

PA5Ge: Implementação de uma Rede Celular Privada com Funcionalidades 5G no Campus da UFPA

Lauro Castro, Cleverson Nahum, Ilan Correa, Leonardo Ramalho e Aldebaro Klautau

Resumo— Este artigo apresenta o estágio atual de implantação da PA5Ge, a qual é uma rede móvel baseada em funcionalidades da quarta (4G) e quinta (5G) gerações, licenciada para operação com fins científicos e experimentais na banda de 700 MHz. A PA5Ge possui características modernas como a virtualização das funções de rede (VNFs) e arquitetura de acesso-rádio centralizada (C-RAN). Um de seus objetivos é servir de plataforma experimental para pesquisas acadêmicas em 5G e redes futuras (B5G). Outro objetivo é gerar *know-how* visando à utilização de recursos 4G/5G nas redes comunitárias em localidades afastadas dos centros urbanos e não atendidas por operadoras comerciais. Neste contexto, a principal contribuição do artigo é descrever o projeto e etapas para implantação da PA5Ge, desde aspectos de licenciamento a técnicos, de maneira a fomentar iniciativas semelhantes de estabelecimento de plataformas para pesquisa experimental em 4G/5G/B5G, e também as no âmbito da engenharia humanitária através das telecomunicações.

Palavras-Chave— 4G, 5G, Redes Comunitárias, Rádio Definido por Software, Licenciamento de Espectro Eletromagnético.

Abstract— This article presents the current stage of the implementation of the PA5Ge, which is a mobile network based on functionalities of the fourth (4G) and fifth (5G) generations, licensed for scientific and experimental purposes in the 700 MHz band. The PA5Ge has modern features such as virtualization of network functions (VNFs) and architecture of Centralized Radio Access Network (C-RAN). One of its objectives is to serve as an experimental platform for academic research in 5G and future networks (B5G). Another objective is to generate *know-how* for the future use of 4G/5G resources on community networks in locations far from urban centers and not served by commercial operators. In this context, the main contribution of the article is the project description and its steps on the implementation of PA5Ge, encompassing licensing aspects to technicians in order to foster similar initiatives to establish platforms for experimental research in 4G/5G and in the scope of humanitarian engineering through telecommunications.

Keywords— 4G, 5G, Community Networks, Software Defined Radio, Licensing of Radio Spectrum.

I. INTRODUÇÃO

O sucesso das redes móveis tem impulsionado a comercialização de uma nova geração padronizada pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP) a, aproximadamente, cada dez anos. Contudo, o escopo das aplicações e os requisitos para a rede de quinta geração (5G) se destacam quando comparados aos das predecessoras. Enquanto as duas primeiras gerações focavam principalmente na transmissão de voz, e as demais passaram a incluir serviços de dados a serem ofertados

por operadoras, a 5G almeja ser ubíqua, impulsionando mercados como redes veiculares, UAV (*unmanned aerial vehicle*), IoT (Internet das coisas) e Indústria 4.0, com avançado suporte para fatiamento (*slicing*) e redes privadas [1]. Dessa forma, o número de novas funcionalidades que já foram e ainda precisam ser desenvolvidas é bem maior do que das redes predecessoras. Isto é tecnicamente desafiador, dado o tempo almejado para atingirem o mercado.

Assim, as redes 5G e suas sucessoras (B5G, de *beyond 5G*) oferecem diversas oportunidades para pesquisa e inovações. Contudo, características avançadas de 5G dificultam a construção de plataformas experimentais com flexibilidade e custo razoável para serem amplamente usadas em pesquisa e desenvolvimento. Atualmente há projetos de software aberto e equipamentos de rádio definido por software (SDR), os quais permitem a implantação de plataformas experimentais de redes de segunda geração (2G) (vide, e. g. [2]). A mesma tecnologia 2G também é usada com sucesso em redes comunitárias [3]. Apesar de haver várias iniciativas semelhantes para a quarta geração (4G) e 5G, ainda há muitas funcionalidades importantes destas redes não disponíveis ou estáveis em projetos de código aberto.

Dentre estes projetos 4G/5G, encontram-se o OpenAirInterface (OAI) [4], free5Gc [5], SRSIte [6] e ONAP [7]. Por exemplo, o projeto free5Gc almeja a implantação do núcleo (*core*) da rede 5G. Já o OAI, disponibiliza não apenas software para o núcleo mas também para a rede de acesso via rádio (RAN, de *radio access network*). Contudo, ambos são complexos e suas documentações dificilmente acompanham o ritmo do desenvolvimento. Em termos de hardware, apesar da evolução significativa da capacidade dos SDRs, o uso de larguras de banda relativamente grandes (por exemplo, 200 MHz) e bandas de alta frequência (por exemplo, ondas milimétricas em 28 GHz ou mais) tem um impacto substancial sobre o custo do hardware. Estão disponíveis *chipsets* e equipamentos altamente especializados e caros com suporte a vários recursos 5G, mas não há kits de desenvolvimento voltados para pesquisas. Portanto, plataformas 5G experimentais com custo razoável, permitem que número maior de instituições possa testar inovações e resultados de pesquisa em cenários realistas. Este artigo busca contribuir neste sentido.

Outra contribuição do artigo é compartilhar o processo adotado para habilitar a Universidade Federal do Pará (UFPA) de uma rede acadêmica para pesquisa em 5G e benefício em redes comunitárias.

As próximas seções deste artigo estão organizadas da seguinte maneira. A Seção II contextualiza a rede PA5Ge e apresenta a motivação para uso de 5G em redes comunitárias. A Seção III aborda aspectos técnicos da rede, incluindo o li-

L. Castro, C. Nahum, I. Correa, L. Ramalho e A. Klautau participam do Grupo de Pesquisa em 5G & IoT, LASSE, Universidade Federal do Pará, Belém 66615-170, Brasil. E-mails: lauro.castro@itec.ufpa.br, {cleversonahum, ilan, leonardolr, aldebaro}@ufpa.br. Este trabalho recebeu o apoio da Secretaria de Estado de Ciência, Tecnologia e Educação Profissional e Tecnológica (SECTET) do estado do Pará.

cenciamento do espectro eletromagnético, hardware e software usados pela mesma, incluindo recursos de virtualização. A Seção IV apresenta avaliações preliminares usadas para validar a rede e a Seção V apresenta as considerações finais.

II. TECNOLOGIA 5G E REDES COMUNITÁRIAS

Antes de serem analisados os aspectos técnicos da PA5Ge na próxima seção, é oportuno contextualizar esta rede no âmbito dos esforços em prol das redes comunitárias.

As tecnologias associadas à Internet avançam vertiginosamente. Essa evolução alcança primeiramente as grandes cidades e, posteriormente, as cidades menores. Entretanto, a economia de mercado não permite que este processo continue até atingir a todos. Os serviços de telecomunicações simplesmente não são ofertados pelas operadoras em comunidades remotas, onde não há retorno financeiro. E a legislação brasileira (ou não respeito à mesma, como no reiterado contingenciamento do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações, FUST), ainda não conseguiu contornar este problema. As comunidades rurais afastadas das sedes dos municípios não são incluídas nos esforços para universalização através das operadoras detentoras de licença para uso de espectro na região. Dessa forma, comunidades isoladas com menos de mil habitantes, por exemplo, simplesmente precisam encontrar sua própria solução pois tanto poder público quanto operadoras encontram-se por demais ocupados para buscarem soluções às mesmas. As redes comunitárias são a solução mais viável nestes casos.

As redes comunitárias vêm se desenvolvendo no Brasil e no mundo. Na Argentina, a Altermundi [8] foi organizada com intuito de implantar redes comunitárias gratuitas usando *mesh*. A Red Fusa Libre [9], é um grupo acadêmico alinhado às iniciativas de implementação usando Wi-Fi de redes comunitárias na Colômbia. Em Oaxaca, no México, a Rhizomatica [10] usa espectro licenciado e tecnologias 3GPP, fazendo não apenas desenvolvimento de suas próprias plataformas de gerenciamento [3] mas também contribuindo para que o México se posicione na vanguarda em termos de regulação para uso do espectro em redes comunitárias. Tal sucesso da Rhizomatica é importante pois na legislação da maioria dos países, inclusive no Brasil, o espectro é bem público. Mas é comum o uso de Wi-Fi (família de padrões IEEE 802.11) para se evitar os transtornos de obtenção de espectro licenciado.

Há redes comunitárias de sucesso em áreas urbanas como favelas. Mas o escopo deste trabalho são as regiões esparsamente povoadas e de baixo desenvolvimento econômico, como a ilha de Marajó. Por isto, este artigo advoga o uso de espectro licenciado. Afinal, deve-se buscar adotar a melhor tecnologia dado que custo é fator premente no caso de uso em questão. O Wi-Fi não foi projetado para prover cobertura em grandes áreas, além de usar frequências relativamente altas, acima de 2 GHz. A tecnologia 5G é mais uma oportunidade para que a sociedade global busque a inclusão digital. O 3GPP prioriza os casos de uso *enhanced mobile broadband* (eMBB), *ultra-reliable low latency communications* (URLLC) e *machine-type communications* (MTC) [11]. Mas há projetos buscando também o aumento da área de cobertura [12], o que pode

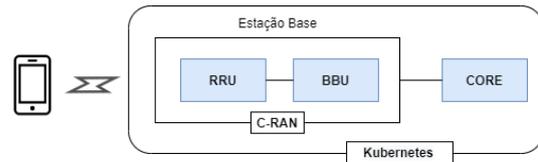


Fig. 1. Componentes da PA5Ge.

beneficiar significativamente redes comunitárias em amplas áreas e esparsamente povoadas, como a Amazônia.

A rede PA5Ge está inserida no escopo do projeto CELCOM, o qual vem buscando implementação de redes usando *hardware* de baixo custo e software *open-source*, sendo brevemente descrito a seguir.

O projeto CELCOM tem como foco principal levar soluções de conectividade a comunidades amazônicas que não são atendidas por operadoras comerciais. O CELCOM vem usando sistemas 2G em duas localidades do Pará. A implantação das redes nestas localidades é um grande desafio, já que muitas encontram-se em locais remotos onde o acesso ocorre via rios ou pequenos ramais que adentram a floresta amazônica [13].

Uma das comunidades chama-se Boa Vista do Acará, localizada no município do Acará, aproximadamente a 6 quilômetros de distância, em linha reta, da capital paraense. O acesso é difícil, realizado por via fluvial, e leva-se aproximadamente 40 minutos para chegar na localidade. Mesmo estando relativamente próxima da capital paraense, a localidade encontra-se desprovida dos serviços de telefonia móvel ofertados por operadoras [14].

A outra rede-piloto encontra-se na comunidade quilombola Campo Verde, localizada no município de Concórdia do Pará. Por meio da parceria do grupo com a empresa de processamento de dados do Pará (PRODEPA), foi possível integrar o sistema de telefonia ao sistema da rede de dados, com isso, serviços de chamadas da comunidade para outras localidades puderam ser implementadas, utilizando-se Voz sobre IP (VoIP) [15].

III. PROJETO E VALIDAÇÃO DA REDE PA5Ge

A PA5Ge utiliza softwares *open-source* em sua implementação, e possui componentes que são mostrados em alto nível na Figura 1. A PA5Ge é composta por dois componentes principais, sendo o primeiro o *Open Air Interface*, que é identificado na figura como a *Base Band Unit* (BBU) e a *Remote Radio Unit* (RRU). O segundo componente é o núcleo da rede, que é implementado com o *software Free 5GC*. Todos os componentes da PA5Ge são virtualizados utilizando *containers* Docker [16] que são gerenciados pela ferramenta Kubernetes [17]. As próximas subseções apresentam detalhes de cada componente da PA5Ge e da virtualização.

A. Licenciamento de espectro centrado em 700 MHz

No Brasil, as redes celulares devem seguir as diretrizes da Resolução da Anatel nº 617/2013 [18], que aprova o Regulamento do Serviço Limitado Privado (SLP). Os licenciamentos existentes e disponíveis para tecnologias de acesso

TABELA I
CARACTERÍSTICAS DA FAIXA DE CENTRALIZADA EM 700 MHz.

Faixa Central (MHz)	700
Banda	28
Largura de Banda (MHz)	10
Modo de duplexação	FDD
EARFCN DL	9210
Downlink (MHz)	758 - 763
EARFCN UL	27210
Uplink (MHz)	703 - 708
Potência de transmissão (Watts)	10

que utilizam o espectro de maneira experimental e com caráter científico são: a licença temporária, que tem durabilidade de sessenta dias e sem possibilidade de prorrogação, e o Serviço Especial para Fins Científicos e Experimentais (SEFCE) [19], com maior período de vigência (2 anos). A PA5Ge opera sob a segunda forma de licenciamento.

Ambas categorias de licenciamento exigem o pagamento de taxas e tributos e operam em caráter secundário, ou seja, deve-se evitar interferências em sistemas de radiocomunicação regularmente autorizados (de caráter primário) que possuem a outorga do uso do serviço e respectivo licenciamento de frequências. Devido à isso, a transmissão do sinal deve observar as condições de uso conforme estabelecidos nos regulamentos previstos no Plano de Destinação de Faixas de Frequência (PDFF) [20].

A PA5Ge opera com emissão permitida pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) na frequência identificada por 700MA9. Na identificação da frequência, o número 700 indica a frequência central de transmissão, a letra “M” indica a unidade de largura de faixa, que neste caso é MHz, a letra “A” indica o tipo de modulação da portadora que é do tipo banda lateral dupla e o número 9 indica transmissão digital. As especificações como EARFCN (E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number), largura de banda do canal, modo de duplexação, frequência de *uplink* e *downlink* e potência de transmissão encontram-se na Tabela I.

B. Rede de acesso de rádio

A rede de acesso de rádio (RAN) é implementada adotando-se a arquitetura *Centralized RAN* (C-RAN), na qual o processamento da eNB é dividido entre a BBU e a RRU. Em C-RAN, a BBU é responsável pelo processamento em banda base e a RRU é responsável pela condicionamento analógico do sinal e algumas tarefas da camada física. Assim, a RRU geralmente é uma unidade mais simples que uma eNB convencional e pode ser instalada próxima aos usuários, enquanto que a BBU é geralmente acomodada em um escritório central (CO, *Central Office*). Os sinais de rádio em banda base são transportados entre a BBU e a RRU por uma conexão chamada *fronthaul* [21].

Para a implementação da RAN, foi utilizado o *software* OAI, o qual implementa vários elementos que compõem as redes 4G e 5G. Um dos softwares disponíveis no OAI é o *open-airinterface5G*, que implementa as funcionalidades da RAN, com suporte à estações rádio-base tradicionais e também suporte à divisão BBU e RRU para implementar a arquitetura

C-RAN. O *open-airinterface5G* suporta conectividade com UEs reais (smartphones), onde, para a geração dos sinais, são utilizados equipamentos que suportam a tecnologia *Software Defined Radio* (SDR), como por exemplo as placas *Universal Software Radio Peripheral* (USRP).

Também é suportada a emulação utilizando recurso chamado OASIM, que pode ser usado para emular um UE. O OASIM é muito utilizado em cenários onde é necessário alterar o *software* do UE para testar novos recursos. A emulação de UEs fornece a vantagem de implementar algoritmos que reproduzem a transmissão dos dados por aparelhos de rádio frequência, levando em consideração fatores como a atenuação do canal e a potência de transmissão. Além disso, o uso de UEs emuladas facilita a geração de resultados já que cada UE gera uma interface de rede dentro do sistema Linux, permitindo que todos os comandos do sistema possam ser usados para gerar os resultados.

A PA5Ge utiliza para o controle da eNB e da rede de acesso o *software* FlexRAN, que permite a gerência centralizada dos recursos da eNB e a mudança de configurações do seu funcionamento em tempo real [22]. Usando o FlexRAN é possível obter informações da rede como a quantidade de usuários conectados, a quantidade de recursos de rádio alocados e até mesmo os seus identificadores na rede. Dessa forma, o sistema permite usar tais informações para alimentar base de dados que, por exemplo, podem ser usadas para o treinamento de sistemas de aprendizado de máquina. Além da obtenção de informações, o FlexRAN permite a alteração de funcionamento da eNB através de ações como a criação de *network slices* [23] e a mudança da quantidade de recursos de rádio alocados para cada um deles.

C. Núcleo da rede

Na PA5Ge foi utilizado o *software* Free5GC para a implementação do núcleo da rede. O projeto OAI possui sua própria implementação do núcleo da rede celular, que é denominado *openair-cn*. Entretanto, na PA5Ge foi utilizado o Free5GC pelo seu suporte à divisão de funções preparada para a evolução do 4G para o 5G. Por exemplo, no momento da escrita desse artigo, a versão estável do *openair-cn* possuía implementações dos módulos do núcleo da rede HSS, MME e SPGW que são específicos para o 4G. Já o Free5GC implementa UPF, AMF, PDFC e outros componentes do núcleo da rede 5G que são compatíveis com 4G.

Dessa forma, na PA5Ge, o *software* Free5GC está preparado para a migração da arquitetura do núcleo da rede do 4G para a arquitetura baseada em serviços (SBA) utilizada pelo 5G. Os elementos do núcleo da rede implementados pelo Free5GC são o *Access and Mobility Management Function* (AMF), *Home Subscriber Server* (HSS), *User Plane Function* (UPF), *Session Management Function* (SMF) e o *Policy and Charging Rules Function* (PCRF).

D. Virtualização

Na PA5Ge, todos os elementos da rede são virtualizados em *containers* [16], utilizando a ferramenta *Docker*, que são orquestrados utilizando a ferramenta *Kubernetes* [17]. O

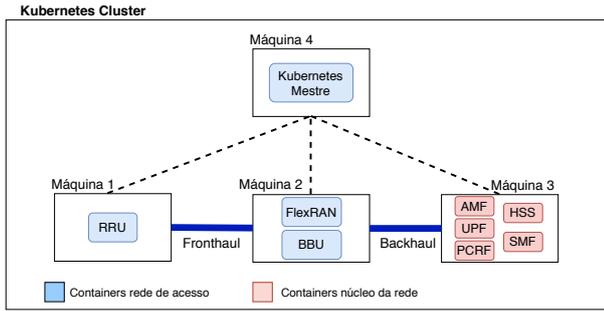


Fig. 2. Representação do cluster Kubernetes orquestrando os containers para a execução da rede móvel nas máquinas disponíveis.

Kubernetes organiza os recursos computacionais disponíveis em um *cluster*, sendo possível concentrar o controle dos *containers* em um computador que funciona como nó mestre. O nó mestre é responsável por definir onde cada *container* será executado, além de monitorar o funcionamento de cada um deles e permitir o controle da operação nos outros nós, como por exemplo a verificação do funcionamento de um nó e os *logs* de cada um dos *containers*. A orquestração dos *containers* com o Kubernetes permite também ajuste dinâmico do processamento entre as máquinas disponíveis. Assim, há maior eficiência no uso desses recursos. Além disso, o *cluster* pode ser facilmente expandido com a adição de mais computadores tornando a infraestrutura escalável.

O Kubernetes é o responsável por distribuir os módulos da rede entre as máquinas disponíveis no *cluster* e realizar a execução dos módulos do OAI e Free5GC, de forma a gerar a rede de celular que transmite o sinal 4/5G para os celulares. Tais características possibilitam um ajuste dinâmico das conexões entre a RRU e BBU [21], e permite realizar o compartilhamento de recursos computacionais no CO, de forma que várias RRU's possam ser atendidas de forma eficiente. A Figura 2 apresenta de forma detalhada como os componentes da PA5Ge são virtualizados, sendo que a Máquina 1 é responsável por executar a RRU, a Máquina 2 executa a BBU e FlexRAN, a Máquina 3 executa os componentes do núcleo da rede e a Máquina 4 é responsável pela orquestração das outras máquinas. A Figura 2 também mostra conexão de fronthaul entre a RRU e a BBU e a conexão de backhaul que interliga a BBU e o free5GC (núcleo da rede). Os enlaces do fronthaul e do backhaul são implementados com conexões Ethernet.

IV. VALIDAÇÃO DA REDE PA5Ge

Esta seção apresenta os testes feitos para validação da rede. Em função da pandemia, não foram instalados equipamentos *outdoor* e a validação foi feita em laboratório. Para avaliar o desempenho da PA5Ge foram conectadas 2 UEs emuladas à rede. A emulação é realizada no próprio módulo da RRU. Ou seja, com a emulação habilitada, o módulo da RRU emula a transmissão do sinal e as UEs. Na avaliação, as máquinas representadas na Figura 2 possuem um processador Intel Core i5-7500 CPU@3.4 GHz, 8 GB de memória RAM DDR4, utilizam sistema operacional Linux Ubuntu 18.04 com um kernel de baixa latência.

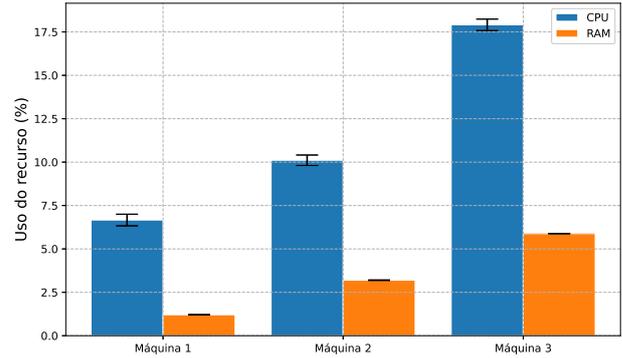


Fig. 3. Uso da CPU e memória RAM das máquinas que executam os componentes da rede móvel.

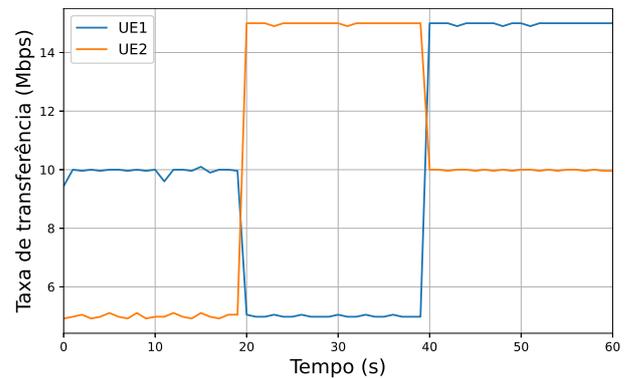


Fig. 4. Tráfego obtido pelas 2 UEs conectadas na rede móvel.

A Figura 3 apresenta a porcentagem de uso da CPU e memória RAM das máquinas que compõe o cluster Kubernetes que executam funções da rede. A Máquina 1, que é a responsável por executar as funções da RRU, é a que possui menor uso tanto da CPU quanto da memória, sendo um comportamento esperado da arquitetura C-RAN que acaba por concentrar o processamento da eNB na BBU. A Máquina 2 implementa a BBU e conseqüentemente o processamento e uso de memória são maiores que o da máquina da RRU, porém, a diferença de uso nas duas máquinas não é significativa. A Máquina 3 que é a responsável pela execução do núcleo da rede é a que apresenta maior processamento e uso de memória.

A Figura 4 mostra o teste de tráfego com as duas UEs conectadas à rede. A ferramenta Iperf [24] foi utilizada para a geração de tráfego na UEs, utilizando um cliente Iperf em cada uma das UEs e um Iperf server em uma máquina da rede local. Com isso o tráfego gerado pelo Iperf é transportado através da rede de celular. O tráfego requisitado pelo cliente Iperf em cada uma das UEs ao longo do tempo foi variado entre os valores de 5, 10 e 15 Mbps, onde cada uma das UEs requisita uma dessas taxas por 20 segundos. Na Figura 4 a taxa de transferência de uma UE sofre pequenas variações em torno do valor requisitado pelo cliente Iperf devido a fatores como a qualidade do canal e o compartilhamento de recursos com a outra UE conectada.

Utilizando o FlexRAN é possível obter informações sobre o configurações e funcionamento da eNB, além de informações sobre as UEs que estão conectadas na mesma. A Figura 5

JSON	Raw Data	Headers
Save	Copy	Collapse All
	Expand All	Filter JSON
▼ UE:		
▼ ueConfig:		
▼ 0:		
rnti:	59046	
timeAlignmentTimer:	7	
measGapConfigPattern:	4294967295	
measGapConfigSf0ffset:	4294967295	
transmissionMode:	0	
ueAggregatedMaxBitrateUL:	"0"	
ueAggregatedMaxBitrateDL:	"0"	
capabilities:	{...}	
ueTransmissionAntenna:	2	

Fig. 5. Captura de tela com parte da resposta da API do FlexRAN contendo informações sobre uma das UEs conectadas na eNB.

mostra parte da resposta obtida através da utilização da API do FlexRAN requisitando informações sobre a eNB. A UE mostrada na figura possui um identificador temporário de rede de rádio (RNTI) igual a 59046, usa a antena 2 e o modo de transmissão 0. Mais informações estão disponíveis através da API, como por exemplo a divisão de funções utilizada por uma eNB com a arquitetura C-RAN, os fatiamentos da rede associados a cada UE e a quantidade de recursos de rádio disponível para cada uma dessas fatias de rede. Essas informações podem ser úteis em várias aplicações, por exemplo, para alimentar de base de dados para treinamento de métodos de aprendizado de máquina, de forma a gerar algoritmos que possam adaptar os parâmetros de configuração e funcionamento da eNB para a otimização da rede móvel.

V. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o estágio atual da implementação de uma rede 4G/5G no campus da UFPA que utiliza tecnologias *open-source* e espectro licenciado na banda de 700 MHz. Foram apresentados todos os componentes que implementam a rede e como estes são virtualizados. As avaliações preliminares demonstraram o funcionamento da rede através do tráfego gerado por usuários emulados conectados à rede celular e as informações de funcionamento e configuração da eNB. Como trabalho futuro, pretende-se implementar a rede 4G/5G no campus da universidade com integração de *front-end* de alta potência para cobrir todo o campus. Além disso, pretende-se iniciar a avaliação da viabilidade do emprego dessa rede em localidades que já estão sendo assistidas pelo projeto CELCOM. Outros objetivos futuros residem no uso da rede para atividades de pesquisa em 5G/B5G, tal como IoT e MTC aplicados à Agricultura 4.0.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, and J. Skold, *5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology*. Elsevier Science, 2018.
- [2] B. V. Boas, M. Dias, P. Batista, A. Oliveira, A. Klautau et al., "Celcom project: Engineering practice via community networks in amazon," *international journal of engineering education*, vol. 35, no. 5, p. 1425, 2019.
- [3] Rhizomatica, "Rhizomatica/rccn." [Online]. Available: <https://github.com/Rhizomatica/rccn>
- [4] "OpenAirInterface – 5G software alliance for democratising wireless innovation." [Online]. Available: <http://www.openairinterface.org/>
- [5] Free5GC. (2019) Free5GC: Open-source 5GC. [Online]. Available: <https://www.free5gc.org/>
- [6] I. Gomez-Miguel, A. Garcia-Saavedra, P. D. Sutton, P. Serrano, C. Cano, and D. J. Leith, "srsLTE: an open-source platform for lte evolution and experimentation," in *Proceedings of the Tenth ACM International Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation, and Characterization*, 2016, pp. 25–32.
- [7] V. Q. Rodriguez, F. Guillemin, and A. Boubendir, "Automating the deployment of 5g network slices with onap," *arXiv preprint arXiv:1907.02278*, 2019.
- [8] M. Baladrón, "Redes comunitarias: acceso a internet desde los actores locales," *Hipertextos*, vol. 6, no. 9, pp. 65–98, 2018.
- [9] L. F. Ramírez Gorron, C. A. Valencia Arteaga, and J. C. Pereira Pérez, "Propuesta de estudio de viabilidad orientado a la implementación de herramientas tecnológicas "redes libres" en comunidades donde el acceso a internet es mínimo," Ph.D. dissertation, Bogotá: Ecsan, 2019.
- [10] E. Huerta, P. Bloom, and K. Velasco, "6 the success of community mobile telephony in mexico and its plausibility as an alternative to connect the next billion," *Community networks: the Internet by the people, for the people. Official outcome of the un igf Dynamic Coalition on Community Connectivity. Rio de Janeiro: Escola de Direito do Rio de Janeiro da Fundação Getulio Vargas*, pp. 119–150, 2017.
- [11] A. Anand, G. De Veciana, and S. Shakkottai, "Joint scheduling of urllc and embb traffic in 5g wireless networks," *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 28, no. 2, pp. 477–490, 2020.
- [12] A. Ferreira et al., "5G-RANGE project field trial," in *2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*. IEEE, 2019, pp. 490–494.
- [13] G. Leão, M. Lima, L. Castro, E. Junior, L. Pinto, and A. Klautau, "Projeto celcom: Um processo de inclusão digital em comunidades isoladas através de redes comunitárias," *Anais do Computer on the Beach*, pp. 666–675, 2019.
- [14] L. Castro, G. Laredo, E. Oliveira, M. Dias, F. Muller, and A. Klautau, "Uso de rede de telefonia celular comunitária para inclusão social e digital na amazônia," *XXXVII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais – SBrT2019*, p. 1–1, 2019.
- [15] E. S. Oliveira Junior, M. V. Dias, B. Vilas Boas, and A. Klautau, "Celcom: Tecnologias e experiências adquiridas em redes de telefonia comunitárias no brasil." *SBRT 2018*, p. 905–906, 2018.
- [16] B. B. Rad, H. J. Bhatti, and M. Ahmadi, "An introduction to Docker and analysis of its performance," *International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS)*, vol. 17, no. 3, p. 228, 2017.
- [17] E. A. Brewer, "Kubernetes and the path to cloud native," in *Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Cloud Computing*, 2015, pp. 167–167.
- [18] M. I. Aranha, J. A. d. O. Lima, and R. T. d. M. Quelho, "Normas primárias e secundárias do setor de telecomunicações-2013," *Revista de Direito, Estado e Telecomunicações*, 2013.
- [19] "Serviços especiais para fins científicos e experimentais - anatel." [Online]. Available: <https://anatel.gov.br/setorregulado/servico-especial-para-fins-cientificos-e-experimentais>
- [20] "Anatel." [Online]. Available: <http://www.anatel.gov.br/setorregulado/atribuicao-destinacao-e-distribuicao-de-faixas>
- [21] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger, and L. Dittmann, "Cloud ran for mobile networks—a technology overview," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 405–426, 2014.
- [22] X. Foukas, N. Nikaein, M. M. Kassem, M. K. Marina, and K. Kontovasilis, "Flexran: A flexible and programmable platform for software-defined radio access networks," in *Proceedings of the 12th International Conference on emerging Networking EXperiments and Technologies*, 2016, pp. 427–441.
- [23] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, "Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2429–2453, 2018.
- [24] A. Tirumala, L. Cottrell, and T. Dunigan, "Measuring end-to-end bandwidth with iperf using web100," in *In Web100, Proc. of Passive and Active Measurement Workshop*. Citeseer, 2003.