

B5GSim - Um Simulador para Redes Beyond 5G

Rodrigo Izidoro Tinini¹, Matias R. P. dos Santos⁴,
Gustavo Bittencourt Figueiredo⁴, Daniel Macêdo Batista², Carlos Kamienski³

¹Departamento de Ciência da Computação - Centro Universitário da FEI

²Departamento de Ciência da Computação - Universidade de São Paulo

³Centro de Matemática, Computação e Cognição - Universidade Federal do ABC

⁴Departamento de Ciência da Computação - Universidade Federal da Bahia

tinini@fei.edu.br, batista@ime.usp.br, matiasrps@ufba.br,

cak@ufabc.edu.br, gustavo@dcc.ufba.br

Abstract. *The use of Cloud and Fog Computing, Network Functions Virtualization and transport networks based on the enhanced Common Public Radio Interface protocol (eCPRI), are the pillars of future Beyond 5G (B5G) networks. By these technologies, such networks can operate energy-efficiently while providing wide coverage and high transmission rates to mobile users in large-scale network scenarios. However, as it is not trivial to build experimental scenarios for such networks, simulation tools are used to evaluate them. So, in this paper we present the B5GSim simulator, a specialist tool for the simulation of 5G and B5G networks.*

Resumo. *O uso de Computação em Nuvem e Névoa, Virtualização das Funções de Rede e redes de transporte baseadas no protocolo enhanced Common Public Radio Interface (eCPRI), são os pilares das futuras redes Beyond 5G (B5G). Por meio dessas tecnologias, tais redes podem operar de forma energeticamente eficiente enquanto oferecem ampla cobertura e altas taxas de transmissão aos usuários móveis em cenários de rede de grande escala. Entretanto, como não é trivial construir cenários de experimentação para tais redes, ferramentas de simulação são utilizadas para avaliá-las. Assim, neste artigo apresentamos o simulador B5GSim, uma ferramenta especialista na simulação de redes 5G e B5G.*

1. Introdução

A arquitetura Cloud Radio Access Network (CRAN) foi proposta como uma solução para a redução do consumo de energia e latência para a implantação das redes 5G. Na CRAN, isso é obtido por meio do desacoplamento das unidades de processamento de banda base (BaseBand Unit - BBU) das células da rede. Nesse sentido, as BBUs são centralizadas em uma nuvem computacional enquanto as células da rede são formadas por antenas de baixo consumo, chamadas de Remote Radio Heads (RRHs), responsáveis pela agregação dos sinais de banda base dos usuários e encaminhamento dos mesmos para a nuvem. Para garantir a latência mínima exigida em redes 5G para o processamento de banda base, uma rede de transporte chamada de *fronthaul* é responsável por conectar os RRHs com

as BBUs na nuvem. Para garantir altas taxas de transmissão dos dados e baixa latência, o *fronthaul* é implantado por meio de redes ópticas, passivas ou ativas.

Apesar dos ganhos energéticos, a CRAN impõe altas demandas no *fronthaul* e na nuvem, o que impossibilita seu uso nas futuras redes *Beyond 5G* (B5G). Assim, a utilização de arquiteturas híbridas surgiu como uma opção viável para garantir as vantagens energéticas da CRAN ao mesmo tempo em que a cobertura e disponibilidade da rede é aumentada.

A arquitetura Cloud-Fog RAN (CF-RAN) é uma arquitetura recentemente proposta para a implantação de redes 5G e B5G [Tinini et al. 2019]. Por meio do paradigma de computação em névoa (*Fog Computing*), ela provê a implantação de nós de processamento, chamados de nós de *fog*, ou nós de névoa, próximos aos RRHs para prover mecanismos de *offloading* do processamento realizado na nuvem, com vistas em diminuir a carga do *fronthaul* e da própria nuvem. Além disso, por meio do paradigma de Virtualização de Funções de Rede (Network Functions Virtualization - NFV), as BBUs são virtualizadas (virtual BBUs - vBBUs) e ativadas/desativadas tanto na nuvem, quanto na névoa, em função da demanda da rede. Tal ativação e desativação dinâmica de vBBUs provê grandes reduções no consumo energético da rede.

Em redes B5G, outro importante aspecto operacional é o particionamento das funções de banda base (*Functional Splitting - FS*). Esse particionamento realiza a quebra da cadeia de processamento de banda base de cada RRH em duas ou mais cadeias, com o objetivo de diminuir ainda mais a latência de algumas funções de banda base. Assim, cada uma das cadeias resultantes do particionamento pode ser processada em vBBUs presentes nos nós de *fog* ou nuvem. O nível, ou ponto de particionamento, é uma importante decisão na operação de arquiteturas CF-RAN, pois cada nível de particionamento impacta na latência da rede, no consumo de energia e na carga imposta na rede de transporte.

Tal particionamento se dá pelo uso do padrão *enhanced Common Public Radio Interface - eCPRI*¹. O eCPRI é um padrão utilizado para a transmissão de sinais de banda base através da rede de transporte entre RRHs e vBBUs. Além disso, na utilização do eCPRI, a rede de transporte é dividida entre *midhaul*, que conecta os RRHs às funções de processamento locais, ou seja, os vBBUs nos nós de *fog*, e o *fronthaul*, que agora realiza a conexão entre os nós de *fog* e a nuvem.

O estudo de mecanismos de gerenciamento dos recursos de redes B5G é importante para o desenvolvimento das mesmas. Entretanto, por conta da magnitude de tais redes, torna-se inviável a construção de ambientes experimentais em larga escala.

Assim, este artigo apresenta uma ferramenta de simulação chamada B5GSim. O B5GSim é um simulador especialista em redes 5G e B5G de larga escala, com a capacidade de simular a operação das células da rede, a operação dos nós de processamento (nuvem e névoa), gerenciamento e controle do *fronthaul* e o *midhaul*, além de prover mecanismos para a decisão de ativação, desativação e posicionamento das vBBUs e escolha do ponto de particionamento de cada RRH.

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma: A Seção 2 apresenta os trabalhos relacionados; na Seção 3, a arquitetura CF-RAN é apresentada e seu suporte

¹<http://www.cpri.info/spec.html>. Acesso em 15 de Abril de 2022.

às redes B5G é discutido; o simulador B5GSim é apresentado na Seção 4; resultados de simulações são apresentados na Seção 5; por fim, a Seção 6 conclui o artigo.

2. Trabalhos Relacionados

O uso de simuladores para resolver problemas de rede e realizar prototipagem de cenários é muito popular e desperta grande interesse na indústria e na academia [Jao et al. 2018, Patriciello et al. 2019, Nardini et al. 2020]. No entanto, a maioria dos simuladores atuais têm aplicação para problemas muito específicos, não respondendo aos requisitos atuais para redes 5G/B5G.

Os simuladores de nível de sistema propostos em [Mohsen and Hassan 2015, Mezzavilla et al. 2018, Rupp et al. 2016] são exemplos de alternativas para redes móveis com propostas muito específicas para determinados problemas e cenários. Por exemplo, em [Mohsen and Hassan 2015], os autores desenvolveram um simulador baseado no *Vienna's LTE* com objetivo de avaliar cenários de borda de rede (*edge computing*) com transmissão conjunta de usuários de forma centralizada através de agendamento e agregação em portadoras globais. A modelagem de rede possível neste simulador possibilita criar células de tamanhos e tipos variáveis, configuração de parâmetros de nuvens e inclusão escalável de RRHs. Apesar desses benefícios, o simulador não possui escopo voltado para simulações em camadas mais baixas, como a de enlace. Ademais, é necessário uma ferramenta que permita avaliações computacionais em redes B5G eficientes, que permitam prototipação para fins gerais e que permita simular e alterar parâmetros de camadas inferiores na rede. As limitações apresentadas são contornadas no B5GSim.

Outro simulador aplicado a redes 5G é o GTEC 5G [Domínguez-Bolaño et al. 2016]. O simulador é voltado para testes de camada de enlace utilizando multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) e sinais de multiportadora de banco de filtros (FBMC). A ideia do simulador é possuir modularidade, assim a inclusão de novas funcionalidades é facilitada. O núcleo do simulador foi desenvolvido para possibilitar a implementação de funções do transmissor e do receptor, além de possibilitar a utilização de diferentes modelos de canais e métricas de avaliação. Porém, apesar de permitir simulações nas camadas 1 e 2 da rede, o simulador não integra as novas funcionalidades necessárias para avaliar a evolução do B5G.

Específico para ambientes de computação em névoa em redes 5G/B5G, foi proposto o EdgeCloudSim [Lopes et al. 2017]. Baseado no CloudSim, este simulador é comumente usado para cenários de computação em nuvem e avaliação de desempenho de *data centers*. O seu foco é simular comportamentos e eventos de *Edge Computing* com análises centradas em análise de mobilidade, servidores de borda e modelos de enlace.

Em [Tinini et al. 2020], alguns dos autores deste trabalho apresentaram o simulador 5GPy. O 5GPy é construído em Python, utilizando-se do módulo Simpy² e é especialista na avaliação de desempenho de redes 5G. Entretanto, ele não possui suporte ao protocolo eCPRI e a diferentes pontos de particionamento para os RRHs, sendo capaz de simular apenas um *fronthaul* que opera com tráfego constante (*Constant Bit Rate (CBR)*). Assim, o B5GSim, proposto neste trabalho, estende o 5GPy, adicionando a capacidade de simulação do protocolo eCPRI e de redes de transporte, isto é o *fronthaul* e *midhaul*, comutadas por pacotes.

²<https://simpy.readthedocs.io/>. Acesso em 15 de Abril de 2022.

3. Arquitetura CF-RAN e sua operação

A arquitetura CF-RAN é formada por 3 camadas: A camada de rádio, a camada de transporte e a camada de processamento. Na camada de rádio, encontram-se os RRHs. Na camada de transporte, uma rede óptica, passiva ou ativa, é responsável por conectar a camada de rádio à camada de processamento. Nesse sentido, a rede de transporte é dividida em duas interfaces de transporte, o *midhaul* e o *fronthaul*. O *midhaul* é responsável por conectar os RRHs aos nós de *fog*, sendo utilizado quando há o particionamento de funções ou quando todo o processamento de banda base é realizado exclusivamente pela névoa. O *fronthaul* é utilizado para conectar os nós de *fog* à nuvem.

Em relação à operação da CF-RAN, para cada RRH ativo, deve ser decidido o ponto de particionamento da cadeia de seu processamento de banda base e onde a vBBU que processa suas funções será posicionada, i.e., na nuvem ou na névoa. Além disso, como o *midhaul* e o *fronthaul* operam sob redes ópticas, um canal óptico deve ser alocado para cada RRH. Caso a rede seja passiva, o problema de formação de VPONs deve ser resolvido em conjunto com a decisão de particionamento e posicionamento de sua vBBU. Caso a rede seja ativa, os problemas de RWA e RMSA devem ser resolvidos para redes WDM ou elásticas, respectivamente. Na seção seguinte será apresentado como a operação da CF-RAN pode ser modelada e simulada por meio da ferramenta B5GSim.

4. B5GSim

O simulador B5GSim é uma ferramenta de simulação baseada no paradigma de orientação a eventos e desenvolvida a partir do módulo Simpy do Python. O B5GSim é organizado nos seguintes módulos: Network, Algorithms, Configuration, Utility e Simulation.

O módulo Network contém as classes base para os RRHs, operando tanto sob o padrão CPRI quanto pelo padrão eCPRI, nós da rede, tais como switches ópticos ativos e passivos, e nós de processamento, seja nuvem ou névoa. A maioria das classes utilizadas para a modelagem da rede está presente no módulo Network. O diagrama de classes do simulador, contendo em sua maioria as classes do módulo Network, é apresentado na Figura 1.

O simulador B5GSim tem como foco a simulação de redes móveis e a otimização de sua operação. Assim, o simulador conta com o módulo Algorithms, onde os algoritmos de otimização a serem executados na rede devem ser implementados. Esses algoritmos são invocados durante a execução da simulação, por meio da classe Control Plane, que é invocada tanto por RRHs quanto por nós de processamento, conforme apresentado no diagrama de classes da Figura 1. A versão atual da ferramenta conta com os seguintes algoritmos de otimização:

- *Cloud-First (CF)*: Para cada RRH da rede, suas vBBUs são posicionadas na nuvem primeiramente, enquanto há capacidade na nuvem. Após a capacidade da nuvem se exaurir, os nós de *fog* são ativados e cada vBBU é posicionada no nó de *fog* diretamente conectado ao seu RRH.
- *Cloud-Only (CO)*: Este algoritmo não considera os nós de *fog* e apenas posiciona as vBBUs na nuvem. Caso a capacidade da nuvem se exaure, novas vBBUs são enfileiradas até que haja capacidade para processá-las.

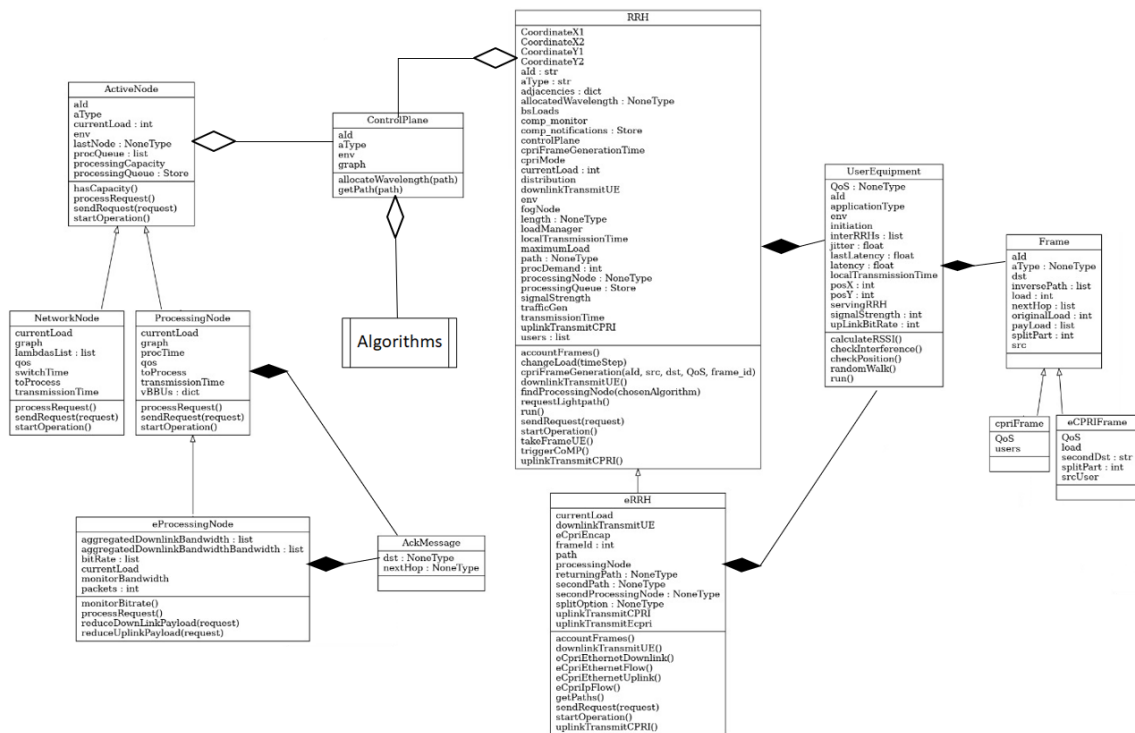


Figura 1. Diagrama de classes do B5GSim

- *Cloud-First Least Loaded Fog (CF-LLF)*: As vBBUs são primeiramente posicionadas na nuvem até a capacidade da mesma se exaurir; após isso, as vBBUs são postas nos nós de *fog* menos carregados.
- *Cloud-First Most Loaded Fog (CF-LLF)*: As vBBUs são primeiramente posicionadas na nuvem até a capacidade da mesma se exaurir; após isso, as vBBUs são postas nos nós de *fog* mais carregados.
- *Fog First*: As vBBUs são primeiramente posicionadas nos nós de *fog* diretamente conectados aos seus RRHs; após a capacidade desses nós se exaurir, as próximas vBBUs são colocadas nos nós de *fog* com mais capacidade livre.

As configurações de uma simulação são realizadas no arquivo `configurations.xml`, que implementa o módulo `Configuration`. Nesse arquivo o usuário pode definir os parâmetros utilizados em sua simulação por meio do formato XML, além de definir os elementos e a topologia da rede. Por exemplo, o usuário pode definir se a rede operará segundo o padrão CPRI ou eCPRI, além de definir o tipo de PDU transmitido por esses padrões.

O simulador permite que cada RRH transmita quadros eCPRI encapsulados em quadros Ethernet ou pacotes IP na rede de transporte. No contexto da rede de transporte, o usuário define a quantidade de RRHs na rede, os nós de nuvem e os nós de *fog*.

A rede de transporte (*midhaul e fronthaul*), é definida por meio de um grafo e pela definição do tipo dos nós intermediários da rede, podendo ser nós de uma rede óptica passiva ou de uma rede óptica ativa. Após definir os elementos da rede, a topologia é definida por meio de um grafo ponderado. Utilizando-se do módulo `networkx`³, o grafo

³<https://networkx.org/>. Acesso em 15 de Abril de 2022

é então construído e usado pelo simulador para gerenciamento da rede e execução de diferentes algoritmos, como caminhos mínimos e fluxo máximo a custo mínimo, para citar alguns exemplos. Nesse sentido, por meio de agregação, cada elemento da rede possui o grafo que representa a rede como um elemento agregado.

A Figura 2 é um excerto do arquivo `configurations.xml` e ilustra um exemplo de simulação.

```
34 <!-- RRHs -->
35 <RRHs>
36   <RRH aId = "0" fogNode = "None" />
37 </RRHs>
38
39 <!-- Network nodes -->
40 <NetworkNodes>
41   <Node aId = "0" aType = "Switch" capacity = "10000" qos = "Standard" />
42   <Node aId = "1" aType = "Switch" capacity = "10000" qos = "Standard" />
43   <Node aId = "2" aType = "Switch" capacity = "10000" qos = "Standard" />
44   <Node aId = "3" aType = "Switch" capacity = "10000" qos = "Standard" />
45 </NetworkNodes>
46
47 <!-- Processing nodes -->
48 <ProcessingNodes>
49   <Proc aId = "0" aType = "Cloud" capacity = "100" qos = "Standard" />
50   <Proc aId = "1" aType = "Fog" capacity = "100" qos = "Standard" />
51 </ProcessingNodes>
52
53 <!-- Control plane nodes -->
54 <ControlPlane>
55   <CP aId = "0" aType = "ControlPlane" />
56 </ControlPlane>
```

Figura 2. Exemplo de configuração no B5GSim

O módulo Utility possui os métodos necessários para instanciar os objetos de uma simulação com base no arquivo de configurações. O módulo Simulation, por fim, dispara o início de uma simulação e, ao fim dela, invoca os métodos necessários para geração de resultados.

5. Resultados

Apresentamos os resultados referentes à avaliação do protocolo eCPRI em comparação com o protocolo CPRI. Os resultados apresentam a utilização total de banda do *fronthaul* e *midhaul* para diferentes tamanhos de rede. Foi simulada uma rede contando com um nó de nuvem, 5 nós de *fog* e operando com o algoritmo *CF*. A quantidade de RRHs simulados foi de 100 até 1000, com cada um gerando 100Mbps, totalizando uma demanda de 100Gbps na rede. A nuvem possui capacidade de rede para atender até 50Gbps, e cada nó de *fog*, até 10Gbps. Em relação ao particionamento da rede, foi incorporado ao módulo Algorithms um modelo de Programação Linear Inteira (PLI) que resolve otimamente o ponto de particionamento de cada RRH em função do protocolo eCPRI.⁴ Tal PLI ainda não está disponível publicamente pois se trata de trabalho em andamento dos autores.

As Figuras 3a) e b) ilustram o consumo de banda, tanto no *downlink* quanto no *uplink*, gerado pelos protocolos CPRI e eCPRI. É possível notar que a utilização do protocolo eCPRI, juntamente com um algoritmo ótimo de escolha de particionamento, proporciona uma operação muito eficiente no consumo de banda, gerando grandes reduções e até mesmo um crescimento muito pequeno na utilização do *fronthaul* e *midhaul* mesmo quando a rede cresce significativamente.

⁴Os diversos pontos de particionamento do protocolo eCPRI podem ser encontrados em http://www.cpri.info/downloads/eCPRI_v_2.0_2019_05_10c.pdf. Acesso em 15 de Abril de 2022.

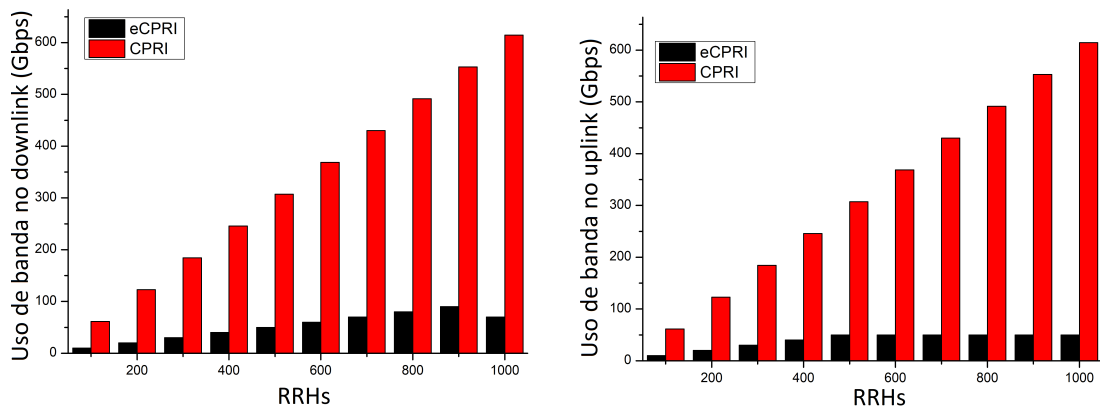


Figura 3. a) Consumo de banda no downlink, b) Consumo de banda no uplink

A Figura 4a) apresenta os pontos de particionamento selecionados para cada carga de trabalho da rede. Note que a melhor escolha para uma carga baixa é a opção sem particionamento, porém, conforme a rede cresce, o particionamento se torna mais comum para aliviar a carga na rede de transporte. A Figura 4b) apresenta os tempos de execução do simulador. É possível notar que a ferramenta é capaz de simular cenários de grande escala em poucos segundos. O crescimento notado a partir da quantidade de 900 RRHs se dá em função do algoritmo sendo usado nessa simulação, um modelo PLI, que não escala eficientemente para grandes valores de entrada.

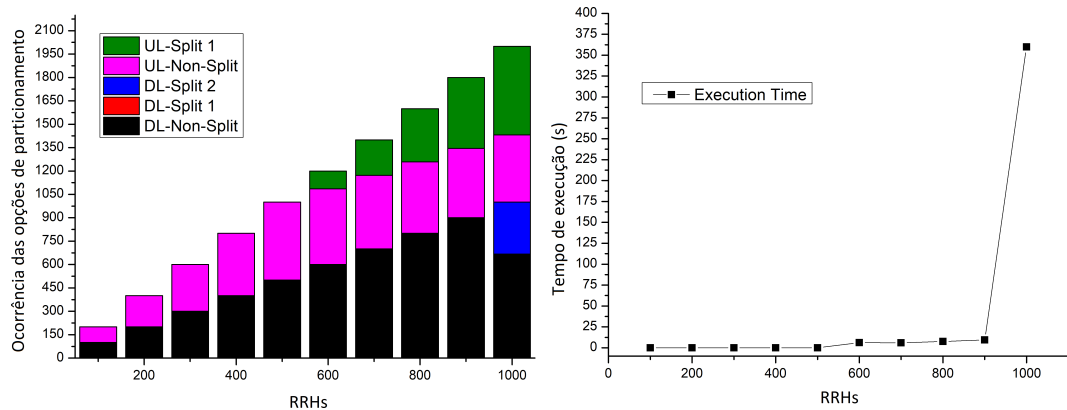


Figura 4. a) Distribuição das opções de particionamento b) Tempo de execução

6. Conclusão

Neste artigo foi apresentado o simulador B5GSim, especialista na simulação de redes 5G e B5G. Por meio dele, os operadores de telecomunicação podem planejar suas redes sem a necessidade de construir cenários de experimentação não-triviais e caros. Além disso, ele pode ser usado por pesquisadores que desejam propor novos algoritmos e protocolos para a operação das redes 5G e B5G.

7. Código, vídeo, manual e demonstração

O código do simulador pode ser encontrado em: <https://github.com/rodrigo-tinini/5GPy-Simulator>. O manual pode ser encontrado em

<https://github.com/rodrigo-tinini/5GPy-Simulator/blob/master/manulB5GSim.pdf>. O vídeo demonstrando seu uso está em: https://youtu.be/L_a7naQeXgs. O simulador poderá ser demonstrado por meio da sua execução, no computador do apresentador, reproduzindo os mesmos experimentos descritos neste artigo.

Agradecimentos

Esta pesquisa é parte do INCT da Internet do Futuro para Cidades Inteligentes, financiado por CNPq (proc. 465446/2014-0), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e FAPESP (procs. 14/50937-1 e 15/24485-9).

Referências

- Domínguez-Bolaño, T., Rodríguez-Piñeiro, J., García-Naya, J. A., and Castedo, L. (2016). The GTEC 5G Link-Level Simulator. In *1st IWLS*, pages 1–6. IEEE.
- Jao, C.-K., Wang, C.-Y., Yeh, T.-Y., Tsai, C.-C., Lo, L.-C., Chen, J.-H., Pao, W.-C., and Sheen, W.-H. (2018). WiSE: A System-Level Simulator for 5G Mobile Networks. *IEEE Wireless Communications*, 25(2):4–7.
- Lopes, M. M., Higashino, W. A., Capretz, M. A., and Bittencourt, L. F. (2017). MyiFog-Sim: A Simulator for Virtual Machine Migration in Fog Computing. In *10th UCC*, pages 47–52. ACM.
- Mezzavilla, M., Zhang, M., Polese, M., Ford, R., Dutta, S., Rangan, S., and Zorzi, M. (2018). End-to-End Simulation of 5G mmWave Networks. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 20(3):2237–2263.
- Mohsen, N. and Hassan, K. S. (2015). C-RAN simulator: A Tool for Evaluating 5G Cloud-Based Networks System-Level Performance. In *11th WiMob*, pages 302–309. IEEE.
- Nardini, G., Stea, G., Viridis, A., and Sabella, D. (2020). Simu5G: A System-level Simulator for 5G Networks. In *SIMULTECH*, pages 68–80.
- Patriciello, N., Lagen, S., Bojovic, B., and Giupponi, L. (2019). An E2E Simulator for 5G NR Networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 96:101933.
- Rupp, M., Schwarz, S., and Taranetz, M. (2016). *The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation*. Springer Publishing Company, Incorporated, 1st edition.
- Tinini, R. I., Batista, D. M., Figueiredo, G. B., Tornatore, M., and Mukherjee, B. (2019). Low-Latency and Energy-Efficient BBU Placement and VPON Formation in Virtualized Cloud-Fog RAN. *Journal of Optical Communications and Networking*, 11(4):B37–B48.
- Tinini, R. I., dos Santos, M. R. P., Figueiredo, G. B., and Batista, D. M. (2020). 5GPy: A SimPy-Based Simulator for Performance Evaluations in 5G Hybrid Cloud-Fog RAN Architectures. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 101:102030.