IEEE 802.11ah foram definidas com várias decisões sendo tomadas com base em estudos de desempenho por meio de

simuladores¹.

O ns-3 é um simulador de redes gratuito, amplamente utilizado em pesquisas e em meios educacionais por possuir código aberto e uma comunidade ativa na solução de problemas e discussão de dúvidas. Ele possui módulos para diversos sistemas, como o 4G LTE e o Wi-Fi, que foi utilizado como base para o desenvolvimento do módulo do IEEE 802.11ah, atendendo muitos requisitos do Wi-Fi HaLow [Tian et al. 2016].

Diante da importância da simulação para o projeto e o aperfeiçoamento das redes mMTC, este trabalho apresenta um estudo do padrão IEEE 802.11ah, bem como da sua implementação em ns-3. O trabalho está organizado como a seguir. A Seção 2 introduz as características do protocolo IEEE 802.11ah. As Seções 3 e 4 apresentam as características da implementação e o teste do módulo IEEE 802.11ah no ns-3, respectivamente. Por fim, a Seção 5 apresenta a conclusão e as perspectivas de futuros trabalhos.

2. IEEE 802.11ah (Wi-Fi HaLow)

O padrão 802.11ah começou a ser desenvolvido pelo IEEE em 2010 no *Task Group* (TGah), e foi finalizado em 2016 com o lançamento da tecnologia comercialmente conhecida como Wi-Fi HaLow². O padrão surgiu com objetivo de ser um protocolo capaz de prover conectividade em rede densa de dispositivos, assim como garantir cobertura extensa e eficiência energética [Kraemer and Stephens 2010]. No ano de lançamento, em 2016, o TGah apresentou diversas novidades técnicas em relação ao Wi-Fi a fim de suportar esses requisitos. Esta seção descreve as principais características nessas duas camadas.

2.1. Camada PHY

A camada física do IEEE 802.11ah herdou e adaptou as características das tecnologias 802.11ac e 802.11n de modo que pudesse atuar na banda de sub-1GHz, fazendo proveito desse artifício para obter um maior alcance devido à sua operação em baixas frequências.

O 802.11ah possui largura de banda de canal de 1, 2, 4, 8 e 16 MHz, correspondentes a dez vezes menos que as larguras do padrão 802.11ac. São suportados diversos esquemas de modulação e codificação (*Modulation and Coding Schemes - MCS*), do MCS0 até MCS10. A escolha do MCS poderá mitigar alguns efeitos degradantes do sinal decorrentes do canal, como o ruído, a interferência ou o desvanecimento, enquanto garante a melhor taxa de dados possível.

Operar com as larguras de banda de canal descritas acima e em portadoras sub 1-GHz torna o Wi-Fi HaLow capaz de obter ganhos acima de 24 dB quando comparado aos padrões que operam em frequências mais altas, 2,5 GHz e 5 GHz [Park 2015]. Esse ganho pode ser utilizado como forma de se obter maior cobertura e menor consumo energético. Porém, um dos problemas do HaLow é sua frequência de operação não segue um padrão mundial, por exemplo, nos EUA a faixa destinada é de 902 a 928 MHz, enquanto na China é de 755 a 757 MHz.

¹ Isso pode ser comprovado ao acessar o status do desenvolvimento do padrão pelo IEEE em http://www.ieee802.org/11/Reports/tgah_update.htm, principalmente os documentos que definem os requisitos funcionais e os métodos de avaliação.

² Enquanto as especificações técnicas das camadas PHY e MAC são responsabilidade do IEEE, fica para o Wi-Fi Alliance (uma rede de empresas) todo processo de certificação de produtos e difusão da marca Wi-Fi. Mais informações sobre as tecnologias do Wi-Fi Alliance visite: <https://www.wi-fi.org/who-we-are/current-work-areas>.

2.2. Camada MAC

Um desafio do 802.11ah é a conexão de um número expressivo de dispositivos. Essa característica, no entanto, influenciará na taxa de transmissão da informação útil devido a transmissão de mais sinalização. Mesmo sendo materializado por pequenos pacotes, o *overhead* de sinalização é significativo devido à múltiplas e desordenadas transmissões. Além disso, em uma rede predominantemente de sensores com baterias pequenas, é essencial que haja um controle eficiente no consumo de energia. Os dispositivos devem otimizar o sua operação de modo a maximizar o tempo em repouso (*sleep*), quando não estiverem transmitindo ou recebendo informações. Essas funcionalidades estão alinhadas com as demandas específicas do mMTC, mas demandam uma verdadeira reformulação da camada MAC dos sistemas Wi-Fi, a qual é descrita nesta Seção.

2.2.1. Association Identifier (AID)

Para suportar uma rede densa, aumentou-se a quantidade de bits do AID (identificador de um dispositivo na rede) para 13 bits, tornando-o capaz de endereçar 8192 estações [Khorov et al. 2015].

O IEEE 802.11ah desenvolveu uma hierarquia para organizar seus dispositivos, ilustrada na Figura 2. As estações são divididas igualmente em quatro páginas, cada uma com 8 blocos, cada bloco com 32 sub-blocos e cada sub-bloco com oito estações. Assim, os 13 bits são divididos em 2 para as páginas, 3 para os blocos, 5 para os sub-blocos e 3 para as estações. Essa divisão foi idealizada de modo a diminuir o consumo de energia dos dispositivos. As estações que precisam despertar com maior frequência ficarão em um mesmo bloco, de modo que as dos outros blocos não precisam sair do modo repouso quando houver sinalização de dados pendentes.

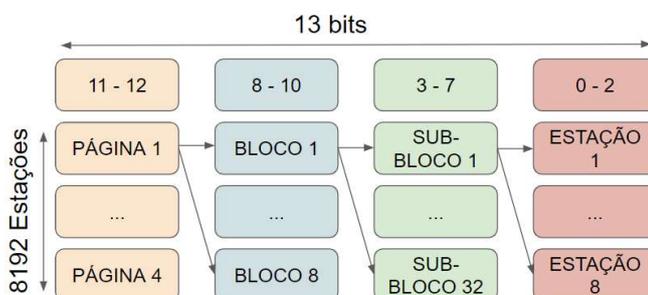


Figura 2: Hierarquia AID: 8192 estações divididas em páginas, blocos e sub-blocos [Khorov et al. 2015].

2.2.2. Restricted Access Window (RAW)

O principal mecanismo de acesso do IEEE 802.11ah é o RAW. As estações são agrupadas em diferentes RAWs, criando janelas temporais de acesso restrito, em que somente estações daquele RAW podem receber *slots*. Fora dos RAWs, o canal pode ser acessado por qualquer estação. A disputa por *slots* é via acesso a canal distribuído (EDCA), que tem filas de transmissão com tempos de espera diferenciados por prioridade de tráfego. A diferença no IEEE 802.11ah é que existem dois estados de *backoff*, com o primeiro acontecendo fora das janelas RAWs, e o segundo dedicado somente as estações pertencentes a cada RAW.

A quantidade e a duração dos *slots* e o tempo de início de cada RAW são informados no *beacon*³ no campo *RAW Parament Set* (RPS). Também é informado quantos RAWs são alocados a cada intervalo de *beacon*, como ilustrado na Figura 3. As especificações técnicas não definem a estratégia de montagem dos RAWs (quantidade, duração e alocação de estações), ficando como um algoritmo a ser concebido por cada fabricante.

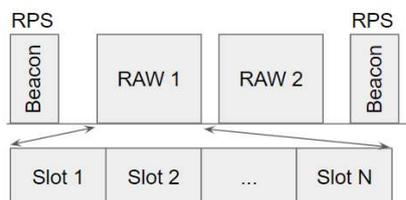


Figura 3: Mecanismo RAW informado em cada RPS: alguns RAWs de N slots alocados entre beacons [Tian et al. 2016].

A Tabela 1 lista outras funcionalidades da camada MAC do IEEE 802.11ah, resumindo o funcionamento e mostrando qual problema que cada uma busca solucionar.

Tabela 1: Outras funcionalidades da Camada MAC do IEEE 802.11ah. Mais informações em [Khorov et al. 2015, Park 2015].

	Característica	Objetivo
<i>Target Wake Time</i> (TWT)	AP busca dados em <i>buffer</i> antes da STA acordar	Economia de bateria
<i>Bidirectional Transmission Oportunity</i> (BTXOP)	Um mesmo TXOP para enviar e receber dados	Economia de bateria
<i>Short beacons</i>	Beacon com informações não essenciais	Evitar <i>overhead</i>
<i>Sleep Time</i>	Fator multiplicador para aumentar tempo associado ao AP	Economia de bateria
<i>Short MAC Frame</i>	Mac frame novo, sem QoS, HT e <i>Duration</i> /ID	Evitar <i>overhead</i>
<i>Fast Authentication and Association</i>	Organiza STA para diminuir tempo de associação ao AP	Evitar colisões

3. Prototipando o HaLow no ns-3

Em 2016, Le Tian, da Universidade de Antwerp, lançou o módulo do IEEE 802.11ah para o ns-3 [Tian et al. 2016]. O trabalho foi baseado no módulo do 802.11n, com modificações nas camadas MAC e PHY.

O módulo suporta 10 MCSs (MCS0 até MCS9) e as larguras de bandas 1, 2, 4, 8 e 16 MHz. Os modelos de erro *Nist* e *Yans* foram modificados para suportar a modulação 256QAM. Há também a inclusão de modelos de propagação específicos definidos por [Hazmi et al. 2012], sendo dois para ambiente *outdoor* e um para *indoor*. Enquanto o modelo *indoor* é o mesmo do 802.11n, os dois modelos *outdoor* assumem diferentes alturas da antena transmissora, um na altura do topo de um prédio, e o outro 15 m acima. Foram implementados também: o *Fast Association*, um modelo de consumo de energia para os dispositivos, a distribuição dos STAs em hierarquias e o RAW, configurados por meio de uma interface de configuração dinâmica [Tian et al. 2018]. Além da MCS10, o TWT *Target Wake Time* também não está implementado, mas os desenvolvedores planejam adicionar futuramente. A Figura 4 ilustra as classes do módulo padrão do Wi-Fi e suas interações. É dado destaque em cinza para os blocos que foram alterados (ou foram desenvolvidos) na construção do módulo IEEE 802.11ah.

³O *beacon* é um quadro de gerenciamento de redes baseadas no protocolo IEEE 802.11, contendo os principais parâmetros da rede, entre eles o RPS.

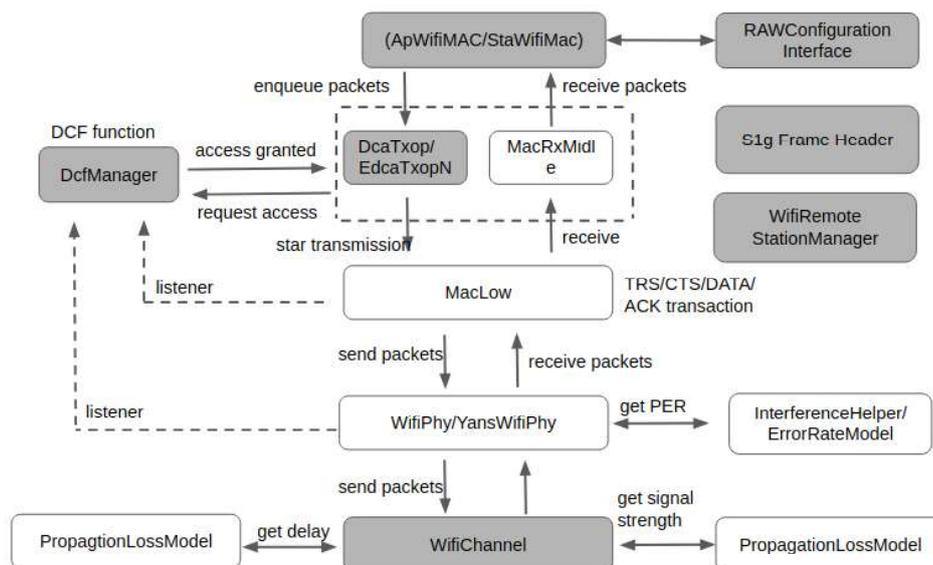


Figura 4: Módulo IEEE 802.11ah no ns-3: classes e suas interações (blocos em cinza foram alterados ou são novos) [Tian et al. 2018].

Em 2018, foi lançado o *ahVisualizer* [Sljivo et al. 2018], uma interface gráfica para auxiliar na compreensão das simulações do módulo IEEE 802.11ah do ns-3. Apesar de ser uma ferramenta a parte, não necessária para a utilização do módulo, seu uso é muito proveitoso para iniciantes no ns-3 e no sistema IEEE 802.11ah.

4. Instalação e teste do módulo IEEE 802.11ah do ns-3

O módulo 802.11ah do ns-3 está disponível em <https://github.com/imec-idlab/IEEE-802.11ah-ns-3>, sendo necessário a instalação de algumas dependências, conforme a descrição na página do *GitHub*. Após clonagem dos arquivos, caso queira compilar o código no modo *debug*, o seguinte comando de configuração deve ser usado⁴:

```
CXXFLAGS="-std=c++11 -O0 -ggdb -g3" ./waf configure --disable-examples --disable-tests --build-profile=debug
```

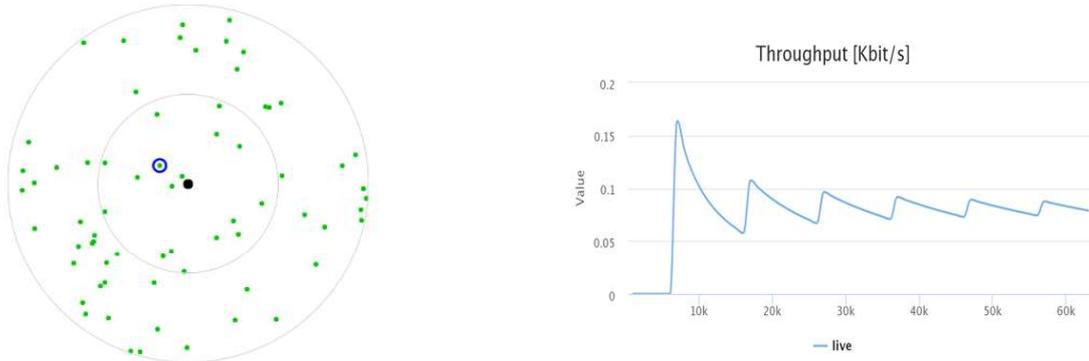
Já a ferramenta *ahVisualizer* pode ser instalada a partir de <https://github.com/imec-idlab/ahVisualizer>. Também é necessário instalar o *nodejs* com o seguinte comando: `apt-get -y install npm`.

Um teste básico do módulo foi feito em um cenário com um AP localizado no centro de um círculo de raio de 200 m, no qual 68 câmeras estão espalhadas aleatoriamente. Esse cenário foi escolhido por ser o exemplo padrão do módulo. A ferramenta *ahVisualizer* foi utilizada para visualizar e obter métricas da simulação. Para executar o exemplo, deve-se primeiro, a partir de um terminal, entrar no diretório `“/IEEE-802.11ah-ns-3/ahVisualizer/forwardsocketdata”` e digitar `“nodejs index.js”`. Em seguida, deve-se abrir um navegador e acessar o endereço `http://localhost:8080`, de forma a iniciar o ambiente de visualização. Em seguida, deve-se abrir um novo terminal, entrar no diretório do simulador e executar o seguinte comando `“./waf --run test”`. O navegador deverá mostrar a execução da simulação em tempo real. Note que, para esse exemplo, não foi feita nenhuma alteração de parâmetros.

A Figura 5 mostra dois resultados da simulação extraídos do *ahVisualizer*. A Figura 5a

⁴Este comando difere do que está no *GitHub*, mas foi sugerido pelos desenvolvedores do código em troca de e-mail com os autores deste artigo. Somente com esse comando foi possível *debugar* os exemplos do módulo.

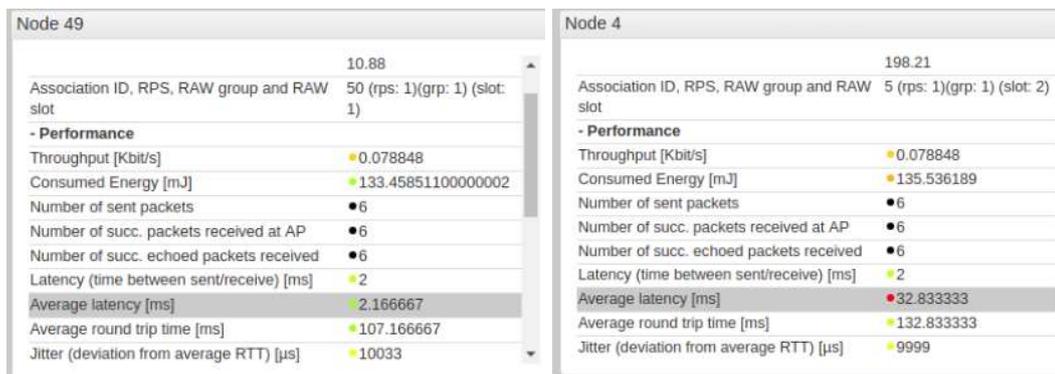
mostra o cenário, diferenciando o AP no centro e as câmeras distribuídas por todo o círculo. A Figura 5b mostra a variação da taxa de transmissão para uma câmera selecionada (também destacada na Figura 5a), os picos indicam os momentos que a estação enviou pacotes para o AP.



(a) AP no centro e 68 estações com posições aleatórias em um raio de 200m. (b) Variação da taxa de transmissão da estação AID 1.

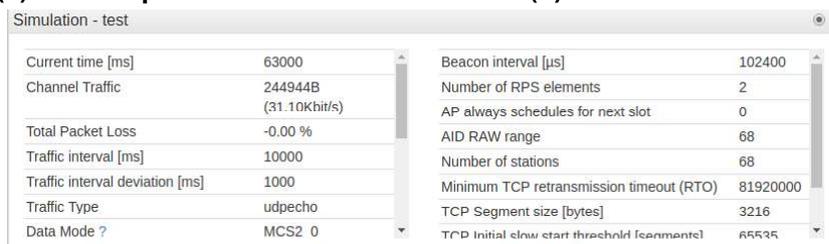
Figura 5: Possíveis análises que podem ser retiradas do *ahVisualizer*.

A Figura 6 mostra a comparação da latência média entre uma câmera distante e uma próxima ao AP. Pode-se verificar que essa diferença é bastante expressiva. Além da latência, estão disponíveis: consumo de energia, pacotes enviados, recebidos e perdidos, entre outras informações. Também mostra uma parte da tela principal do *ahVisualizer*, ilustrando a riqueza de informações disponíveis. É importante destacar que as configurações da simulação são feitas ao editar diretamente o código do ns-3 ou via passagem de parâmetros na linha de comando, e não no *ahVisualizer*.



(a) Câmera próximo ao AP.

(b) Câmera distante do AP.



(c) Parâmetros de simulação.

Figura 6: Possíveis análises que podem ser retiradas do *ahVisualizer*.

5. Conclusão

Este artigo apresentou características do IEEE 802.11ah comparadas as tecnologias WPAN e LPWAN, bem como discutiu como o 802.11ah pode ser usado para atender o 5G mMTC. Foi apresentado o módulo ns-3 do IEEE 802.11ah, indicando as mudanças e comparado-o aos módulos do tradicionais Wi-Fi. Adicionalmente, um caso de uso do simulador foi mostrado, juntamente com a ferramenta *ahVisualizer*. Foi possível ilustrar a maturidade dos esforços dos desenvolvedores do ns-3 para disponibilizar uma modelagem de acordo com as especificações do IEEE 802.11ah, bem como ferramentas para facilitar a análise dos resultados de simulações mais simples.

Além de uma avaliação de desempenho de diferentes configurações da tecnologia IEEE 802.11ah, a concepção de soluções dinâmicas para ajuste autônomo de seus parâmetros é foco dos próximos trabalhos.

Referências

- [Hazmi et al. 2012] Hazmi, A., Rinne, J., and Valkama, M. (2012). Feasibility study of IEEE 802.11ah radio technology for IoT and M2M use cases. In *2012 IEEE Globecom Workshops*. 5
- [ITU 2017] ITU (2017). ITU-R Rep. M.2410-0: Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s). 2
- [Khorov et al. 2015] Khorov, E., Lyakhov, A., Krotov, A., and Guschin, A. (2015). A survey on IEEE 802.11 ah: An Enabling Networking Technology for Smart Cities. *Computer Communications*, 58. 4, 5
- [Kraemer and Stephens 2010] Kraemer, B. and Stephens, A. (2010). Project Authorization Request (PAR) of Task Group 802.11ah. <http://www.ieee802.org/11/PARs/P802.11ah.pdf>. 3
- [Leyva-Mayorga et al. 2018] Leyva-Mayorga, I., Rodriguez, M., Pla, V., Martinez-Bauset, J., and Tello Oquendo, L. (2018). Adaptive access class barring for efficient mMTC. 1
- [Park 2015] Park, M. (2015). IEEE 802.11ah: Sub-1-GHz license-exempt operation for the internet of things. *Communications Magazine, IEEE*, 53:145–151. 3, 5
- [Sljivo et al. 2018] Sljivo, A., De Poorter, E., Hoebeke, J., Kerkhove, D., and Moerman, I. (2018). Interactive Web Visualizer for IEEE 802.11ah ns-3 Module. In *WNS3 '18 Proceedings of the 10th Workshop on ns-3*. 6
- [Tian et al. 2016] Tian, L., Deronne, S., Latré, S., and Famaey, J. (2016). Implementation and validation of an IEEE 802.11ah module for NS-3. 2, 3, 5
- [Tian et al. 2016] Tian, L., Famaey, J., and Latré, S. (2016). Evaluation of the ieee 802.11ah restricted access window mechanism for dense iot networks. In *2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*. 5
- [Tian et al. 2018] Tian, L., Sljivo, A., Santi, S., De Poorter, E., Hoebeke, J., and Famaey, J. (2018). Extension of the IEEE 802.11ah ns-3 Simulation Module. In *WNS3 '18 Proceedings of the 10th Workshop on ns-3*. 2, 5, 6