



Implementação de Redes LTE/5G Privadas na CELESC: Avanços em Automação, IoT e Modernização do Setor Elétrico

Tema: Tecnologias Emergentes

Autores: Guilherme Saidler, Giancarlo Scolaro, Tiago Silva, André Luiz Carneiro Araújo, Fabrício Evangelista Sousa, Rogério Guerra Diógenes Filho, Jamilly Cristina de Sousa, Francisco Gustavo Lopes da Silva

Co-Autores: -

Empresa: NEPEN

Resumo

O projeto GS5G (P&D ANEEL 05697-0223/2023), executado pela CELESC em parceria com o NEPEN, visa modernizar o setor elétrico brasileiro utilizando redes LTE/5G privadas. A iniciativa aborda a integração de tecnologias emergentes, como IoT, realidade aumentada/virtual (RA/RV), medição inteligente e automação de subestações, em uma infraestrutura de telecomunicação convergente e escalável. Os testes de laboratório validaram casos de uso essenciais, como teleproteção com latência ultrabaixa (<10 ms), throughput de até 960 Mbps, comunicação crítica via Push-to-Talk (PTT) e Push-to-Video (PTV), além da integração com redes Wi-SUN para medição avançada e automação de sistemas. O trabalho está organizado em etapas que contemplam desde a validação em laboratório até a implantação em campo.

A próxima fase inclui consolidar os casos já validados e expandir a implantação para cenários operacionais reais, como instalação de medidores inteligentes, automação de relés de subestação e adoção de RA/RV para treinamento e diagnóstico remoto. Restam desafios relacionados à instalação, licenças ANATEL e integração ao sistema comercial de gestão Open MDX. Com previsão de conclusão até abril, o projeto alcançará o nível TRL 8, posicionando a CELESC como pioneira no uso de redes privadas LTE/5G no Brasil, com benefícios amplos para o setor elétrico.

1. Introdução

A transformação digital no setor de energia tem sido acelerada pela implementação de redes de telecomunicação próprias, capazes de suportar aplicações críticas com alta confiabilidade, segurança e escalabilidade (Fan et al., 2020). As redes privadas *Long Term Revolution* LTE e 5G emergem como soluções tecnológicas estratégicas, permitindo que distribuidoras de energia integrem e modernizem seus processos operacionais. Essas redes multisserviços são projetadas para garantir conectividade robusta em diversos cenários, substituindo tecnologias legadas, como rádios trunking, SDH, rádios em VHF e UHF e rádios digitais ponto a ponto e multiponto, que apresentam limitações em termos de largura de banda, latência e capacidade de integração com sistemas modernos (Reka et al., 2019).

Redes multisserviços são especialmente relevantes para aplicações de missão crítica, onde a continuidade operacional é imprescindível. Além disso, no Brasil, a entidade reguladora ANEEL incentiva sempre a melhoria operacional e aplica multas altíssimas em caso de descumprimento de indicadores de qualidade e continuidade da rede, podendo levar até à perda de concessão (ANEEL, 2019). Estudos destacam o papel das redes privadas na habilitação de serviços de automação, medição inteligente e teleproteção, demonstrando como a infraestrutura baseada em padrões LTE/5G pode superar as restrições de redes convencionais (Reka et al., 2019; Parthasarathy et al., 2021; Taveras Cruz et al., 2023). Essas redes não apenas suportam maior densidade de dispositivos conectados, mas também oferecem latência ultrabaixa, essencial para sistemas de proteção e resposta rápida a falhas.

A substituição de tecnologias legadas por redes LTE/5G permite a convergência de múltiplos serviços em uma única infraestrutura de telecomunicação. Isso reduz a complexidade operacional e melhora a gestão de ativos ao integrar diferentes aplicações, como iluminação pública inteligente, medição avançada, teleproteção e sistemas de segurança com vídeo analítico (Adrah et al., 2022). Essa infraestrutura moderna também facilita a substituição de enlaces que tradicionalmente exigiriam cabos ou fibras ópticas, como aplicações de teleproteção, viabilizada pela característica do 5G de latência ultrabaixa (Wikström et al., 2019). Outro caso de uso é o emprego de realidade aumentada e virtual por meio de óculos inteligentes, otimizando procedimentos complexos e melhorando a capacidade de diagnóstico remoto.

Além disso, as redes LTE/5G podem substituir o uso de redes públicas de telecomunicações para tarefas como gestão de ordens de serviço, proporcionando maior disponibilidade, controle e integração. O uso desse tipo de abordagem permite a centralização de serviços críticos em uma única infraestrutura, o que significa uma melhor gestão do sistema, além de padronizar a oferta de serviços dos fornecedores, por utilizar um padrão já estabelecido 3GPP (Li et al., 2021).

Esse modelo de rede, centrado na convergência e escalabilidade, integra novas tecnologias como IoT, RA e RV, enquanto aprimora os serviços já existentes com maior eficiência e confiabilidade, destacando-se pela padronização de serviços e pelas principais características do 5G: baixa latência, alta capacidade de banda e confiabilidade. Nesse sentido, a CELESC partiu para uma implantação de redes LTE/5G privadas, que permitirá a integração de diversas aplicações essenciais já em uso na empresa e habilitará novas possibilidades, como medição inteligente por meio de NB-IoT e LTE-CatM1, teleproteção sobre 5G, monitoramento remoto e automação de subestações, padronização de *backhaul* de LTE para redes WiSUN, auxílio à operação com RA e RV para capacitação técnica e diagnósticos em campo, além de comunicação de missão crítica via Push-to-Talk e Push-to-Video. Essa abordagem da CELESC é pioneira no contexto de distribuição de energia no país, ao usar LTE e 5G. Para além disso, também visa a substituição de redes públicas para gestão de ordens de serviço e possível uso dessa rede em iluminação pública e sensores IoT, não servindo apenas para distribuição, como para outros serviços para cidades inteligentes. Este artigo abordará o caso de uso específico da CELESC, apresentando resultados parciais já obtidos em laboratório e destacando os benefícios de convergência e modernização proporcionados pelas redes LTE/5G no setor elétrico.

2. Desenvolvimento

2.1 VISÃO GERAL

Uma rede multiserviço baseado em LTE/5G é sobretudo uma rede wireless, que garante através do fatiamento de frequência, tecnologia e controle de acesso à rede SLAs adequados para diversas aplicações, inclusive missão crítica (Borsatti et al., 2023). A Figura 1 ilustra a visão geral da arquitetura.

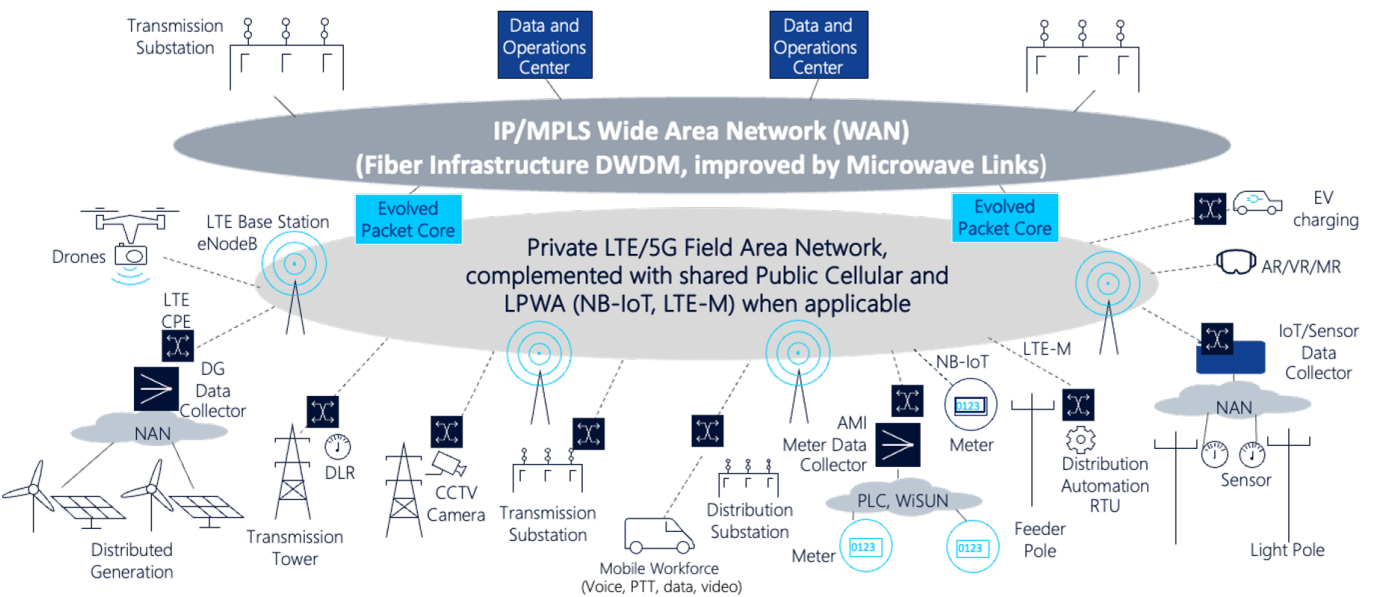


Figura 1 - Arquitetura geral da aplicação.

Para o projeto, foi selecionado algumas frequências específicas, em LTE B28 e B87 (700 MHz e 410 MHz), em 5G N78 (3,5 GHz). A escolha das duas frequências menores em torno de 400 são devido ao longo alcance que possuem, ideal para implantar uma rede em região metropolitana, devido a obstáculos e garantir o menor investimento em torres, conforme exemplo comparativo das frequências apresentado na Figura 2. Além disso, a ANATEL liberou as faixas de 410 e 450 MHz para uso preferencial por empresas de Serviço Limitado Privado (SLP), conforme ato nº 915 (ANATEL, 2024). A CELESC se enquadra na categoria.

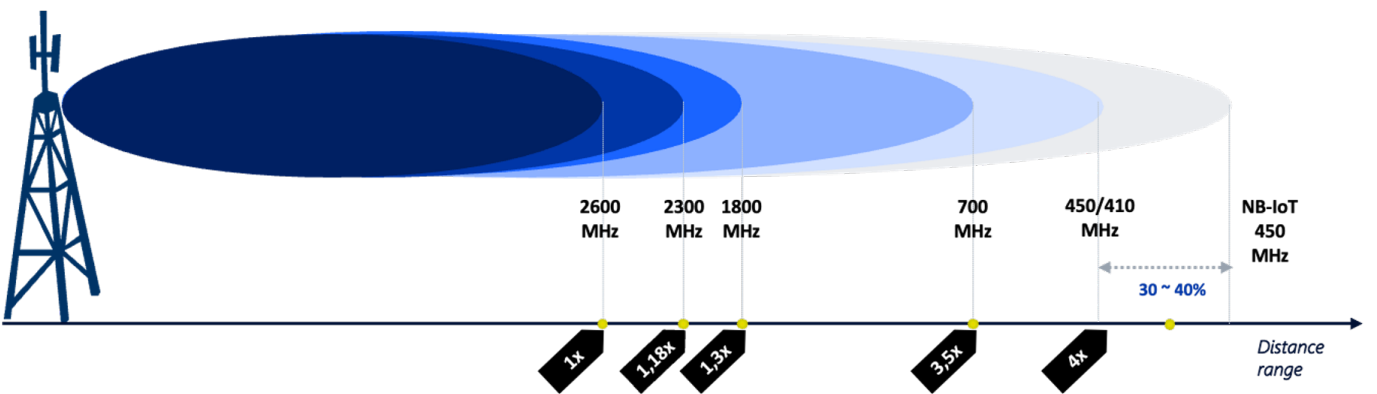


Figura 2 - Distância de comunicação de acordo com a frequência.

2.2 - ARQUITETURA DA REDE

O projeto concluiu a etapa de laboratório, onde realizamos uma série de testes para validar a viabilidade técnica e operacional da rede LTE/5G privada aplicada às demandas do setor de distribuição de energia elétrica. Durante a validação em laboratório, foram testadas diversas aplicações e casos de uso, essenciais para operações da CELESC, incluindo medição inteligente por meio de protocolos NB-IoT e LTE-CatM1, teleproteção com foco em latência ultrabaixa, comunicação de missão crítica via Push-to-Talk (PTT) e Push-to-Video (PTV), além de aplicações de realidade aumentada e virtual (RA/RV) para capacitação técnica e diagnóstico remoto, essas últimas apenas no momento atual apenas foram levantados os requisitos e definido as ferramentas. Também avaliamos a integração da rede com sistemas de backhaul LTE para redes Wi-SUN e realizamos testes para substituir enlaces tradicionais, como os que utilizam fibras ópticas, em cenários críticos. A arquitetura de rede e as aplicações de forma resumida podem ser visualizadas na Figura 3.

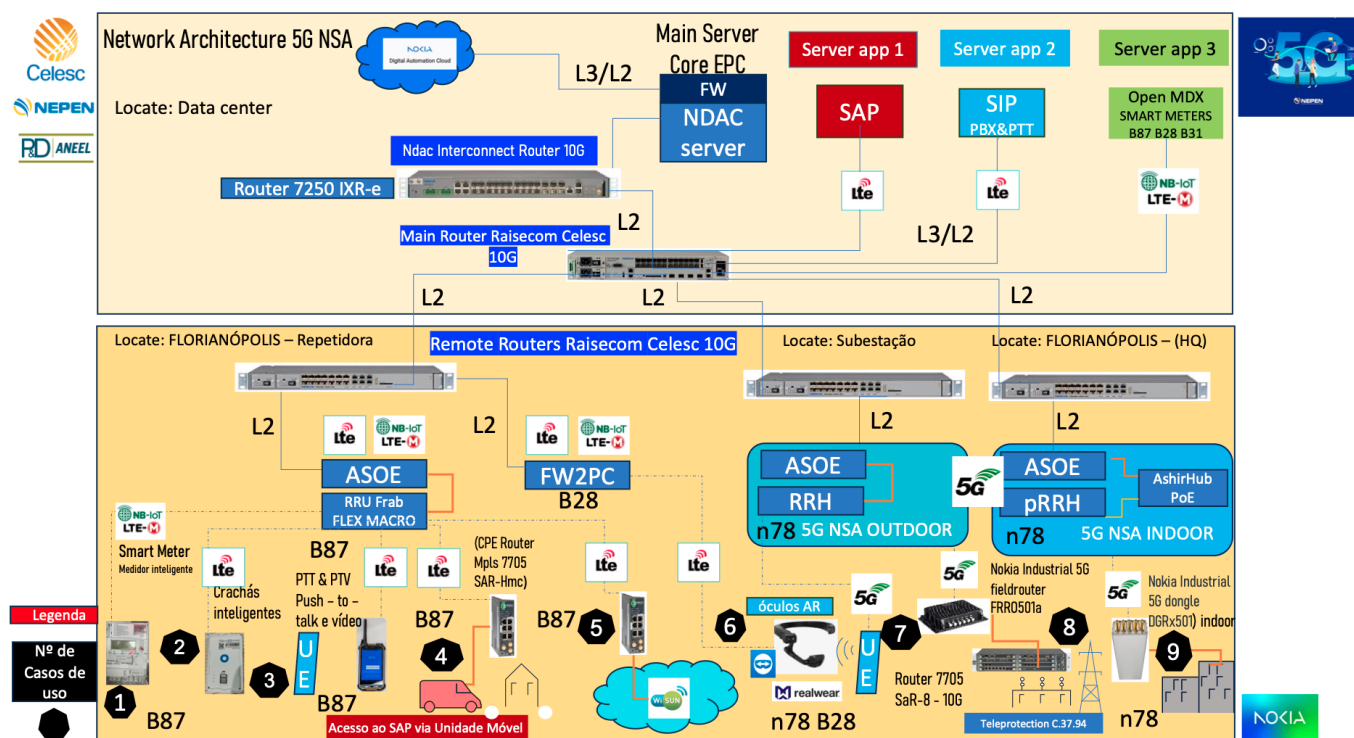


Figura 3 - Arquitetura de rede com aplicações e caso de uso na CELESC.

A arquitetura da rede é baseada em tecnologias LTE e 5G NSA (*Non-Stand-Alone*). Ela é suportada pelo *Nokia Digital Automation Cloud* (NDAC), que fornece uma infraestrutura multisserviços robusta, escalável e confiável. O *NDAC Edge Core* é o elemento central dessa arquitetura, responsável pelo gerenciamento da rede, segurança, e conectividade de baixa latência, aspectos fundamentais para o suporte a aplicações críticas. O uso da arquitetura 5G NSA foi estrategicamente selecionado, pois permite a utilização de infraestrutura LTE já existente, combinada com as capacidades do 5G, oferecendo um excelente custo-benefício e uma transição gradual para a plena integração com o 5G no futuro.

A rede foi configurada com três componentes principais que suportam as operações. O primeiro é a *Radio Access Network* (RAN), composta por estações base e pontos de acesso que operam em frequências específicas, como 410 MHz (B87), utilizada para conectividade de medidores inteligentes, e 700 MHz (B28), que oferece maior cobertura para aplicações gerais. Adicionalmente, a banda N78 (3.5 GHz) foi integrada para suportar maior capacidade de transmissão e casos de uso que exigem alta largura de banda, bem como aplicações de baixa latência, como é o caso de RA com operação assistida e teleproteção. O segundo componente é o NDAC *Edge Core*, que gerencia a comunicação entre os dispositivos e a rede corporativa, garantindo segurança, isolamento e eficiência na troca de dados. Por fim, o terceiro componente é a *Customer Packet Data Network*, que conecta a rede privada aos sistemas corporativos, permitindo a integração de sistemas, como SAP, medidores inteligentes e aplicativos de automação e teleproteção.

2.3 – CASO DE USO DE APLICAÇÕES

A implementação de uma rede privada LTE/5G pela CELESC possibilita explorar uma ampla gama de aplicações para o setor energético, desde aplicações *Smart Metering*, IoT, automação, dentre outros. Nessa seção serão apresentados nove casos de usos exemplificados na Figura 3, que fazem parte do escopo do processo de validação da rede LTE/5G CELESC. Cada tipo de aplicação e caso de uso utiliza uma frequência e tecnologia diferente (LTE, 5G, NB-IoT/CATM1). Para melhor identificar, a Figura 4 é complementar a Figura 3 com mais detalhes sobre as frequências utilizadas.

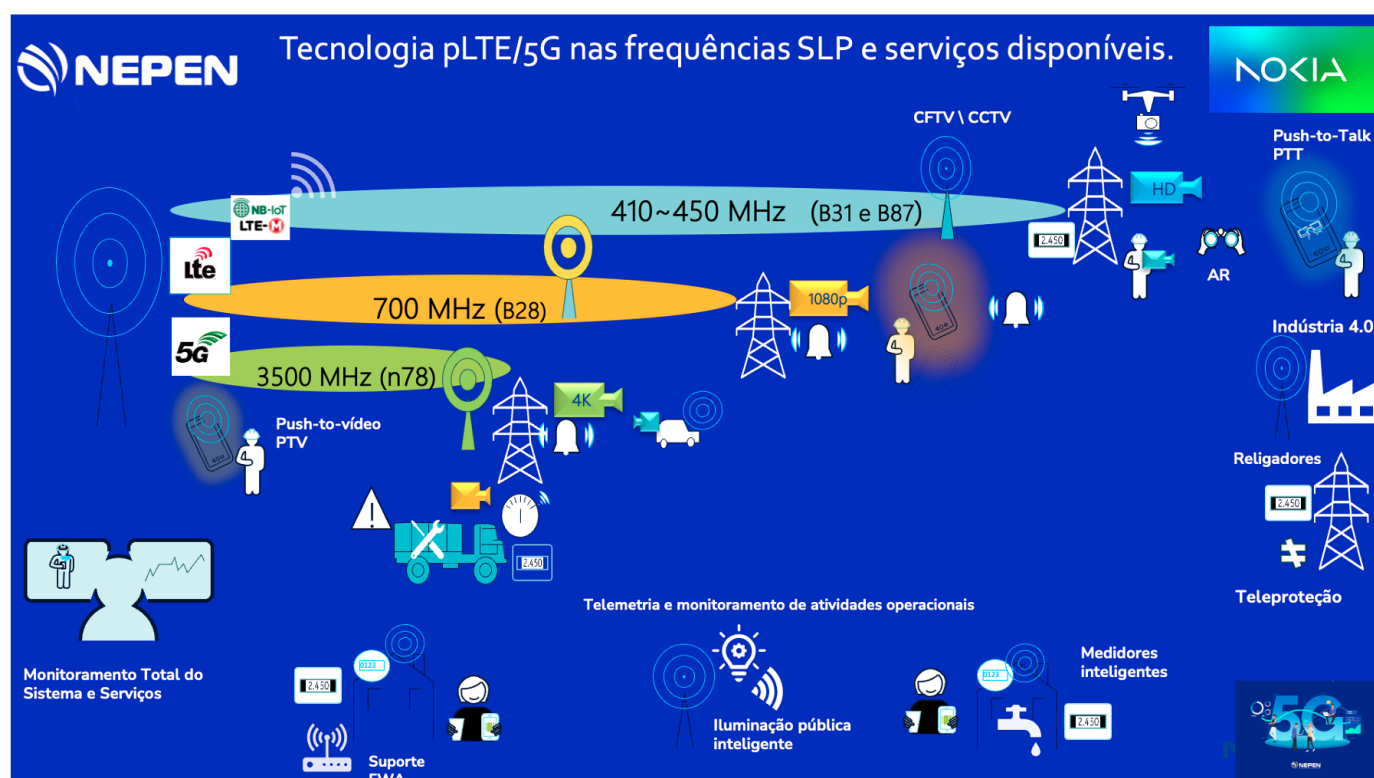


Figure 4 - Casos de uso e frequências utilizadas.

2.3.1 - AMI – ADVANCED METERING INFRASTRUCTURE

Para o caso de uso AMI, foi explorado duas aplicações das redes Privativas LTE/5G. A primeira é o LTE direto no medidor, via NB-IoT e CATM1, operando nas bandas B87 (410 MHz) para telemetria de Smart

Metes. A segunda é via concentrador de rede Wi-SUN, que utiliza repetidores e uma rede de rádio digital para comunicação com dispositivos de baixa potência, onde será substituído o rádio por solução LTE ou 5G. Os dois casos de uso são apresentados na Figura 5.

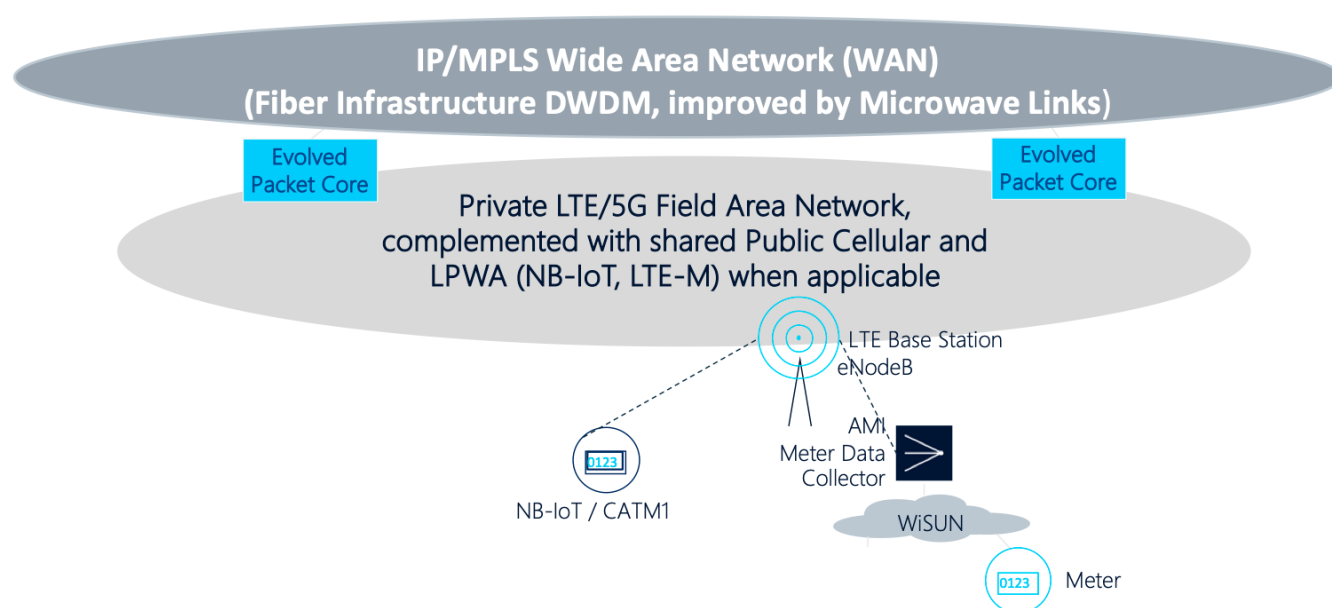


Figure 5 - Uso da rede LTE/5G CELESC para Medição Inteligente.

Na aplicação de *Smart Metering* estão previstos a instalação de 690 medidores inteligentes diretamente conectados a uma rede celular privada usando NIC NB-IoT e CATM1, tecnologias presentes nas redes LTE. Referenciando a Figura 3, trata-se de caso de uso número 1. No projeto exploraremos esse cenário usando das bandas B87 (410 MHz) e B28 (700 MHz), na mesma NIC. O alcance de quilômetros do sinal celular e a conexão de milhares de dispositivos para cada setor disponibilizada por estação rádio-base são feitas pela rede LTE com NB-IoT, o que oferece um equilíbrio ideal entre cobertura e capacidade de penetração em estruturas. Esta tecnologia é necessária para garantir a telemetria dos Smart Meters e dados em tempo real sobre o consumo de energia, permitindo uma melhor gestão e otimização do fornecimento de energia.

Os medidores utilizados no projeto são medidores do fabricante ELETRA e o modelo do medidor é o Zeus-NG. A NIC desenvolvida possui a capacidade de conectar via NB-IoT, CATM1 nas frequências de 410, 450, 700 e 1800 MHz. Todas essas frequências são possíveis devido a uma antena interna projetada para operar em todas essas frequências, sem a necessidade de mudança de antena. A alteração da frequência escolhida é feita pelo firmware da NIC e/ou via comando externo. A Figura 6 ilustra a NIC desenvolvida (imagem à esquerda) com destaque para a antena projetada e a também o medidor com a NIC instalada (imagem à direita), que foi testada na rede da CELESC. A Figura 7 apresenta o medidor conectado no OPEN MDX, um *Metering Data Collector* (MDC) de padrão aberto que permite a interconectividade com vários fabricantes.

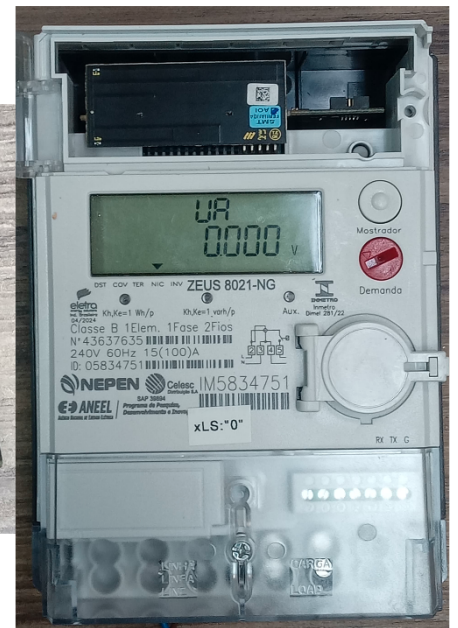
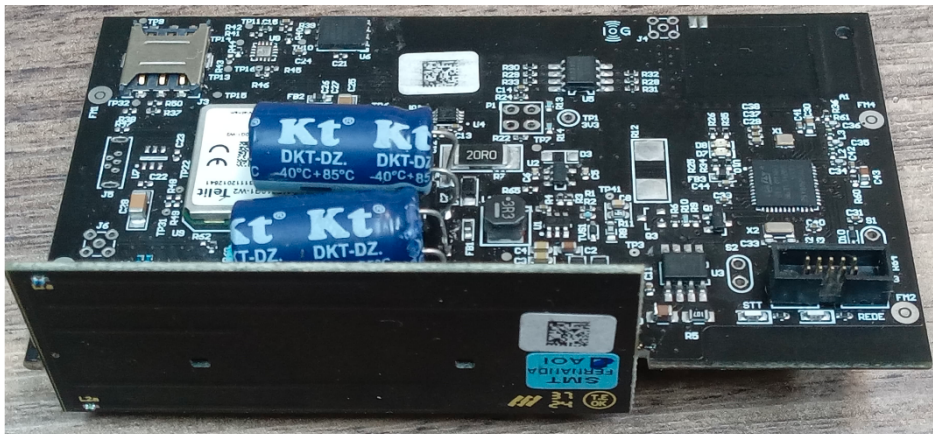


Figure 6 - NIC com antena que suporta B87, B31, B28 e B3 (esquerda). Medidor Zeus NG com a NIC.

Browser address bar: Não seguro mdc.homol.celesc.com.br/#/medidores/info/15721876

Browser tabs: Apps, Guide 2 Research, IoT Platform, lecture01_Introduc..., lwm2m协议 - 超哥..., GLCM - Online La..., How to train YOLO..., 10.7.7.11, Todos os favoritos

Page Title: OPEN MDX

Page Content:

Medidor		Modem	
Serial:	15721876	EUI:	0080E12700FA40C0
Fase:	Trifásico	Tipo de Rede:	Privada
Modelo:	NSX 324i	Tipo de Tecnologia:	NB-IoT
Latitude / Longitude:	0,0	Versão do firmware:	2.2.4-3
Fabricante:	NANSEN	Qualidade do Sinal	Excelente (5 Barras)
Versão de Firmware:	Versão de Firmware não Cadastrada	SNR:	-20,00
Código de Instalação:	15721876	RSSI:	-111,00
Fila de Comandos:	0	IMEI:	35603110033151
Período Uplink de Leitura:	10M	ICCID:	8900099200002247261
Estado do Relé:	Ativado	IMSI:	999400000574726
Estado de comunicação do medidor:	Online	Operadora:	CELESC
Tensão de referência:	Tensão de Referência desconhecida	Boot Counter:	40
Display configurado:	Não	IP:	Sem informação
Tags:	B87 NB-IoT	CELL ID:	Sem informação
CRC memória de massa:	NANSEN PROFILE 1 TRI (0x6C420007)	Última atualização:	14/11/2024 10:57:56
CRC Energia:	NANSEN (0xFDA7BF2)		
Última comunicação com MDC:	24/11/2024 06:38:53		
Última comunicação:	24/11/2024 06:38:53		
Último comando executado:			

Buttons: Resetar a NIC

Page Footer: Estado de Comando, Estado de Comunicação

Figure 7 – Medidor conectado no Open MDX.

Para além das soluções de *smart metering* com conectividade NB-IoT, a CELESC possui em Florianópolis e Araranguá uma rede Wi-SUN (Mulder e Tedeschi, 2024), uma tecnologia de comunicação sem fio baseada em topologia mesh, projetada para conectar dispositivos de baixa potência em ambientes urbanos. A Wi-SUN é recomendada para redes inteligentes quando há dispositivos concentrados em uma área geográfica densa, como medidores de energia, sensores, iluminação pública e outros dispositivos IoT, exceto os de alto consumo energético.

A infraestrutura da rede Wi-SUN em Florianópolis é composta por medidores (nós da rede), repetidores e concentradores, que trabalham em conjunto para garantir uma cobertura. Os repetidores ampliam o alcance da rede ao retransmitirem sinais entre dispositivos finais e concentradores, enquanto os concentradores utilizam uma rede de rádio digital para comunicação com o mundo IP. Essa rede de rádio digital atua como o backhaul do concentrador, garantindo conectividade com a infraestrutura de rede IP da CELESC.

Uma alternativa moderna e eficiente que a rede LTE/5G pode oferecer é funcionar como *backhaul* para os concentradores Wi-SUN, substituindo as redes ponto-multiponto atualmente baseadas em rádio *Digital Mobile Radio* (DMR). Essa abordagem permite uma solução mais robusta, escalável e integrada, aproveitando a capacidade do LTE/5G para suportar múltiplos serviços em uma infraestrutura única.

Além disso, essa alternativa não se limita ao projeto de Florianópolis. Ela também pode ser aplicada ao projeto de Araranguá-SC, expandindo os benefícios da conectividade LTE/5G para outros cenários operacionais já em uso operacional na CELESC. Essa caso de uso na Figura 3 é representado pelo número 5.

2.3.2 - Comunicação de missão crítica PTT (Push-to-talk) e PTV (Push-to-vídeo)

Uma aplicação que também é suportada é comunicação de missão crítica usando PTT e PTV. Essas aplicações são úteis sobretudo em casos de desastres naturais como as ocorridas em outubro de 2023 onde 67 municípios decretaram estado de emergência devido às inundações.

Além das chamadas em tempo real de voz, dados e vídeo, smartphones industriais ou celulares padrão 5G/LTE com aplicativo Android conectados à rede celular privativa permitirão a comunicação de grupo entre os agentes/eletricistas de campo, aumentando assim a eficácia operacional das equipes. A Figura 8 apresenta os testes realizado em laboratório. Referenciando a Figura 3, esse é o caso de uso número 3.

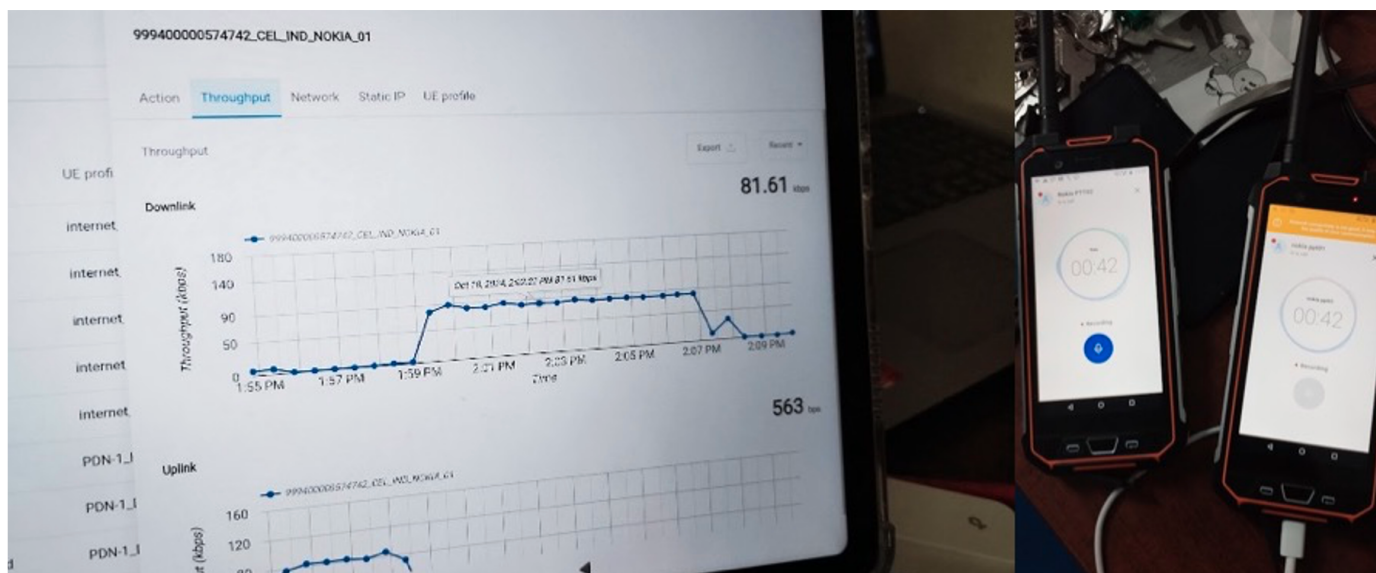


Figura 8 - Teste em laboratório com PPT e PPV.

2.3.3 – CPE LTE B87 – “CARRO CONECTADO”

Pensando em utilizar infraestrutura de tablets e PDAs já em uso pelas equipes operacional, outro caso de uso, na Figura 3 exemplificado pelo número 4, foi utilizado um equipamento CPE LTE na frequência B87 e em sua saída foi ligado um *Access Point* (AP) WiFi industrial. Para serviços de dados e comunicação corporativa em unidades móveis operacionais. Nesse caso de uso os eletricitistas utilizarão os próprios equipamentos como celulares e tablets através da rede hotspot criada no veículo por esse roteador para acessar ordens de serviço pelo sistema SAP, serviços de voz em missão crítica, teams da microsoft ou ramal direto do PBX sip da empresa. Esse tipo de roteador pode ser instalado em unidades móveis ou fixas na rede elétrica externa em via pública. Ele pode fornecer vários tipos de conectividade pela rede IP com vários protocolos disponíveis como o protocolo MPLS em unidades fixas ou móveis da companhia. Oferecendo tripla abordagem de conexão de acesso a rede corporativa e ainda realizar ativação de relógios na rede elétrica por comunicação IP ou serial. Gerando digitalização e automação de proteção do sistema elétrico de baixa e média tensão. Otimizando o tempo de resposta na restauração do serviço de fornecimento prestado pelas companhias e já preparando a rede para as novas tecnologias emergentes como uso de IA nas decisões de acionamentos e restabelecimentos de grandes regiões em caso de quedas de fornecimento de energia.

2.3.4 – OUTROS CASOS DE USO

Crachá Inteligente

Esses dispositivos utilizam a rede LTE privada na faixa B28 700Mhz e futuramente na rede 5G N78 3500Mhz para auxiliar e monitorar todo efetivo operacional da companhia. Com ele é possível acionar o botão de pânico em um dos seus três botões programáveis com a finalidade garantir ainda mais a segurança das equipes em campo. Se o serviço de comunicação IMS estiver ativado na rede também é possível estabelecer chamadas de voz de emergência quando o colaborador estiver em perigo eminente. Além de programações de cerca operacional invisível para que quando o colaborador se afastar da sua área de atuação o sistema de monitoramento gera gerando um alerta para as equipes de segurança (pessoal, do trabalho

ou patrimonial) em caso de acidentes ou ocorrências diversas. A Figura 9 apresenta o teste realizado na CELESC.

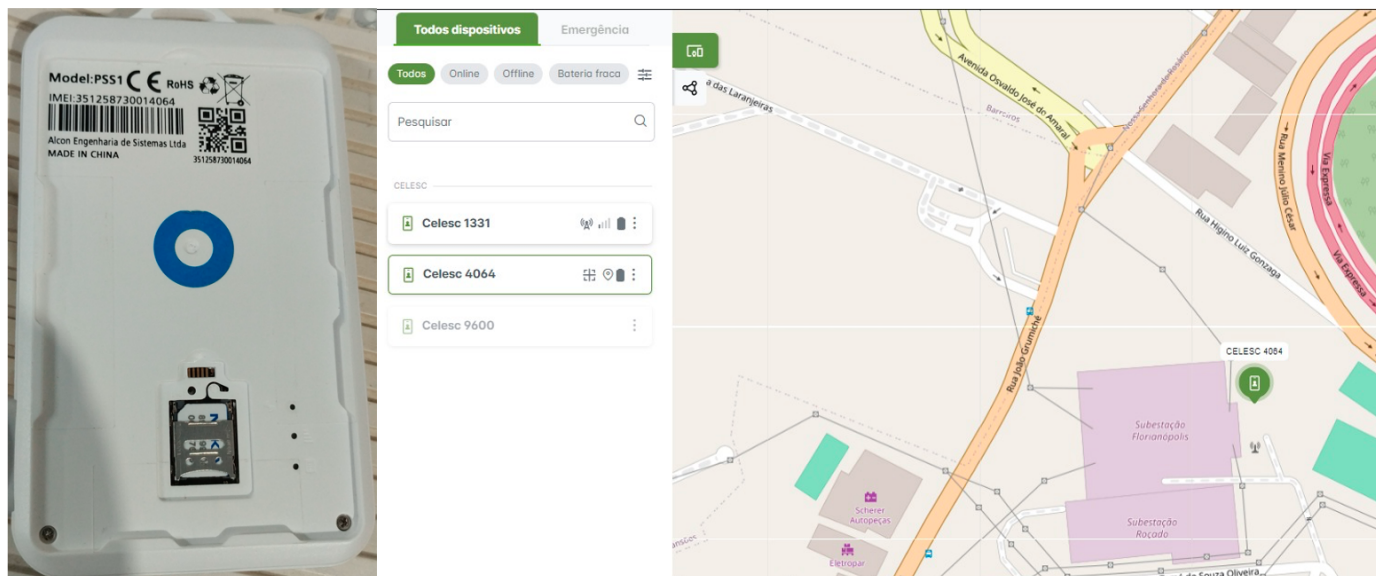


Figure 9 - Crachá inteligente testado na B28.

Inspecção Remota e Realidade Aumentada

O uso de redes privadas 4G/5G em subestações e locais críticos de inspeção representa vantagem também para área de manutenção e operação da CELESC. Essa conectividade permite o monitoramento remoto em tempo real, utilizando telemetria e vídeo de alta definição para identificar falhas e realizar diagnósticos precisos sem a necessidade de deslocamentos físicos. A integração de dispositivos como óculos de Realidade Aumentada (RA) e Realidade Virtual (VR) adiciona eficiência, possibilitando que técnicos especialistas auxiliem operadores de campo em tempo real, oferecendo instruções visuais, marcações na tela e acesso a manuais diretamente nos óculos. Todo o tráfego sendo transferido via rede 5G, com latência baixa e possibilitando o especialista remoto poder acompanhar em tempo real a situação, dando assistência para equipes em campo. Na Figura 3, esse caso de uso é o número 6.

Testamos o uso do óculos RealWear 500, equipado com câmera térmica e integrado ao software FrontLine, para explorar essas possibilidades. A solução permite que operadores remotos menos especializados tenham uma visão em primeira pessoa do campo e recebam suporte em tempo real de técnicos experientes. Os especialistas podem interagir diretamente, riscando a tela, fornecendo orientações detalhadas e acessando manuais operacionais para instruir o operador em campo de forma prática e eficiente. A Figura 10 apresenta um colaborador da CELESC nos testes iniciais com o dispositivo..



Figure 10 - Testes com óculos RA via rede 5G.

CPE's 5G Outdoor e Automação

VI. Caso de uso onde os equipamentos CPE's 5G outdoor são utilizadas para fornecer conectividade de subestação e alocações operacionais dentro das unidades operacionais. Podendo ser trafegado por elas inúmeros serviços da rede corporativa como SAP, Voz (PBX IP e automação através das interfaces RS485, 232 e Wi-Fi 6 AX de alta velocidade) e podendo ofertar a tecnologia FWA dentro das unidades remotas da companhia como agencias e alocações nas subestações. A Figura 11 ilustra testes realizados com teste de throughput.

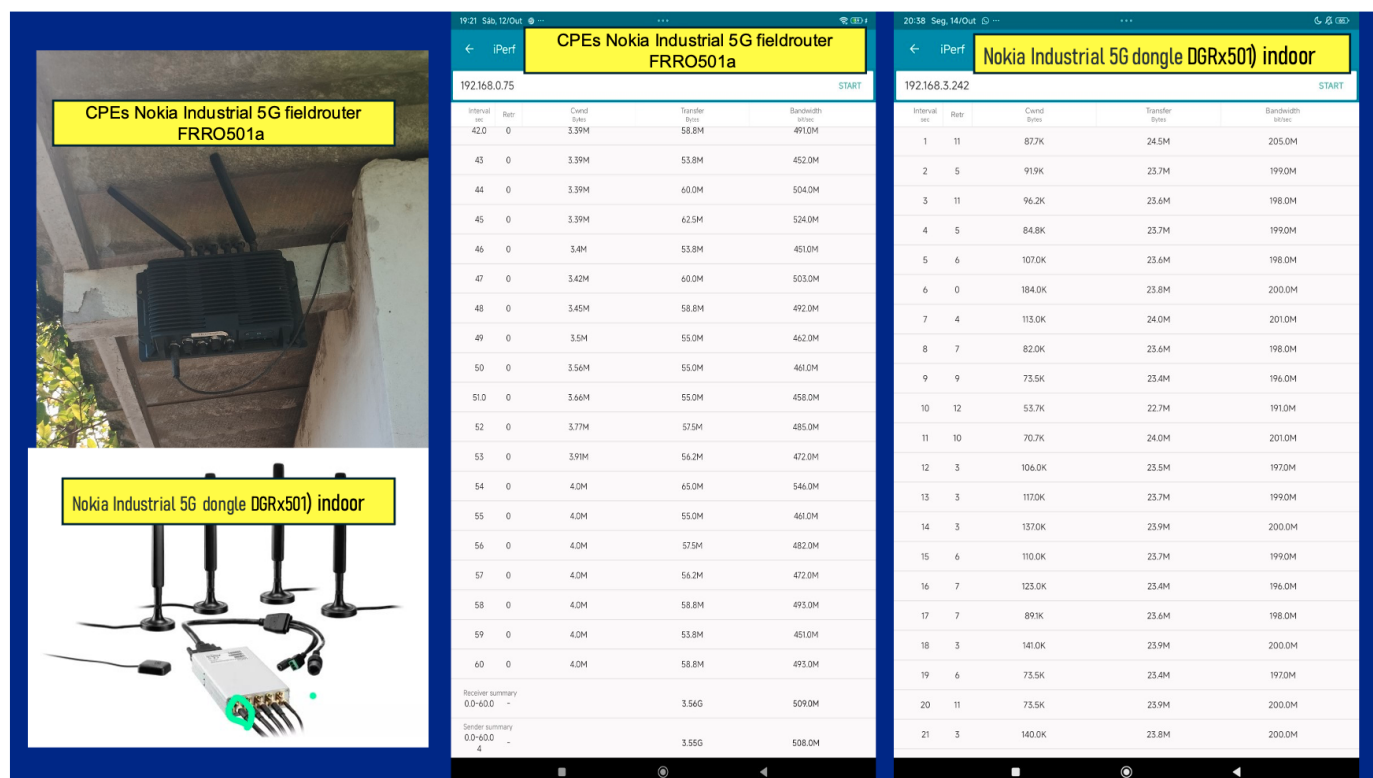


Figure 11 - Testes com CPE 5G outdoor. Teste de throughput.

Teleproteção

Explorando ao máximo a característica de baixa latência proporcionada pelas redes privadas LTE/5G, essa aplicação em teleproteção assegura a execução de operações com a precisão e temporização necessárias para sistemas críticos. Essa abordagem é especialmente relevante em aplicações como intertravamento, soluções self-healing e sistemas avançados de gerenciamento de distribuição (ADMS) (Zhou et al., 2023). A teleproteção é uma aplicação crítica para a segurança e a estabilidade do sistema de distribuição de energia. Com foco na latência, a teleproteção permite a detecção e resposta rápida a eventos de falha, garantindo a proteção dos equipamentos e a continuidade do fornecimento de energia. As características de missão crítica dessa aplicação garantem a confiabilidade e a segurança das operações, permitindo uma resposta imediata a qualquer incidente e minimizando o impacto das falhas na rede elétrica. A implementação de teleproteção contribui para a eficiência operacional e a estabilidade do sistema de energia, bem como resiliência da rede elétrica.

Para aplicação no projeto, será utilizada rede 5G diretamente para conectar relé de proteção e outros ativos de Subestação, garantindo a latência adequada que a aplicação necessita. Essa etapa apesar de já existir equipamentos para isso, ainda não foi implantada na rede. Previsão fevereiro de 2025. A partir da Figura 3, esse caso de uso é representado pelo número 8.

2.4 - TESTES DE THROUGHPUT E BANDWIDTH

Em laboratório foi possível realizar alguns testes, sobretudo dos casos de uso 2, 7, 8 e 9 da Figura 3. O objetivo foi a validação de testes de taxa de transferência conforme orientação de fabricante dos hardwares utilizados na solução que foi implantada no projeto.

O ambiente de teste para medições ativas com UE's é pré-testado e instalado.

Cenário do teste, consistiu:

- Rede Nokia DAC em teste;
- Servidor de teste hospedado na CELESC;
- Teste UE(s);

O servidor de teste e os UE's de teste devem ser totalmente dedicados aos testes e não devem executar nenhum outro aplicativo para evitar impacto nas medições.

O ambiente de teste suporta as seguintes medições:

1. Medição ativa do desempenho de transferência de dados entre UE(s) de teste e servidor de teste, como medições de taxa de transferência e latência;
2. Medições de sinal de rádio por UE(s) de teste

Visão geral do ambiente de teste é apresentado na Figura 12.

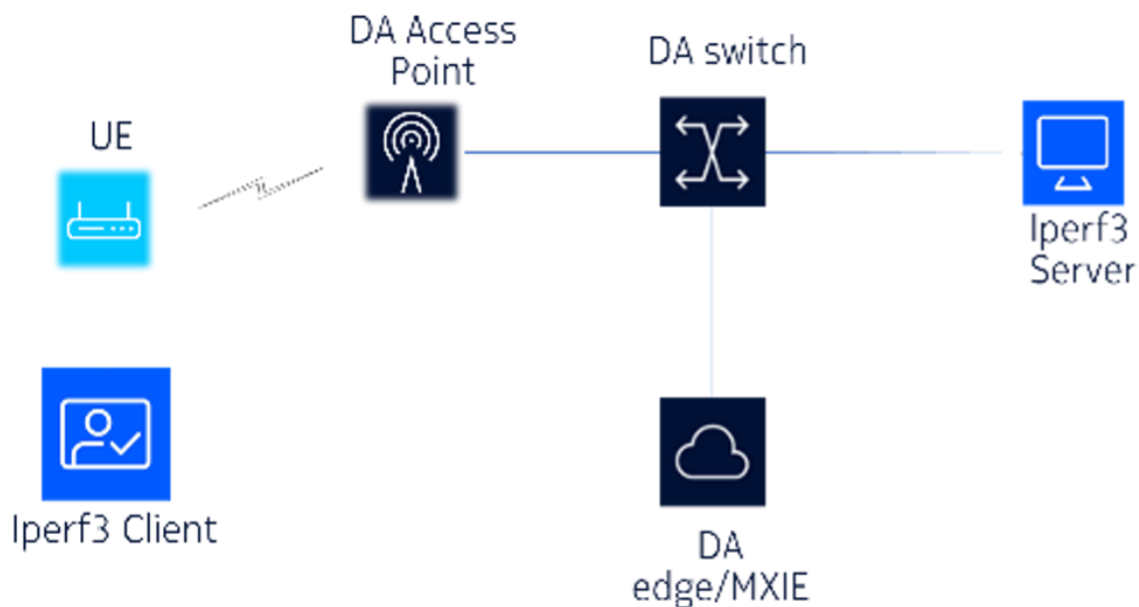


Figure 12 - Uso do Iperf3 cliente para medir throughput.

Os testes de Iperf foram realizados no caso de uso 6 com um UE 5G Xiaomi POCO X5 nas faixas B28 e N78 pois sistema NSA EPC como já explanado realiza o chamado LTE 5G-NR *Dual Connectivity Non-Standalone Access* nos mostrando esses valores em teste de download, visualizando o tráfego online pela própria gerência on-line do Ndac e monitorando a conexão de Tecnologia, Cell ID, eNb AP ID que foram atachados pelo software G-net track PRO disponível no Google play para Android conforme Figura 13. E na Figura 14 apresenta teste de taxa de transferência.

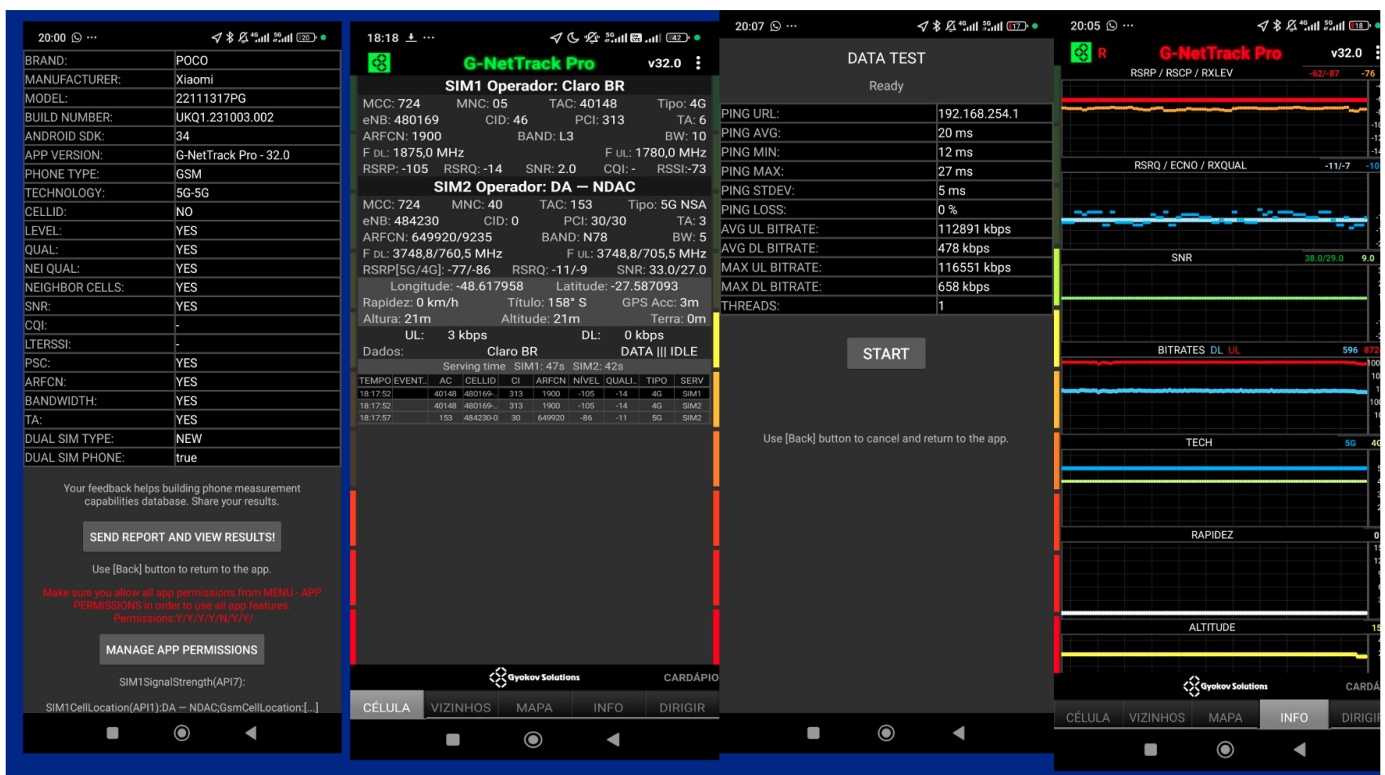


Figure 13 – Testes de conexão e largura de banda 5G utilizando G-NetTrack PRO.

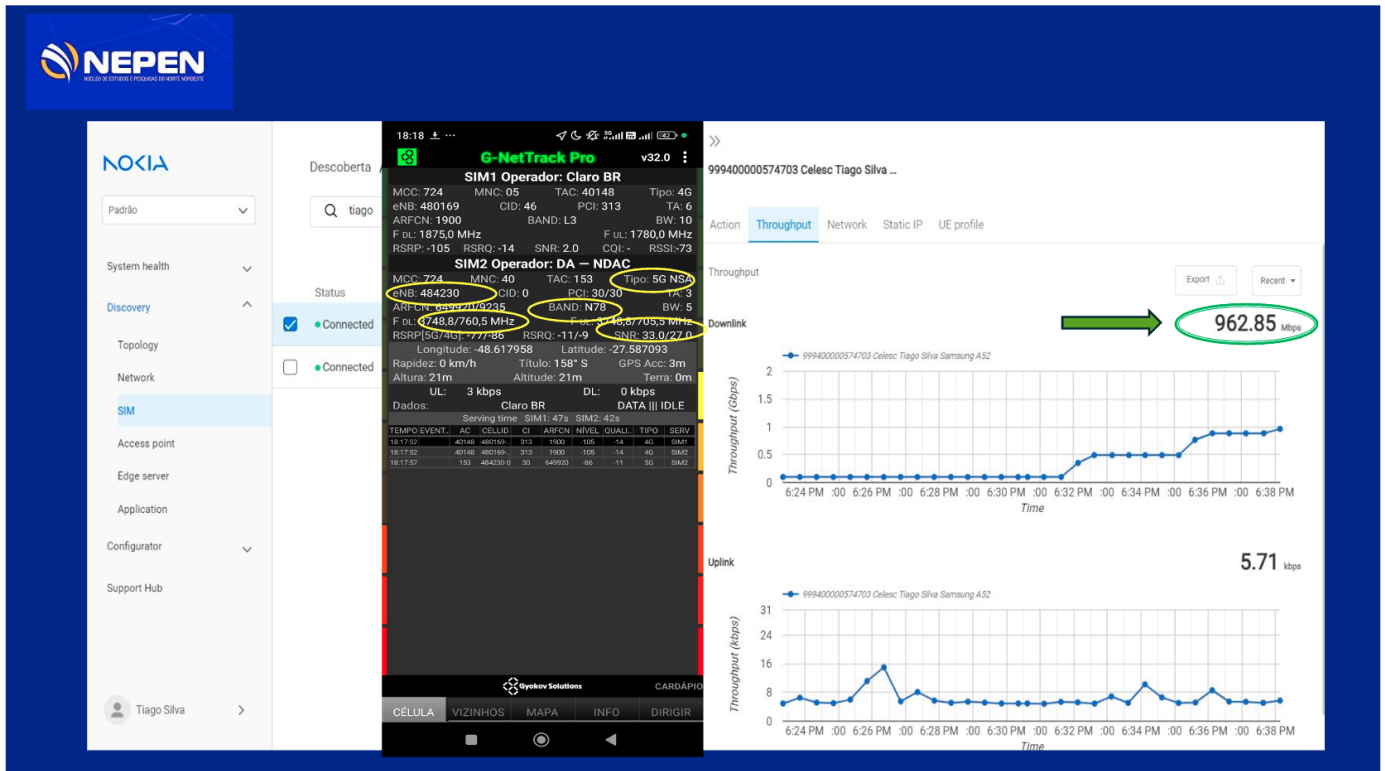


Figure 14 - Taxa de transferência na rede 5G.

Além desses testes, foi usado o Iperf para testar CPEs Nokia Industrial 5G fieldrouter FRRO501a do 7 caso de uso e a CPE Nokia Industrial 5G dongle DGRx501e) indoor do 8 caso de uso, já apresentados na Figura

11. Para testes de throughput de uma ligação de voz ou teste PPT e PTV, foi apresentado na Figura 8 o consumo real medido durante uma ligação de voz elo aplicativo de missão crítica da Nokia chamado teamcomms que utiliza o protocolo SIP durante as chamadas PTT LTE B87, ocupando menos de 10% da banda disponível na rede.

3. Conclusão

O projeto GS5G - Sistema de Gestão de SmartGrids Integradas para Cidades Inteligentes Utilizando Redes 5G Privadas, desenvolvido pela CELESC em parceria com o NEPEN, no âmbito do P&D ANEEL 05697-0223/2023, representa um avanço significativo na modernização do setor elétrico brasileiro. A iniciativa integra tecnologias emergentes, como IoT, realidade aumentada e virtual (RA/RV), automação de subestações e medição inteligente, em uma infraestrutura de telecomunicação convergente e escalável, baseada em redes LTE/5G privadas. Resultados de laboratório demonstraram expressivas taxas de throughput (até 960 Mbps), latência ultrabaixa (<10 ms) em aplicações críticas, e suporte simultâneo a milhares de dispositivos, validando a capacidade de suportar casos de uso essenciais.

A próxima etapa do projeto envolve consolidar os casos de uso já testados e validados em laboratório, como o gerenciamento de ordens de serviço e aplicações de teleproteção, além de explorar novos cenários em ambiente real. Exemplos incluem a instalação de medidores inteligentes em campo, automação de relés de subestação e a internalização do uso de ferramentas de realidade aumentada pelo grupo CELESC. Para essas atividades, os principais desafios pendentes são a instalação em campo, obtenção de licenças junto à ANATEL e a finalização da integração com o sistema comercial de gestão de medidores, o Open MDX. Até meados de abril, espera-se concluir essas implementações, alcançar a operação plena da rede LTE/5G e iniciar o processo de transferência de tecnologia para a CELESC. Ao final do projeto, o resultado operacional será classificado como TRL 8, indicando que o sistema estará pronto para uso comercial e validado em ambiente real. Este marco posicionará a CELESC como pioneira no uso de redes privadas LTE/5G no Brasil, estabelecendo um modelo de referência para o setor elétrico nacional.

4. Referências bibliográficas

ADRAH, Charles M.; PALMA, David; KURE, Øivind; HEEGAARD, Poul E. Deploying 5G architecture for protection systems in smart distribution grids. In: 2022 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT), 2022. DOI: 10.1109/ISGT50606.2022.9817536. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9817536>. Acesso em: 07 dez. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 846, de 11 de junho de 2019. Estabelece os procedimentos de fiscalização e aplicação de penalidades às concessionárias de energia elétrica. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 07 dez. 2024.

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Anatel). Redes Privativas. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/radiofrequencia/redes-privativas>. Acesso em: 08 dez. 2024.

BORSATTI, D.; GRASSELLI, C.; CONTOLI, C.; MICCIULLO, L.; SPINACCI, L.; SETTEMBRE, M.; CERRONI, W.; CALLEGATI, F. Mission critical communications support with 5G and network slicing. *IEEE Transactions on Network and Service Management*, v. 20, n. 1, p. 595–607, mar. 2023. DOI: 10.1109/TNSM.2022.3208657.

FAN, Boshi; YANG, Chunping; HUA, Zhilei. Wireless Private Network Architecture and Application Design for Integrated Energy Services. 2020 IEEE 9th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), Chongqing, China, p. 1702–1706, 2020. DOI: 10.1109/ITA-IC49862.2020.9339137. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9339137>. Acesso em: 07 dez. 2024.

LI, L.; LI, H.; CHEN, X.; CHEN, Y.; GUO, X. Multi-Domain Solutions for the Deployment of Private 5G Networks. 2021. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9496666>. Acesso em: 08 dez. 2024.

MULDER, Leslie J.; TEDESCHI, Dario. An Examination of the Latencies Found in a Wi-SUN FAN Network. *International Journal of Media and Networks*, 2024. DOI: 10.33140/ijmn.02.09.02.

PARTHASARATHY, Rajamohan; AYYAPPAN, Preethy; LOONG, Seow Soon. 5G Wireless Networks Deployment with Emerging Technologies and Research Challenges. *SEGi Journal of Engineering & Technological Advances (JETA)*, SEGi University, 2021. Disponível em: <https://examplelink.com>. Acesso em: 07 dez. 2024.

REKA, Sofana S.; DRAGI EVI, Tomislav; SIANO, Pierluigi; PRABAHARAN, S.R. Sahaya. Future Generation 5G Wireless Networks for Smart Grid: A Comprehensive Review. *Energies*, Basel, v. 12, n. 11, p. 2140, 2019. DOI: 10.3390/en12112140. Disponível em: <http://www.mdpi.com/journal/energies>. Acesso em: 07 dez. 2024.

TAVERAS CRUZ, Armando J.; AYBAR-MEJÍA, Miguel; DÍAZ ROQUE, Yobany; COSTE RAMÍREZ, Karla; DURÁN, José Gabriel; ROSARIO WEEKS, Dinelson; MARIANO-HERNÁNDEZ, Deyslen; HERNÁNDEZ-CALLEJO, Luis. Implications of 5G Technology in the Management of Power Microgrids: A Review of the Literature. *Energies*, v. 16, n. 4, p. 2020, 2023. DOI: 10.3390/en16042020.

WIKSTRÖM, Gustav; TORSNER, Johan; KRONANDER, Jonas; AL-SAADEH, Osama; CHERNOGOROV, Fedor; BAG, Gargi. Wireless Protection of Power Grids over a 5G Network. In: 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), Bangkok, Thailand, p. 416–420, 2019. DOI: 10.1109/GTDAasia.2019.8715864. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8715864>. Acesso em: 08 dez. 2024.

ZHOU, Xiangling; HU, Chen; WANG, Wendi; YANG, Yifu; LV, Su; RAO, Wei. Application of 5G Short Slice in Self-healing Distribution Network Automation. In: 2023 IEEE 6th International Energy Internet Conference (EICon). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10165940>. Acesso em: 08 dez. 2024.