

Simulador de Alto de Desempenho para o Gerenciamento de Mobilidade em Redes 5G Densas

Lidiano A. N. Oliveira, Francisco Madeiro, Waslon T. A. Lopes e Marcelo S. Alencar

Resumo— Redes de Quinta Geração (5G) suportam inúmeros equipamentos de usuários se movendo pela rede. No entanto, o número crescente de usuários e os diversos padrões de tráfego representam desafios significativos para a sobrecarga de sinalização no gerenciamento de mobilidade. Para lidar com possíveis sobrecargas ou congestionamentos, são necessárias soluções personalizadas e otimizações. Para auxiliar nesse planejamento, foi desenvolvido um novo simulador 5G focado na mobilidade em grandes redes. Sua característica principal é a capacidade de lidar com um grande número de usuários em redes muito densas, um cenário típico em comunicações massivas de máquina a máquina (mMTC).

Palavras-Chave— Simulador, Redes 5G, Gerenciamento de Mobilidade.

Abstract— Fifth Generation (5G) networks support numerous user equipment moving seamlessly across the network. However, the increasing number of users and diverse traffic patterns present significant challenges to signaling overhead for mobility management. To manage this and prevent overload or congestion, custom solutions and optimizations are needed. To aid in this planning, a novel 5G simulator focused on mobility in large networks was developed. Its key feature is the capability to handle a large number of users in very dense networks, a typical scenario in massive machine-type communications (mMTC).

Keywords— System-Level Simulator, 5G Network, Mobility Management.

I. INTRODUÇÃO

As redes 5G foram concebidas para atender à crescente demanda por conectividade de equipamentos de usuários (EMs). Cenários de comunicação massiva do tipo máquina (mMTC – *massive Machine-Type Communications*) são projetados para suportar uma densidade alta de dispositivos, possibilitando a comunicação eficiente entre milhões de dispositivos com baixa taxa de transmissão de dados, porém com alta eficiência energética para uma longa duração da bateria.

O aumento no número de usuários em redes 5G densas pode acarretar problemas devido à sobrecarga de sinalização, exigindo mais sinalização para gerenciar a mobilidade dos dispositivos, o que pode levar a congestionamentos e falhas de *handover*. A infraestrutura também enfrenta desafios de processamento simultâneo de múltiplas conexões e *handovers*, bem como interferências de sinal, que degradam a qualidade da conexão e aumentam a taxa de falhas e perda de pacotes.

Lidiano A. N. Oliveira, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, Brasil, E-mail: lidiano.oliveira@ufrpe.br. Francisco Madeiro, Universidade de Pernambuco, Recife-PE, E-mail: madeiro@poli.br. Waslon T. A. Lopes, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB, Brasil, E-mail: waslon@ieee.org. Marcelo S. Alencar, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, Brasil, E-mail: malencar@iecom.org.br

Para mitigar os problemas causados pelo aumento no número de usuários em redes 5G, são realizadas otimizações e adotadas soluções personalizadas, que colaboram para melhorar a eficiência e a qualidade da rede. A simulação é uma das ferramentas utilizadas para planejar e testar os diferentes cenários de mobilidade e carga da rede.

A rede 5G introduziu novos conceitos e tecnologias, exigindo abordagens de simulação que suportem a complexidade dos cenários, tornando a simulação mais desafiadora. Para esse tipo de cenário, o simulador em nível de sistema é ideal, pois permite avaliar o desempenho da rede 5G globalmente, analisando a mobilidade e o tráfego sem entrar em detalhes específicos de implementação, como em simuladores em nível de enlace [1].

Embora existam muitos simuladores em nível de sistema para 5G atualmente, há a necessidade de um simulador que atenda as demandas de gerenciamento de mobilidade, que engloba o gerenciamento de *handover* e o gerenciamento de localização, em conformidade com as especificações 3GPP para uma rede densa [2].

Apesar de existirem simuladores genéricos que apresentam algum módulo para a rede 5G, eles não implementam toda pilha de protocolos referente ao gerenciamento de mobilidade e o seus desempenhos são insatisfatórios em cenários com grande quantidade de elementos na simulação [3].

Neste artigo é apresentado um novo simulador com a proposta de avaliar o desempenho dos indicadores de uma rede 5G em cenários de grande escala (centenas de milhares de elementos na rede). O simulador atende as especificações do 3GPP relacionadas à mobilidade em redes 5G [4], possibilitando desempenho e eficiência no processamento das funcionalidades desejadas. Para a avaliação do simulador foram implementados cenários com o intuito de otimizar e planejar redes 5G, analisando uma rede densa sem a necessidade de simplificar sua topologia reduzindo o número de elementos.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na Seção II é apresentado o estado da arte em simuladores para redes 5G. Na Seção III são elencados os aspectos do gerenciamento de mobilidade e seu impacto nas redes 5G. Na Seção IV são detalhadas as características do simulador. Na Seção V são apresentados os resultados do simulador e a Seção VI contém as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

II. ESTADO DA ARTE

O objetivo da simulação é fornecer uma descrição precisa de um cenário de uma rede 5G. Entretanto, ela pode ser bastante complexa computacionalmente quando o número de elementos

envolvidos na simulação é alto [5]. Simulações relacionadas à camada física (como codificação de canal, processamento MIMO etc.) são implementadas em simuladores de nível de enlace, que detalham o comportamento do sinal entre o transmissor e o receptor, incluindo aspectos como modulação, taxa de erro e as condições do canal de comunicação. Como não é necessário simular cada detalhe da camada física, o simulador em nível de sistema permite uma avaliação mais rápida e eficiente do desempenho da rede em cenários complexos e de grande escala.

Com o avanço da implementação de redes 5G, diversos simuladores foram desenvolvidos, cada um focado em executar um conjunto específico de funcionalidades do padrão 5G [6], como implementar somente a tecnologia da interface aérea ou o fatiamento da rede. Isso acontece porque muitos deles são derivados de simuladores de redes 4G, com apenas uma adequação na camada física realizada. Não foram encontrados na literatura simuladores que contemplem o gerenciamento de localização, que garante que os EMs permaneçam conectados e acessíveis à medida que se deslocam entre diferentes áreas de cobertura, mesmo quando se encontram no estado ocioso.

A seguir, são apresentadas algumas características dos simuladores mais conhecidos encontrados na literatura [3].

- Network Simulator-3 (NS-3) – É um simulador de rede baseado em evento que permite a simulação de redes complexas, suportando diversos protocolos e camadas de rede [7]. Implementado principalmente em C++, ele oferece suporte para códigos em Python. Possui um módulo nativo para a simulação de redes LTE (*Long Term Evolution*). Suas funcionalidades em termos de mobilidade se limitam aos procedimentos em que o EM está no modo conectado, não suportando buscas ou atualizações de localização no modo ocioso.
- Lena 5G – É um módulo de extensão do NS-3 capaz de realizar simulações fim a fim em redes 5G. Implementa camadas físicas e de controle específicas do 5G. Porém, também não contempla os procedimentos no modo ocioso.
- OMNeT++ – É um ambiente de simulação modular e expansível utilizado para modelar redes de computadores e de comunicações [8]. O módulo INET fornece componentes para simulação de redes móveis, incluindo protocolos de rede, componentes de *hardware* e modelos de aplicação.
- Simu5G – Baseado no OMNET++, o simulador foi desenvolvido em C++, incorporando os protocolos da interface 5G NR para simular o plano de dados da rede de acesso e de núcleo. Camadas de protocolo com o 3GPP são fornecidas. O Simu5G suporta uma grande variedade de modelos para a mobilidade do EM.
- Matlab – É uma das plataformas de simulação mais utilizadas para pesquisa e possui uma *Toolbox* 5G, que executa tanto simulações em nível de enlace quanto em nível de sistemas. Porém, essa *toolbox* possui um longo tempo de execução, tornando os testes e desenvolvimento bastante demorados
- Vienna 5G – É uma ferramenta desenvolvida em Matlab para a simulação e avaliação de redes móveis 5G,

oferecendo alta fidelidade com modelos detalhados de propagação de sinal e ambientes realistas. Entretanto, esse simulador não implementa as características básicas de mobilidade, como *handover*.

- 5GPy – É um simulador baseado na biblioteca SimPy em Python [9]. O simulador é modular e, apesar de permitir a utilização com um grande número de elementos, toda a rede de acesso foi abstraída, de forma que não implementa a mobilidade do usuário.

Com relação aos simuladores voltados à implementação de redes densas, em [10] é proposta uma metodologia para simular rede de computadores com até 1 bilhão de nós utilizando NS-3. Entretanto, os equipamentos implementados na simulação são fixos, que possuem uma complexidade bem menor do que os equipamentos móveis. Por sua vez em [5] o simulador se propõe a ser utilizado em redes LTE de larga escala, mas sua implementação apresenta uma quantidade de EMs na casa das centenas.

Como esses simuladores apresentados não implementam integralmente o gerenciamento de mobilidade na rede 5G, não foi possível realizar comparações entre o simulador proposto e os disponíveis na literatura. Além desse fato, os simuladores investigados trabalham na casa de centenas de EMs enquanto o simulador desenvolvido opera com centenas de milhares de EMs.

III. ASPECTOS DO GERENCIAMENTO DE MOBILIDADE EM REDES 5G

O gerenciamento de mobilidade em redes 5G é essencial para garantir conectividade contínua e eficiente para os usuários em deslocamento entre diferentes áreas de cobertura. Esse gerenciamento se divide em duas principais áreas: o gerenciamento de localização e o gerenciamento de *handover*. O gerenciamento de localização mantém as informações atualizadas sobre a posição dos EM, assegurando que eles possam ser encontrados mesmo em deslocamento na rede. Os procedimentos executados por essa funcionalidade são a atualização de localização (iniciada pelo EM) e a busca do EM (iniciada pela rede). Esses procedimentos geram sinalização extra na rede, podendo impactar a qualidade do serviço caso a sinalização seja excessiva. Uma configuração adequada das áreas em que o EM atualiza sua localização ou que recebe mensagens de busca pode minimizar o impacto na sinalização [11].

O gerenciamento de *handover* assegura que os EMs possam transitar suavemente entre diferentes estações radiobase (gNodeB) sem perder a conexão. O *handover* deve ser realizado de forma eficiente para evitar falhas de conexão e minimizar perdas de pacotes, garantindo que o EM não perceba interrupções durante a mudança de gNodeB. A densificação da rede, com um grande número de células pequenas (*small cells*), e o aumento no número de dispositivos IoT (*Internet of Things*), incrementa a frequência dos *handover*, pois os EMs precisam frequentemente alternar entre as diferentes gNodeBs.

IV. DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

Nesta seção é apresentado um simulador em nível de sistema desenvolvido especificamente para atuar no geren-

ciamento de mobilidade em redes 5G extremamente densas (centena de milhares de EMs). Uma rede que tem a capacidade de gerenciar recursos de forma eficiente é essencial para evitar congestionamentos e manter a qualidade do serviço. Um simulador em nível de sistema para 5G permite a otimização e a implementação de novas soluções antes da aplicação em redes reais, economizando tempo e recursos.

Neste contexto, as demandas de processamento aumentam com o número de eventos simulados e a complexidade das interações na rede (número de gNodeBs e EMs), podendo resultar em gargalos de desempenho. Os requisitos de memória para o simulador aumentam de acordo com a topologia simulada, podendo ultrapassar a capacidade de memória dos computadores [12]. Além disso, armazenar os eventos resultantes da simulação em um arquivo pode resultar em uso excessivo de espaço em disco.

A. Arquitetura do Simulador

O simulador, implementado de forma modular, foi desenvolvido em C++. Cada um dos componentes é responsável por uma função específica do sistema e estruturado de forma independente. O simulador é orientado a eventos, ordenados pelo tempo de ocorrência em uma lista encadeada de eventos e agendados para serem processados em sequência.

B. Camada Física

A camada física modela os aspectos fundamentais da transmissão de dados, como processamento de sinal, MIMO, modulação e codificação. Como o foco do simulador é o gerenciamento de mobilidade, essa camada foi parcialmente abstraída.

Devido à necessidade de monitoração do nível de sinal (RSSI – *Received Signal Strength Indicator*), são utilizados modelos de propagação. Esse processo permite associar a gNodeB com o melhor nível de sinal a um EM, tanto quando ele está no modo ocioso (para uma possível resseleção) quanto em modo conectado (para *handover*). Os modelos de propagação incluídos no simulador estão listados na Tabela I, em que d é a distância entre o EM e a gNodeB, H_{gnb} é a altura da antena da gNodeB, H_b é a altura média dos prédios em volta da gNodeB e f a frequência central em GHz.

TABELA I
MODELOS DE PROPAGAÇÃO UTILIZADO NO SIMULADOR.

Nome	Atenuação (dB)
Macro-Célula Urbano	$80+40 \times (1-4 \times 0,001 \times (H_{gnb}-H_b)) \times \log_{10}(d \times 0,001) - 18 \times \log_{10}(H_{gnb}-H_b) + 21 \times \log_{10}(f)$
Macro-Célula Suburbano	$128,1 + (37,6 \times \log_{10}(d \times 0,001))$
Macro-Célula Rural	$69,55 + 26,16 \times \log_{10}(f) - 13,82 \times \log_{10}(H_{gnb}) + (44,9 - 6,55 \times \log_{10}(H_{gnb})) \times \log_{10}(d \times 0,0001) + 4,78 \times \log_{10}(f)^2 + 18,33 \times \log_{10}(f) - 40,94$
Micro-Célula Urbano	$24 + (45 \times \log_{10}(d))$
Femto-Célula Urbano	$\max(45, 127 + (30 \times \log_{10}(d \times 0,001)) + 18,3 \times n^{((n+2)/(n+1)-0,46)})$

Como a escolha do modelo pode impactar o desempenho do simulador, há a opção de não utilizar modelo de propagação, melhorando assim o desempenho do simulador. Nesse caso, o

EM será associado à gNodeB geograficamente mais próxima (distância euclidiana).

C. Camada de Controle de Acesso ao Meio (MAC)

A camada MAC gerencia o acesso ao meio de transmissão, alocação de recursos e controle de interferência. Ela é integrada aos modelos de mobilidade que simulam o movimento dos dispositivos móveis para calcular continuamente a qualidade do sinal. Essa camada utiliza as informações do nível do sinal para ajustar dinamicamente parâmetros como potência de transmissão, alocação de canais e prioridades de QoS. Quando a qualidade do sinal cai abaixo de um limiar, a camada MAC inicia processos de *handover*, gerenciando a reconfiguração dos recursos de rádio e a comunicação com novas gNodeBs.

D. Camada de Rede

A camada de rede implementa componentes e funcionalidades do gerenciamento de mobilidade para garantir uma simulação completa e realista. O gerenciamento dos recursos de rádio (RRM – *Radio Resource Management*) para rede 5G é parcialmente implementado, pois o foco do simulador é a mobilidade. Foram implementadas funcionalidades de balanceamento de carga, controle de potência e gerenciamento de *handover* e localização.

Para o controle de energia dos dispositivos do usuário, o RRM implementa estratégias de controle de potência que otimizam os níveis de transmissão, gerenciam interferências e prolongam a vida útil da bateria, ajustando os níveis de potência conforme a localização dos dispositivos e as condições da rede para otimizar a cobertura. Na rede de acesso são implementadas as gNodeBs e a interface de rádio. A topologia da rede é configurada para incluir diferentes tipos de gNodeBs (macro, micro, femto), todas com suas características de cobertura e capacidade.

A distribuição espacial das gNodeBs tem um grande impacto no desempenho das redes móveis celulares, pois o nível de sinal recebido pelo EM depende da distância em relação à gNodeB. Além de permitir a distribuição aleatória ou uniforme das gNodeBs na área de simulação, o simulador desenvolvido permite a importação personalizada das informações dos *sites* (coordenada geográfica, altura da antena, fator de ocupação etc.).

A Tabela II apresenta os principais parâmetros designados para a gNodeB.

TABELA II
PARÂMETROS ASSOCIADOS PARA A GNODEB.

Parâmetros	Valor Padrão
Número de Setores	3
Altura das Antenas	20 m
Ganho da Antena de TX	3 dBi
Ganho da Antena de RX	6 dBi
Perda no Cabo	5 dB
Sensibilidade de RX (TS 36.304)	-101,5 dBm
Potência de TX	10 W

A Tabela III apresenta os parâmetros associados a cada EM inserido no simulador. Foram criados perfis de tráfego

e mobilidade, cada um com determinadas características, para serem associados a cada EM. O usuário se desloca pela área de simulação conforme o modelo de mobilidade adotado no cenário. Inicialmente, os EMs são distribuídos uniformemente pela área de simulação. Em cenários com distribuição espacial não uniforme dos EMs, pesos são associados às regiões das gNodeBs que possuem maior atração do usuário. Assim, a probabilidade de encontrar usuários nas proximidades das gNodeBs com maior peso é maior.

TABELA III
PARÂMETROS ASSOCIADOS AO EM.

Parâmetros	Valor Padrão
Ganho da Antena de TX	6 dBi
Ganho da Antena de RX	6 dBi
Sensibilidade de RX (TS 36.304)	-95 dBm
Potência de TX	0,2 W
Perfil de tráfego	[0...m]
Perfil de mobilidade	[0...n]

1) *Núcleo da Rede*: O núcleo da rede gerencia a funcionalidade central da rede, incluindo autenticação, roteamento de dados e gestão de sessões. As funções básicas de controle e plano de usuário como AMF (*Access and Mobility Management Function*), SMF (*Session Management Function*) e UPF (*User Plane Function*) são implementadas no simulador para suportar a comunicação entre dispositivos, infraestrutura de rede e mobilidade dos EMs.

E. Gerenciamento de Mobilidade

O simulador, voltado para o gerenciamento de mobilidade, implementa todas as funcionalidades necessárias para o gerenciamento de localização e *handover*, conforme descrito nas especificações do 3GPP TS 29.518 [13].

O gerenciamento de localização foi aprimorado nas redes 5G, incluindo um novo estado no controle de recursos de rádio chamado estado Inativo. Este estado permite uma abordagem hierárquica para o gerenciamento de localização, com parte dos procedimentos sendo realizados pelas redes de acesso em vez do núcleo da rede [11]. Os procedimentos de busca e atualização de localização foram implementados, assim como os novos procedimento que permitem que os dispositivos sejam localizáveis ao se moverem dentro de uma área de notificação baseada na RAN.

A implementação de técnicas de *handover* é crucial para assegurar a continuidade da conexão dos dispositivos móveis enquanto se movem entre gNodeBs. A frequência dos *handovers* depende principalmente da velocidade do EM e das características de implantação da rede (densidade de estações base, configuração dos parâmetros da gNodeB etc.).

F. Modelos de mobilidade do usuário

Os modelos de mobilidade simulam o movimento dos usuários móveis dentro da área de cobertura da rede. Padrões de movimento como *Random Walk* e *Random Waypoint* foram implementados. Há a possibilidade de implementar ainda mais modelos de mobilidade no simulador.

G. Modelos de tráfego do usuário

Os cenários de tráfego no simulador incluem Voz sobre IP (VoIP) e *download* de dados. Para VoIP, são gerados pacotes de 20 bytes a intervalos de 20 ms usando o codec G.729, com duração média de 180 segundos. O *streaming* de vídeo é considerado para *download* de dados, recomendando vídeos em 4k a 50 Mbps e 30 fps. Devido a aplicações ativas com transferência intermitente de dados, também é utilizado um modelo de tráfego FTP [14].

H. Coleta de Dados do Simulador

Cada evento ocorrido no simulador é armazenado em arquivo, com informações adicionais do momento do evento, identificação e localização do EM, além dos detalhes do evento gerador. Apenas a última hora é levada em consideração para fins de simulação, garantindo que a rede esteja em um estado estacionário. Esses eventos podem ser consolidados e armazenados em banco de dados para análise posterior, permitindo a captura eficiente das informações relevantes sobre o desempenho da rede.

V. RESULTADOS

Nesta seção o simulador é utilizado para avaliar o impacto de diferentes parâmetros na rede, destacando sua capacidade de avaliar o desempenho dos indicadores de mobilidade em uma rede 5G. Desenvolvido para lidar com redes densas, o simulador permite implementação de cenários personalizados por meio de arquivos de inicialização com informações detalhadas dos EMs e gNodeBs. O simulador foi executado em um computador com processador Intel® Core™ i5-13450HX com 2,40 GHz, 32GB de memória RAM e sistema operacional Windows 11 de 64 bits.

A. Cenário 1 – Efeito ping-pong nos handovers

No primeiro cenário o simulador é utilizado para investigar o efeito ping-pong nos *handovers*, que ocorre quando um EM alterna rapidamente e repetidamente entre duas ou mais gNodeBs. Esse evento pode gerar uma sobrecarga na rede devido ao aumento de sinalizações de *handover*.

Foram utilizadas nesse cenário 65 gNodeBs e 70.000 EMs, equivalente a uma rede de uma operadora em uma capital de porte médio no Brasil. Os EMs foram inseridas de modo uniforme na região e possuem características de mobilidade e tráfego aleatória. As informações de coordenadas das gNodeB foram obtidas no *site* da Anatel e cada gNodeB foi associado um mapa de calor relacionado à intensidade populacional da região. Dessa forma, quanto mais densa a região, maior o tráfego na área. Foi adotada uma parametrização padrão da gNodeB, conforme apresentada na Tabela II.

Analisando os resultados obtidos pelo simulador, identificou-se que algumas gNodeBs apresentam *handovers* com efeito ping-pong, tanto entre setores da mesma gNodeB quanto entre gNodeBs distintas. Foram reajustados os valores de parâmetros nas gNodeBs impactadas, como histerese e tempo de disparo de *handover*. Esse mesmo cenário foi simulado novamente três vezes: duas vezes com cada um das

soluções ajustadas individualmente e uma vez com ambos os parâmetros ajustados. A Tabela IV apresenta o resultado para cada alteração do cenário.

TABELA IV
INVESTIGAÇÃO DO EFEITO PING-PONG.

Cenário	Eventos ping-pong	gNodeBs Impactadas
Parametrização padrão	12,0%	21
Alteração na histerese	2,0%	11
Alteração no tempo de espera	1,0%	4
Alteração na histerese e no tempo de espera	0,1%	1

B. Cenário 2 - Congestionamento de Sinalização

Foi utilizada uma rede com 280 gNodeBs e com um número variável de EMs (200.000, 300.000, 400.000 e 500.000) em uma área de simulação de 400 quilômetros quadrados ($20 \text{ km}^2 \times 20 \text{ km}^2$). Essa quantidade de gNodeBs é equivalente à área metropolitana de uma cidade de grande porte. Nesse cenário o objetivo é identificar possíveis congestionamento de sinalização gerados pelos envios de mensagens de buscas e de atualização de localização para diferentes números de EMs na rede. A configuração adequada das áreas de notificação de RAN e áreas de rastreamento impactam diretamente nesses indicadores.

Com o aumento de sinalização causado pelo número crescente de EMs, é necessário otimizar a configuração das áreas de notificação de RAN e áreas de rastreamento para mitigar possíveis problemas de congestionamento. A técnica de otimização para redes 5G, apresentada em [11], pode ser executada a partir das informações de quantidade de atualizações e buscas por gNodeB obtidas pelo simulador. Após a otimização, o simulador é executado novamente com a nova configuração.

A Figura 1 ilustra o custo de sinalização, em termos de número de eventos de atualização e de busca, para cada quantidade de EMs, assim como os valores encontrados pelo simulador após a otimização. Os valores otimizados chegaram a ser até 41% menores do que os sem otimização.

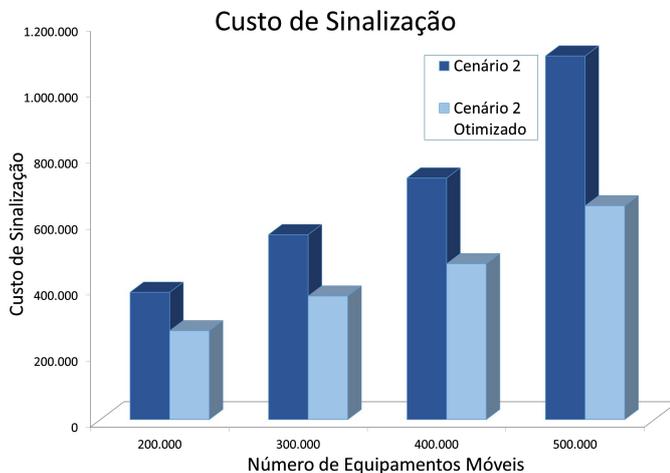


Fig. 1. Congestionamento de Sinalização.

Utilizando um simulador que suporta uma rede densa, foi possível avaliar o desempenho da rede sem a necessidade de realizar uma redução de complexidade no cenário investigado.

VI. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um simulador em nível de sistema projetado para implementar as funcionalidades de gerenciamento de mobilidade em uma rede 5G densa. O simulador permite modelar e analisar com precisão o comportamento de redes complexas, identificando gargalos de desempenho e otimizando os recursos. Ele é essencial para garantir a qualidade de serviço e a experiência do usuário em áreas densamente povoadas, em que milhares de dispositivos competem por recursos limitados.

Experimentos foram conduzidos para validar o desempenho de redes desenvolvidas no simulador. Utilizando cenários realistas, com centena de milhares de EMs e todas as funcionalidades de mobilidade implementadas, foi possível simular uma rede integralmente sem simplificações.

O próximo passo dessa pesquisa consiste em implementar, dentro de algum simulador 5G da literatura, todas as características do gerenciamento de mobilidade, com intuito de realizar comparações de desempenho entre os simuladores.

REFERÊNCIAS

- [1] K. Bąkowski, M. Rodziejewicz, and P. Sroka, "System-level Simulations of Selected Aspects of 5G Cellular Networks," in *2015 International Symposium on Wireless Communication Systems*, pp. 711–715, 2015.
- [2] S. M. A. Zaidi, M. Manalastas, H. Farooq, and A. Imran, "SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and Beyond," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82938–82950, 2020.
- [3] P. Gkonis, T. Panagiotis, and D. Kaklamani, "A Comprehensive Study on Simulation Techniques for 5G Networks: State of the Art Results, Analysis, and Future Challenges," *Electronics*, vol. 9, p. 468, 03 2020.
- [4] 3GPP, "System Architecture for the 5G System. TS 23.501, version 18.4.0, Release 18." Technical Specification, December 2023.
- [5] A. Sabbah, A. Jarwan, I. Al-Shiab, M. Ibnkahla, and M. Wang, "Emulation of Large-Scale LTE Networks in NS-3 and CORE: A Distributed Approach," pp. 1–6, 2018.
- [6] E. Visuvanathan, R. Dayana, S. Krishnamurthy, and A. Sarma, "5G UE Simulation," in *2023 International Conference on Recent Advances in Electrical, Electronics, Ubiquitous Communication, and Computational Intelligence (RAEEUCCI)*, pp. 1–5, 2023.
- [7] M. Baumgartner, J. Juhar, and J. Papaj, "Simulation of 5G and LTE-A Access Technologies Via Network Simulator NS-3," in *2021 44th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, pp. 77–80, 2021.
- [8] G. Nardini, D. Sabella, G. Stea, P. Thakkar, and A. Virdis, "Simu5G – An OMNeT++ Library for End-to-End Performance Evaluation of 5G Networks," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181176–181191, 2020.
- [9] R. I. Tinini, M. R. P. d. Santos, G. B. Figueiredo, and D. M. Batista, "5GPy: A SimPy-based Simulator for Performance Evaluations in 5G Hybrid Cloud-fog RAN Architectures," *Simulation Modelling Practice and Theory*, p. 102030, 2020.
- [10] S. Nikolaev, E. Banks, P. D. Barnes, D. R. Jefferson, and S. Smith, "Pushing the Envelope in Distributed NS-3 Simulations: One Billion Nodes," in *Proceedings of the 2015 Workshop on NS-3, WNS3 '15*, p. 67–74, Association for Computing Machinery, 2015.
- [11] L. A. N. Oliveira, M. S. Alencar, W. T. A. Lopes, and F. Madeiro, "On the Performance of Location Management in 5G Network Using RRC Inactive State," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 65520–65532, 2022.
- [12] G. F. Riley, "Large-scale Network Simulations with GTNets," in *Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference*, vol. 1, pp. 676–684, 2003.
- [13] 3GPP, "5G System; Access and Mobility Management Services. TS 29.518, Release 18." Technical Specification, March 2024.
- [14] 3GPP, "Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects. TR 36.814, version 9.2.0. Rel. 9." Technical Standard, March 2017.