

# Sistema 5G NR *Indoor*: uma Análise de Cobertura e Capacidade com MIMO

Lucas I. C. Medeiros, Ricardo Q. F. H. Silva, Dario G. de Macedo, Daniel R. de Luna,  
Tarciana C. de Brito Guerra e Vicente A. de Sousa Jr.

**Resumo**—O desenvolvimento da quinta geração de redes móveis (5G) propõe atender o caso de uso que engloba as comunicações móveis em banda larga melhoradas (eMBB) definido pelo órgão padronizador dessa tecnologia de acesso rádio, o 3GPP. Para suprir essa demanda são necessárias funcionalidades que aperfeiçoem o uso dos recursos de rádio disponíveis, entre elas estão o uso de esquemas multi-antena (MIMO) e a conformação de feixe (*Beamforming*). Este trabalho apresenta uma análise de cobertura e capacidade, por meio da prototipagem via *software* no simulador ns-3. As análises são realizadas com base em *Radio Environment Maps* (REMs) e parâmetros como: SINR, taxa útil e atraso do sistema, em cenário *Indoor* com variações nas configurações das funcionalidades MIMO e conformação de feixe na presença de múltiplos usuários conectados.

**Palavras-Chave**—5G, NR, ns-3, 5G-LENA, Conformação de feixe, MIMO.

**Abstract**—Fifth-generation (5G) mobile network aims to fulfill the enhanced Mobile Broadband (eMBB) use case requirements defined by 3GPP. New features to improve the efficiency of radio resource usage are required, including the employment of multi-antenna schemes (MIMO) and *Beamforming*. This work presents a coverage and capacity study through the ns-3 5G-LENA network simulator. Our analyses are based on *Radio Environment Maps* (REMs) and parameters such as SINR, throughput and the average delay in an indoor scenario using MIMO and *Beamforming* configurations with multiple connected users.

**Keywords**—5G, NR, ns-3, 5G-LENA, *Beamforming*, MIMO.

## I. INTRODUÇÃO

O cenário mundial das telecomunicações segue em constante evolução desde a década de 80 até o presente, culminando no desenvolvimento da 5ª geração de redes móveis (5G), definida pelo setor de radio-comunicações da União Internacional de Telecomunicações (ITU) [1]. A rede de comunicação do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) conhecida como *New Radio* (NR) visa atender os três casos de uso estabelecidos pelo ITU para o 5G: Comunicações Móveis em Banda Larga Melhoradas (*enhanced Mobile Broadband* - eMBB), Comunicações Ultra Confiáveis e de Baixíssimo Atraso (*Ultra-Reliable Low-Latency Communication* - URLLC); e, comunicações Massivas entre Máquinas (*massive Machine Type Communication* - mMTC).

Para que novos serviços sejam prestados de forma adequada, atendendo aos requisitos impostos, é preciso um aperfeiçoamento do conjunto *hardware* e *software*, incluindo

Os autores são da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, E-mails: {lucas.medeiros.114, ricardo.queiroz.105, dario.macedo.129, daniel.luna.088, tarciana.guerra.051, vicente.sousa}@ufrn.edu.br. Esse estudo foi financiado em parte pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. As simulações fornecidas por esse trabalho foram realizadas com o apoio do Núcleo de Processamento de Alto Desempenho da UFRN (NPAD/UFRN).

técnicas que permitam eficiência no uso dos recursos disponíveis na rede. A interface de rádio desse novo sistema faz uso de funcionalidades como a conformação de feixe (do inglês, *Beamforming*), a qual contribui na garantia de altas taxas de transmissão, importante característica para o eMBB.

Utilizada para compensar a perda de propagação das ondas milimétricas (*mmWaves*), na faixa de 24 GHz a 300 GHz [2], além de outros efeitos, a conformação de feixe é uma técnica possibilitada pelo uso de múltiplas antenas na transmissão e na recepção do sinal, o sistema MIMO (Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas). Na conformação de feixe, tanto o transmissor quanto o receptor devem escolher o melhor feixe de transmissão baseando-se em alguma métrica de potência, concentrando, assim, a energia dos sinais e transmitindo-os em um feixe mais direcional, podendo ser mais estreito ou largo, dependendo do número de antenas do arranjo [3].

O ganho do arranjo de antenas com conformação de feixe contrapõe a atenuação do canal móvel na faixa de frequência das ondas milimétricas, bem como reduz a interferência entre transmissões vizinhas, já que a energia irradiada sofre um menor espalhamento espacial [4]. Também é possível, com o gerenciamento de interferência, utilizar técnicas de múltiplo acesso por divisão de espaço (*Space Division Multiple Access* - SDMA) [5].

Portanto, o estudo de soluções com múltiplas antenas e conformação de feixe é indispensável no 5G. O valor agregado da conformação de feixe depende do algoritmo responsável por definir qual feixe é escolhido, aliado ao número de elementos presentes no arranjo de antenas, que influencia a quantidade de feixes disponíveis na transmissão. Uma forma de avaliar seu funcionamento, e aprimorá-lo, é por meio da prototipagem via *software*, alternativa barata e rápida que permite testar o desempenho de funcionalidades em cenários complexos antes de implementar o sistema físico.

A ferramenta escolhida para modelagem do estudo de caso apresentado neste artigo é o simulador de eventos discretos *network simulator 3* (ns-3), que permite obter métricas de redes em cenários realistas [6]. O ns-3 é um projeto com código aberto, contando com módulos que implementam diferentes sistemas de comunicação sem fio como o IEEE 802.11, 4G *Long Term Evolution* (LTE), e o NR, cujo módulo 5G-LENA<sup>1</sup> é o utilizado neste estudo. O módulo 5G-LENA conta com um grupo de pesquisadores e desenvolvedores consolidado, permitindo assim uma troca de informações e fundamentação dos conhecimentos obtidos.

Este trabalho tem como objetivo realizar uma análise sistêmica comparativa de estações rádio base 5G (gNBs) que fazem uso da conformação de feixe em conjunto com

<sup>1</sup>Disponível em: <https://gitlab.com/cttc-lena/nr>

diferentes configurações MIMO. A taxa útil (do inglês, *throughput*) e a relação sinal-interferência mais ruído (do inglês, *signal-to-interference-plus-noise ratio* - SINR) de cada caso são avaliadas em um cenário *indoor* servido por um sistema NR modelado de acordo com as especificações do 3GPP [7].

O artigo está dividido como a seguir. Na Seção I-A são apresentados os principais trabalhos relacionados ao tema. Na Seção II é explicado como o sistema NR foi modelado no ns-3, trazendo também a definição de aspectos chave do cenário avaliado. A Seção III apresenta e discute os resultados obtidos. Por fim, a Seção IV traz as principais conclusões do trabalho, além das expectativas de trabalhos futuros.

### A. Trabalhos Relacionados

Existem diferentes abordagens de estudos realizados para a compreensão e análise de desempenho do sistema 5G NR. Os autores de [2] e [8] resumem as características gerais da conformação de feixe, tais como: requisitos, arquitetura de sistemas e métodos de conformação (analógico, digital ou híbrido); concluindo com perspectivas de estudos e aplicações da técnica.

Estudos em campo envolvendo a conformação de feixe são comuns. Trabalhos como [9] e [10] expõem abordagens mais empíricas realizadas por autores da indústria, montando equipamentos que fazem uso da técnica para analisar o desempenho do sistema 5G na banda de 4,5 GHz em ambientes urbanos densos [9], e na banda de 28 GHz em ambientes com alta mobilidade [10]. As principais métricas de desempenho utilizadas nos trabalhos são a taxa útil e a relação sinal-ruído.

Na literatura existem trabalhos mais abrangentes, que visam implementar e testar funcionalidades do sistema. Trabalhos como [11] têm como objetivo comprovar as vantagens da conformação de feixe na propagação em *mmWaves* por meio de um protótipo em rádio definido por software implementado em USRP (*Universal Software Radio Peripheral*). Já em [12] é realizada uma análise comparativa entre algoritmos de conformação de feixe adaptativos, almejando melhorias em aplicações mMTC - *vehicle-to-everything* (V2X).

Artigos como [13] e [14] utilizam os módulos de 5G do ns-3 para avaliar o NR. Em [13], os autores implementam extensões para o módulo 5G-LENA, e mostram sua aderência às características chave do NR. Já em [14], é realizado um procedimento para a otimização da alocação de recursos em um sistema NR. Ambos trabalhos apresentam simulações como forma de validar as mudanças e procedimentos propostos pelos autores. Apesar do foco dos estudos não ser voltado especificamente à análise da conformação de feixe no sistema NR, suas simulações utilizam a funcionalidade supracitada na construção do cenário de validação, evidenciando um pleno suporte à conformação de feixes pelo módulo.

Este estudo distingue-se dos demais por apresentar uma análise de cobertura da técnica de conformação de feixe em cenários com ambientes SISO (Única Entrada e Única Saída), com apenas um feixe, e MIMO, com diversos feixes, no sistema 5G NR, seguido de uma análise de desempenho com base nos níveis de SINR, taxa útil e atraso fim-a-fim, aspectos não abordados em conjunto na literatura.

## II. METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO

Como mencionado anteriormente, a modelagem do sistema NR neste trabalho utiliza o módulo 5G-LENA do ns-3. Instruções de instalação e uso estão disponíveis em seu site oficial [7]. É importante destacar a necessidade da solicitação para acesso e uso do módulo, justificando seu uso para pesquisa acadêmica.

O 5G-LENA é um módulo do ns-3 alinhado à especificação técnica *3GPP Release-15*, referente ao padrão 5G dessa organização. O módulo continua recebendo atualizações com novas funcionalidades e correções de *bugs* e/ou erros. Algumas das funcionalidades das camadas PHY e MAC são: o suporte às diversas numerologias, uso de partições de banda (*Bandwidth Parts* - BWPs), modos de operação com ou frequência (*Time Division Duplex* - TDD ou *Frequency Division Duplex* - FDD) e parametrização do canal 3GPP TR 38.901 [15]. Por exemplo, é possível analisar o desempenho de uma gama de cenários realistas, por meio de ajustes nos efeitos de degradação do canal.

### A. MIMO e Conformação de feixe no ns-3

Considerando a conformação de feixe, o módulo suporta dois tipos de algoritmos de seleção de feixes: ideal ou realístico.

Os algoritmos ideais realizam a conformação de feixe assumindo um conhecimento perfeito do canal e as posições dos dispositivos, sem custos adicionais de tempo e largura de banda para construção destes vetores.

Já o algoritmo realístico se baseia em medições da SINR do *Sounding Reference Signal* (SRS), transmitido pelo equipamento de usuário (User Equipment - UE), para a determinação da conformação. Tal algoritmo também utiliza um conjunto de vetores referentes ao canal e às posições dos nós. Todavia, ao contrário dos algoritmos ideais, o conhecimento do canal de comunicação não é perfeito, tornando a escolha dos feixes dependente da qualidade das medições reportadas pelo UE.

Além dos algoritmos de seleção de feixes, o simulador em questão também dá suporte à modelagem das antenas presentes nos equipamentos que compõem o cenário, disponibilizando modelos com características omnidirecional ou direcional. Outro aspecto modelado é a possibilidade do uso de arranjos planares construídos em conformidade com as especificações técnicas do 3GPP, aproximando o protótipo construído em *software* da realidade.

### B. Cenário de Avaliação

Para a realização do estudo foi utilizado o ns-3 em conjunto com o módulo 5G-LENA (v1.2). As simulações têm como base um cenário *indoor-eMBB* que segue as diretrizes para avaliação das tecnologias de interface rádio propostas pelo ITU-R [16] e modelos de tráfego [17] que se enquadram em aplicações *eMBB*.

A Tabela I resume os parâmetros gerais utilizados na simulação do cenário proposto e a Tabela II explicita os principais parâmetros do canal 3GPP utilizados.

O estudo realizado neste trabalho visa analisar cobertura e o desempenho de um sistema 5G NR com conformação de feixe em um canal que sofre os efeitos da perda de percurso,

TABELA I: Parâmetros Gerais de Simulação.

Parâmetros	Valor	Referência
UEs	9, 27, 45, 63 e 90	[16]
gNBs	3 (Tri-setorização)	[16]
Portadora e banda	30 GHz e 80 MHz	[16]
MIMO	SISO e 8x8	[16]
Altura da antena	3 m (gNB) x 1,5 m (UE)	[16]
Modelo de antena	3GPP	[15]
Potência de transmissão	23 dBm (gNB) e 23 dBm (UE)	[16]
Modo de transmissão	TDD <i>Full buffer</i>	[16]
Modelo de tráfego	<i>Poisson</i>	
Taxa oferecida	20 Mbps	[17]
Numerologia	2	[18]
Conformação de feixe	CellScan (Grid of Beams)	[19]

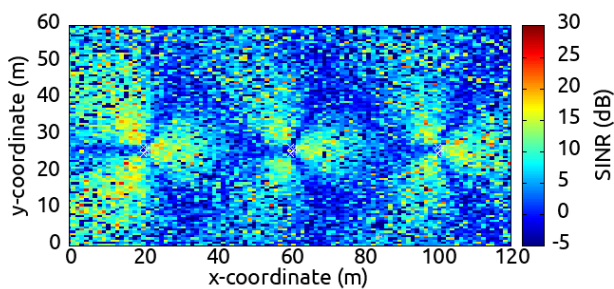
TABELA II: Parâmetros do canal 3GPP [15].

Parâmetro	Valor	Descrição
Perda de Percurso	-	Cenário InH <i>Indoor Open office</i>
Sombreamento	-	Sem efeito de sombreamento
LOS probability	Indoor Open office Tabela 7.4.2-1 de [15]	Probabilidade de linha de visada

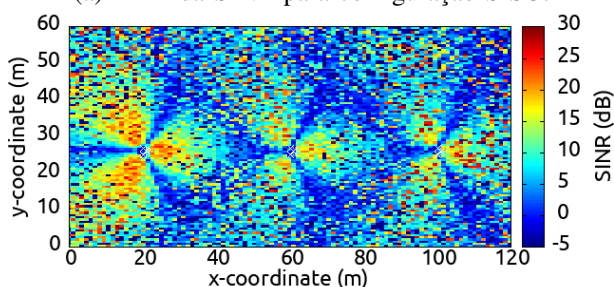
avaliando assim o desempenho médio, desconsiderando sombreamento e desvanecimento de pequena escala. Como pode ser visto na Tabela I, o cenário é composto de três gNBs tri-setorizadas e um número variável de UEs. Cada configuração do sistema é simulada considerando diferentes posições de usuário ao longo do cenário, distribuídos uniformemente. São realizadas 30 repetições da simulação com diferentes sementes do gerador de números aleatórios, tendo em vista a garantia de confiabilidade estatística dos resultados obtidos.

### III. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

A primeira análise se concentra na comparação da cobertura para as duas configurações do sistema, tendo como foco os *Radio Environment Maps* (REMs) de SINR apresentados na Fig. 1.



(a) REM da SINR para configuração SISO.

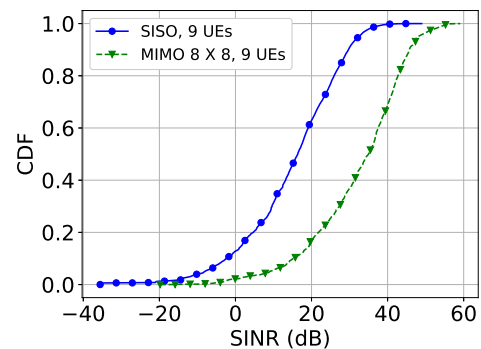


(b) REM da SINR para configuração com MIMO 8x8.

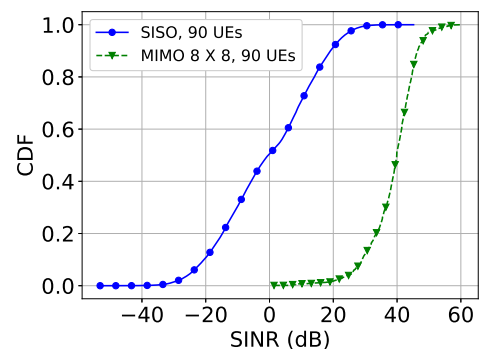
Fig. 1: REMs de SINR.

É observado que quanto maior o número de feixes, maior é a cobertura dos setores, como evidenciado na Fig. 1b. Nesta figura existe um maior número de pontos com níveis de SINR acima de 25 dB. Consequentemente, a melhoria nos níveis de SINR acaba por reduzir a área dos buracos de cobertura no cenário, minimizando a possibilidade da perda de conexão dos usuários localizados nesses pontos. No escopo do caso de uso *eMBB*, a conformação de feixe é uma variável que pode ser ajustada de acordo com a complexidade do serviço, aumentando ou reduzindo o número de feixes de acordo com a necessidade.

A segunda investigação se concentra na comparação de desempenho de diferentes configurações de conformação de feixe com o aumento do número de usuários. O primeiro *Key Performance Indicator* (KPI) analisado é a SINR do sistema. A Fig. 2 confirma a natureza dos REMs ao mostrar a função de distribuição acumulada (*Cumulative Distribution Function - CDF*) empírica da SINR. Ela evidencia que, apesar do aumento do número de usuários, o uso da conformação de feixe com mais antenas proporciona um ganho significativo de SINR.



(a) CDF da SINR (9 UEs).



(b) CDF da SINR (90 UEs).

Fig. 2: CDFs da SINR (SISO vs MIMO).

A Fig. 3 mostra a média da SINR, ilustrando a incapacidade de manter um nível alto de SINR para vários usuários com apenas um feixe de transmissão, comportamento prejudicial para serviços com mais demanda por taxa de transmissão ou qualidade do enlace. Para um maior número de feixes, os níveis de SINR atingem patamares bem mais altos, confirmando o ganho proporcionado pelo uso do MIMO.

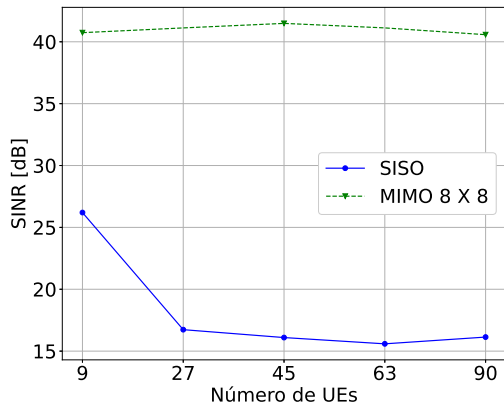
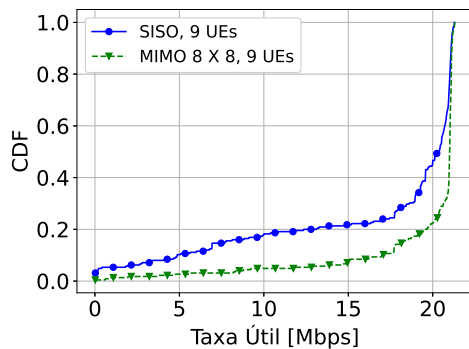
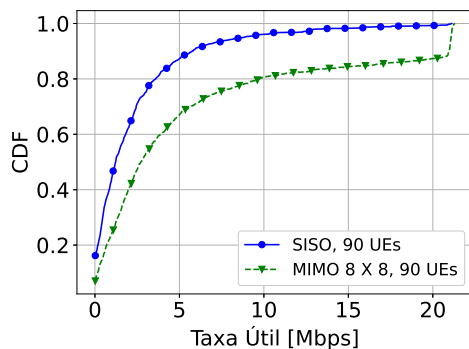


Fig. 3: SINR média.

O comportamento da SINR tem impacto em outro KPI importante, a taxa útil (*throughput*) do UE. Observando a CDF da taxa útil (Fig. 4) é perceptível que, na situação com um maior número de feixes, os piores usuários atingem taxas mais altas, evidenciando que o ganho de SINR se reflete em ganho na taxa útil, inclusive para os UEs em pior situação de canal.



(a) CDF da Taxa útil (9 UEs).



(b) CDF da Taxa útil (90 UEs).

Fig. 4: CDFs da Taxa útil (SISO vs MIMO).

Considerando o comportamento médio da taxa útil dos usuários (Fig. 5), fica perceptível tanto a entrega de taxas maiores pelo esquema com mais feixes, quanto o decaimento mais suave dessa taxa com o aumento de usuários. Assim, ao lado de melhores técnicas de escalonamento, de gerenciamento de interferência e de redução de sinalização, a conformação de feixe pode contribuir para mitigar as perdas devido ao maior número de usuários conectados à rede.

A melhoria de desempenho devido ao uso da técnica de conformação de feixe não tem impacto apenas na SINR e

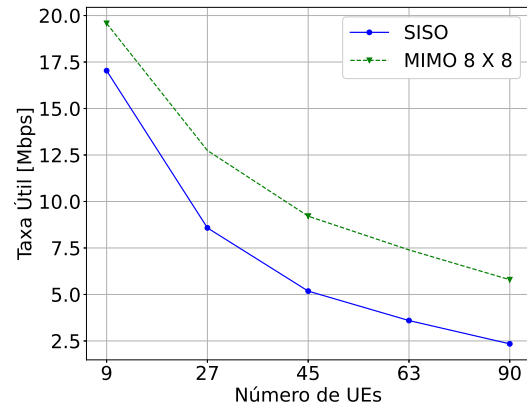
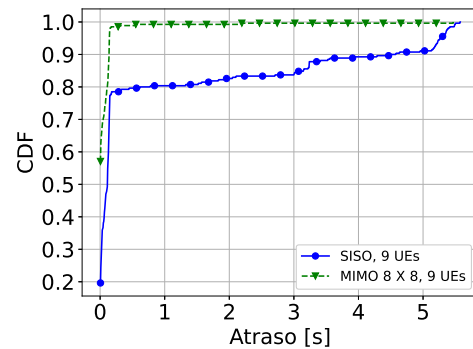
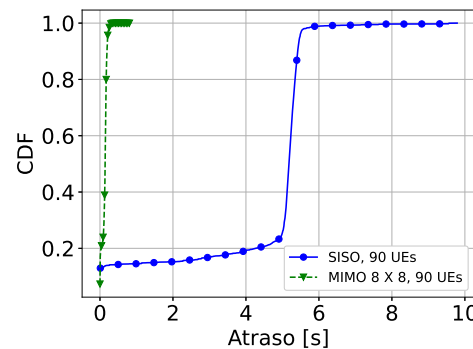


Fig. 5: Taxa útil média.

na taxa útil. Outro KPI analisado neste trabalho é o atraso fim-a-fim. Analisando a CDF do atraso (Fig. 6), é possível observar que no esquema com mais feixes, a maioria dos usuários experimentam níveis de atraso mais baixos (no patamar de milissegundos). Seu comportamento médio (Fig. 7) mostra uma considerável redução no atraso percebido pelos usuários com o aumento do número de feixes, além da capacidade se manter em patamares baixos com o aumento de UEs. Esse comportamento é interessante no quesito de flexibilidade do sistema, pois permite atender diferentes casos de uso simultaneamente, principalmente em serviços considerados críticos, que demandam baixo atraso, como a automação industrial, transporte inteligente e tele-cirurgias.



(a) CDF do atraso fim-a-fim (9 UEs).



(b) CDF do atraso fim-a-fim (90 UEs).

Fig. 6: CDFs do atraso fim-a-fim.

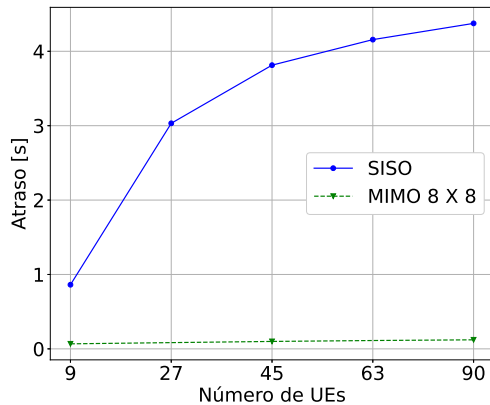


Fig. 7: Atraso fim-a-fim médio para diferentes configurações de conformação de feixe para diferentes quantidades de usuários.

#### IV. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho realizou uma análise de cobertura e desempenho de sistemas 5G NR que fazem uso da técnica de conformação de feixe. Foram apresentadas suas principais características, validando a importância da técnica, especialmente como funcionalidade para garantir as premissas do *eMBB* em ambientes *indoor*. Outro ponto abordado no trabalho é a importância da prototipagem via *software*, evidenciando a disponibilidade do ns-3 *5G-LENA* como ferramenta para estudos investigativos no NR.

Foram apresentadas duas análises em um cenário *indoor mmWave*, analisando a cobertura das gNBs com base em seus REMs e o desempenho do NR em termos de SINR, taxa útil e atraso fim-a-fim com o aumento de usuários no cenário. Foi possível comprovar o melhor desempenho de esquemas de conformação com mais feixes, uma vez que houve uma melhoria na SINR, já que o MIMO possibilitou uma melhor distribuição de interferência entre os UEs. Isso foi motivado pela distribuição de potência por feixe e uso menos congestionado dos pares de feixes entre os UEs e gNBs.

Em trabalhos futuros, espera-se analisar cenários mais desafiadores, considerando os efeitos de sombreamento e desvanecimento de pequena escala no canal, além de cenários com mobilidade de usuários.

#### REFERÊNCIAS

- [1] ITU-R, "IMT vision - framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond," *Rec. ITU-R M.2083-0*, vol. pp. 1-46, 2015.
- [2] S. Kutty and D. Sen, "Beamforming for millimeter wave communications: An inclusive survey," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 949–973, 2016.
- [3] H. Holma, A. Toskala, and T. Nakamura, *5G Technology: 3GPP New Radio*. Wiley, December 2019, vol. volume 1.
- [4] D. A. Schmidt, C. Shi, R. A. Berry, M. L. Honig, and W. Utschick, "Comparison of distributed beamforming algorithms for mimo interference networks," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 13, pp. 3476–3489, 2013.
- [5] Z.-Q. Luo, W.-Y. Shum, and G. Zhao, "User capacity analysis of space division multiple access channel," in *The Thirty-Seventh Asilomar Conference on Signals, Systems Computers, 2003*, vol. 1, 2003, pp. 223–227 Vol.1.
- [6] ns3. (2011) discrete-event network simulator. [Online]. Available: <https://www.nsnam.org/>
- [7] 5G-LENA. (2022, jan) Centre tecnològic de telecomunicacions de catalunya. [Online]. Available: <https://5g-lena.cttc.es/>

- [8] I. Ahmed, H. Khammari, A. Shahid, A. Musa, K. S. Kim, E. De Poorter, and I. Moerman, "A Survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3060–3097, 2018.
- [9] T. Okuyama, S. Suyama, J. Mashino, Y. Okumura, K. Izui, and K. Yamazaki, "5G Experimental Trials of 4.5 GHz Band Digital Beamforming in Dense Urban Area," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018, pp. 1130–1131.
- [10] T. Obara, Y. Inoue, Y. Aoki, S. Suyama, J. Lee, and Y. Okumura, "Experiment of 28 GHz Band 5G super wideband transmission using beamforming and beam tracking in high mobility environment," in *2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2016, pp. 1–5.
- [11] C. Scarborough, K. Venugopal, A. Alkhateeb, and R. Heath, "Beamforming in millimeter wave systems: Prototyping and measurement result," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, July 2018.
- [12] A. C. e. R. F. Cesar Druczkoski, Cynthia Junqueira, "Uma análise comparativa de algoritmos de beamforming aplicado cenários de 5G V2X," *XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*, Setembro 2019.
- [13] *Implementation and Evaluation of Frequency Division Multiplexing of Numerologies for 5G New Radio in ns-3*. Zenodo, Jun. 2018, Grant numbers : This work was supported by 5G- REFINE - Resource Efficient 5G Networks (TEC2017-88373-R) project and InterDigital. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1145/3199902.3199905>
- [14] S. Lagen, B. Bojovic, S. Goyal, L. Giupponi, and J. Mangues-Bafalluy, "Subband Configuration Optimization for Multiplexing of Numerologies in 5G TDD New Radio," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2018, pp. 1–7.
- [15] *3GPP TR 38.901*, Nov. 2020, Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, v16.1.0.
- [16] *Report ITU-R M.2412-0*, Oct. 2017, Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-2020.
- [17] J. Navarro-Ortiz, P. Romero-Diaz, S. Sendra, P. Ameigeiras, J. J. Ramos-Munoz, and J. M. Lopez-Soler, "A Survey on 5G Usage Scenarios and Traffic Models," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 22, no. 2, pp. 905–929, 2020.
- [18] ETSI, "5G; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies (3GPP TR 38.913 version 14.2.0 Release 14)," vol. 0, p. 41, 2017. [Online]. Available: <http://www.etsi.org/standards-search>
- [19] S. Lagen, L. Giupponi, S. Goyal, N. Patriciello, B. Bojovic, A. Demir, and M. Beluri, "New Radio Beam-based Access to Unlicensed Spectrum: Design Challenges and Solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. PP, no. c, p. 1, 2018. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1809.10443>