

## Panorama 5G para o Setor Elétrico: Requisitos, Aplicações e Prova de Conceito

Joyce M. Siqueira \* Ana Carolina Pedreira \*\*  
Mayara Helena M. N. Santos \* Amanda B. Melo \*  
Isabella C. Pinheiro \*\*\* Helga D. Balbi \*\*\* Yona Lopes \*

\* *Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ (e-mail: joycemeireles@id.uff.br, mayarahelena@id.uff.br, ammelo@id.uff.br, yonalopes@id.uff.br).*

\*\* *Architecture and Technology Evolution, TIM S.A., RJ (e-mail: apedreira@timbrasil.com.br)*

\*\*\* *Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca - CEFET-RJ (e-mail: helga.balbi@cefet-rj.br, isabella.pinheiro@aluno.cefet-rj.br)*

---

**Abstract:** Within the Smart Grids concept, the development of wireless network technologies has been configured as an alternative to wired infrastructure networks. However, the high criticality established in the network requirements for the power system applications makes existing wireless networks not always suitable. In this context, the 5th generation wireless network, 5G, provides low latency and high reliability, which makes this technology promising for the electricity sector. This paper presents a survey of the requirements of the electric power system applications that can benefit from the 5G technology. In addition, a Proof of Concept performed in the Enel's distribution network is presented, which aimed to improve connectivity between devices, evaluating the 5G performance in this network.

**Resumo:** Dentro do conceito de *Smart Grids*, o desenvolvimento de tecnologias de rede sem fio vem se apresentando como uma alternativa às infraestruturas de rede cabeadas convencionais. Porém, a alta criticidade no atendimento aos requisitos de rede para as aplicações do setor elétrico torna as redes sem fio existentes nem sempre adequadas. Nesse contexto, a quinta geração de redes celulares, o 5G, provê aspectos como baixa latência e alta confiabilidade, que fazem essa tecnologia ser promissora para o cenário do setor elétrico. Neste artigo, foi realizado um levantamento dos requisitos para as possíveis aplicações que podem ser beneficiadas pelo uso da tecnologia 5G no setor elétrico. Além disso, são apresentados os resultados de uma Prova de Conceito realizada na rede de distribuição da Enel, que teve como objetivo aprimorar a conectividade entre dispositivos, avaliando o desempenho do 5G nessa aplicação.

*Keywords:* 5G; Smart Grids; IEC 61850; latency; reliability; Power System Digitization;

*Palavras-chaves:* 5G; Redes Inteligentes; IEC 61850; latência; confiabilidade, Digitalização de Sistemas Elétricos;

---

### 1. INTRODUÇÃO

O processo de digitalização e o desenvolvimento de novas tecnologias vêm sendo protagonistas na otimização de soluções mais rápidas, eficientes e automatizadas para o sistema elétrico. O termo *Smart Grid* abrange uma série de tecnologias que vêm sendo desenvolvidas como alternativas aos métodos tradicionais de operação da rede elétrica (Hamidi et al., 2010). Uma delas se refere ao uso de redes sem fio, de forma a facilitar e solucionar problemas de infraestrutura cabeada em subestações convencionais (Parikh et al., 2010). No entanto, a maior conectividade entre dispositivos dentro de *Smart Grids*, os tempos rígidos de atuação de proteção requeridos, as necessidades do uso mais eficiente e seguro da infraestrutura de comunicação do sistema elétrico, dentre outras, são necessidades cada vez mais prioritárias e não tão simples de serem alcançadas no âmbito das redes sem fio.

Recentemente, as características propostas pela quinta geração de redes celulares, o 5G, vêm apresentando facilita-

dores para tais criticidades requeridas pelo setor elétrico. Devido às suas grandes vantagens em relação às gerações anteriores em termos de taxa de transmissão, banda, confiabilidade, segurança, consumo de energia e número de conexões simultâneas, a 5G tem sido considerada a tecnologia que poderá permitir o desenvolvimento de soluções ainda mais eficientes no setor elétrico (Qualcomm, 2016).

Devido ao grande potencial ainda pouco explorado da tecnologia 5G para aplicações do sistema elétrico, esse trabalho tem como objetivo realizar o levantamento das principais aplicações do setor que podem ser beneficiadas pelo uso do 5G. Além disso, neste artigo são detalhados os requisitos para implementação segura e robusta destas aplicações, com destaque para as características do 5G que se enquadram para cada aplicação. São apresentados os casos de uso atualmente realizados pelo mundo com enfoque no sistema de energia. Dado esse panorama, para validação e prova de conceito da utilização real do 5G para o sistema elétrico, é descrito um teste de verificação da

conectividade e desempenho do 5G para uma aplicação de assistência remota em subestações de energia.

O restante do trabalho está estruturado da seguinte forma: a Seção 2, apresenta os trabalhos relacionados ao levantamento de requisitos de aplicações 5G. As principais tecnologias sem fio que podem ser utilizadas em aplicações em redes elétricas, incluindo suas vantagens e desvantagens são abordadas na Seção 3. A Seção 4 apresenta os principais conceitos do 5G, bem como um levantamento feito pelos autores das principais aplicações do setor elétrico que se beneficiarão do uso dessa tecnologia. A prova de conceito é apresentada na Seção 5. Por fim, a Seção 6 apresenta os desafios e perspectivas futuras relacionados à introdução da tecnologia 5G no setor elétrico e a Seção 7 apresenta a conclusão do trabalho.

## 2. TRABALHOS RELACIONADOS

O estado da arte para a comunicação nas *Smart Grids*, indica benefícios do uso da tecnologia 5G para prover comunicação de dados no âmbito de aplicações gerais e também na automação da distribuição, como abordado por Zhang and Wang (2021); Meng et al. (2019).

Nesse sentido, os requisitos de *Quality of Service* (QoS) de diferentes aplicações do sistema de energia elétrica são aspectos relevantes tratados por Meng et al. (2019). Em seu trabalho, os autores concluíram que as diferentes classes de serviços disponíveis na arquitetura 5G são capazes de suprir os diferentes domínios das redes elétricas inteligentes. Aplicações relacionadas à automação da distribuição de energia, por exemplo, se enquadram na classe *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication* (URLLC), que é capaz de prover baixos atrasos. Já aplicações de patrulha utilizando veículos aéreos não tripulados se enquadram na classe *enhanced Mobile Broadband* (eMBB). Por outro lado, aplicações de aquisição de informações elétricas, que possuem baixa restrição em termos de atraso e banda, se enquadram na classe de serviço *massive Machine Type Communications* (mMTC).

Uma visão geral dos requisitos para domínios de rede na infraestrutura de *Smart Grids* é apresentado por S et al. (2019a). No total, são listados três diferentes domínios de rede de comunicação nos quais o 5G pode desempenhar um papel significativo: 1) rede de acesso, que conecta medidores inteligentes a subestações secundárias; 2) rede de *backhaul*, que interconecta elementos que operam com média voltagem, como subestações secundárias; e 3) rede de *backbone*, que conecta elementos de alta voltagem e extra alta voltagem, como subestações primárias. Requisitos como cobertura, banda, latência fim-a-fim, perda de pacotes, disponibilidade, e tempo de convergência da falha são apresentados para cada um dos domínios descritos.

O trabalho de Zhang and Wang (2021) aborda a aplicação da tecnologia 5G nos campos da automação, proteção e monitoramento de redes de distribuição, com foco em possíveis problemas encontrados nos padrões técnicos, incluindo questões de segurança da rede, custos, cobertura de sinal, entre outros aspectos.

Neste artigo, diferentemente dos demais apresentados nesta seção, é realizado o levantamento detalhado acerca de diferentes aplicações e seus requisitos numa perspec-

tiva baseada em normas de regulamentação brasileira e internacional. O levantamento será acompanhado de uma prova de conceito — feita em uma subestação da ENEL com apoio da infraestrutura 5G da empresa TIM — que mostra os reais ganhos do uso da tecnologia 5G em relação à tecnologias anteriores.

## 3. O SETOR ELÉTRICO E O PANORAMA DAS TECNOLOGIAS SEM FIO

Tradicionalmente, os arranjos de rede em *Smart Grids* utilizam majoritariamente sistemas cabeados (Gungor et al., 2010), através de meios físicos como cabos de par trançado, fibra óptica, cabo coaxial, entre outros. Porém, devido ao avanço tecnológico e às possíveis limitações de instalação desses meios físicos, a necessidade do aprimoramento de tecnologias de rede sem fio para aplicações em redes elétricas inteligentes vem se tornando cada vez maior. O principal e mais conhecido padrão para as redes locais sem fio é o IEEE 802.11 (IEEE, 2018), popularmente conhecido por Wi-Fi, cujas técnicas utilizam rádios de curto alcance para a transmissão de sinais em bandas de frequência não licenciadas em 2,4 e 5GHz (Tanenbaum et al., 2021). Em 2013, o padrão 802.11ac foi publicado pelo IEEE (Tanenbaum et al., 2021), o qual apresenta maiores taxas de transmissão em relação aos padrões anteriores. Um experimento para avaliar o desempenho do 802.11ac para realizar a troca de mensagens baseadas na norma IEC 61850 (CEI/IEC 61850-3:2002) entre dispositivos é realizado por Rinaldi et al. (2016), onde concluiu-se que essa tecnologia atende aos requisitos mais rígidos de latência da norma nas situações em que o tráfego na rede se encontra abaixo de 30 Mbps. Em Gungor et al. (2010) são apresentados testes em dispositivos no padrão IEEE 802.15.4 (IEEE, 2020), visando caracterizar e medir a qualidade dessa forma de comunicação em sistemas baseados em redes de sensores sem fio – *Wireless Sensor Networks* (WSN). Nesse contexto, o protocolo ZigBee, que é baseado na norma IEEE 802.15.4, tem como proposta criar essa rede de sensoriamento através de uma arquitetura de rede *mesh*, utilizando elementos como autenticação e criptografia para segurança dos dados (Abdel-Latif et al., 2009). Porém, alguns problemas como o aumento na latência devido à quantidade de saltos da topologia, alto consumo de bateria dos sensores e o alcance limitado, fazem com que essa tecnologia não seja tão atrativa para atender algumas aplicações do setor elétrico.

Em relação às redes celulares, o lançamento da tecnologia 4G/LTE (*Long Term Evolution*) apresentou diversos avanços em desempenho quando comparado às gerações anteriores, avanços que a tornaram promissora para ser utilizada em *Smart Grids* (Rinaldi et al., 2016). Hoje, dispositivos inteligentes vêm sendo instalados na rede de distribuição, como no caso da Neoenergia que, através de uma rede privada 4G, conectou os equipamentos de automação de redes elétricas e os medidores inteligentes ao Centro de Operações da distribuidora (Neoenergia, 2020).

## 4. A TECNOLOGIA 5G E O SETOR ELÉTRICO

Em relação às gerações anteriores, a tecnologia 5G tem como objetivo aprimorar a comunicação de dados, possibi-

litando uma maior conectividade entre dispositivos e usuários (Qualcomm, 2016). A arquitetura 5G provê três serviços genéricos classificados como (Popovski et al., 2018): mMTC que provê um suporte a baixa taxa de transmissão de dados, porém atende a uma alta densidade de dispositivos conectados e utiliza mecanismos para diminuir o consumo de bateria dos dispositivos; eMBB que tem como objetivo transmitir altas taxas de dados com confiabilidade moderada no envio de pacotes; e URLLC que, também chamado de “comunicações de missão crítica”, provê a transmissão de pacotes com baixa latência, em torno de 5 ms fim-a-fim, e altíssima confiabilidade e disponibilidade.

Além desses aspectos, essa tecnologia permite que tais classes de serviços sejam alocadas em redes lógicas independentes e virtualizadas na mesma infraestrutura física, introduzindo o conceito de *network slicing*. Nesse conceito, frações distintas da rede podem ser utilizadas para diferentes aplicações e podem ter recursos diferentes, o que otimizará o uso da rede (Tanenbaum et al., 2021). Em adicional, alguns habilitadores nessa rede, como *edge computing* e *private network*, podem trazer também uma maior mobilidade no processamento, além de aproximar o requisito de exclusividade e independência de redes do setor elétrico ao mundo das redes celulares.

#### 4.1 Principais Aplicações para o Setor Elétrico

O levantamento dos possíveis casos de uso do sistema elétrico que podem ser beneficiados pelo 5G são detalhados a seguir. A Tabela 1 resume os requisitos e características de cada aplicação.

**Sistemas de Proteção e Controle:** Com o advento da digitalização de subestações, uma maior quantidade de sinais analógicos e digitais para proteção e controle passaram a ser monitorados (Kumari et al., 2019). O uso de redes de computadores para aprimorar as filosofias de proteção e diminuir os custos de instalação de cabos de cobre tornou-se alvo de estudos e aplicações e, nesse contexto, foi desenvolvida a norma IEC 61850 que, dentre as diversas partes, define o padrão de comunicação em subestações com o objetivo de garantir a interoperabilidade, a confiabilidade, a redução de custos e o envio de dados através de redes Ethernet (Lopes et al., 2015).

A arquitetura definida pela norma é apresentada na Figura 1. O nível de processo consiste nos equipamentos de campo, como Transformadores de Instrumento, disjuntores, dentre outros. Nesse modelo de arquitetura, prevê-se a instalação de dispositivos chamados *Merging Units* (MU), que fazem a aquisição de dados analógicos dos equipamentos de campo e publicam no barramento de processo através de uma rede Ethernet. A nível de *bay* estão os Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IED) nos quais as lógicas de proteção e controle local dos equipamentos são implementadas. O nível de estação consiste no controle da subestação, onde estão localizados equipamentos de controle como SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*) e IHM (*Interface Homem-Máquina*).

Nesse contexto, são definidos os tipos de mensagem para a comunicação entre cada nível. Para o barramento de processo, em que se tem a comunicação entre os equipamentos de campo e os IED de proteção, é definida pela norma a

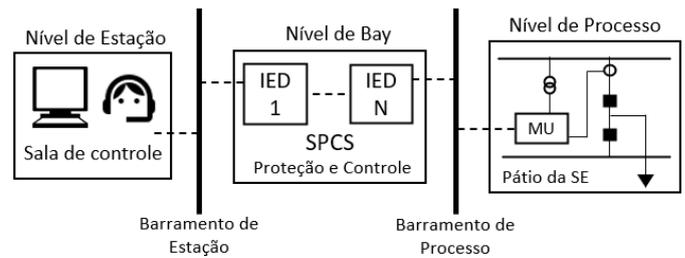


Figura 1. Arquitetura de SE digital segundo a IEC 61850

mensagem *Sampled Value* (SV), que são amostras de sinais analógicos transmitidas por uma rede Ethernet baseadas no modelo “*publisher-subscriber*”, em que a MU publica as amostras no barramento de processo que serão subscritas pelos IED a que se referem. Devido à alta criticidade, o tempo de transmissão requerido por esse tipo de mensagem deve ser menor do que 3 ms (Rodríguez et al., 2021).

Quanto maior o tamanho da subestação e da quantidade de amostras analógicas que estiverem sendo monitoradas por MU, o volume de mensagens SV no barramento de processo aumenta significativamente. De acordo com Minicz (2018), para um sistema elétrico de 60 Hz com 80 amostras por ciclo, considerando que cada amostra possua 140 B, o monitoramento de amostras de tensão trifásica pode chegar a demandar um total de 16,5 Mbps de taxa de transmissão.

A nível de *bay*, são definidas as mensagens GOOSE (*Generic Object Oriented Substation Event*), que são mensagens *multicast* de alta velocidade, cujo objetivo é realizar a troca de informações críticas entre IEDs, como *trip* e alarmes. As mensagens GOOSE são retransmitidas sequencialmente depois do primeiro envio em intervalos crescentes (IEC/TS 61850-2:2003, E). No que se refere à taxa de dados, a GOOSE, em geral, utiliza uma menor largura de banda do que a SV, visto que mensagens como *trip*, falha de disjuntor ou estado dos sinais não são enviadas com a mesma frequência que sinais analógicos. De acordo com Minicz (2018), pode-se considerar que cada mensagem tem uma taxa de dados em torno de 10 kbps, porém, no que se refere a requisito de latência, assim como nas mensagens SV, a latência do frame GOOSE deve ser menor do que 3 ms (Rodríguez et al., 2021). Adicionalmente, conforme a apresentação do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no XV STPC, a nova revisão do Submódulo 2.11 dos Procedimentos de Rede que estabelece os requisitos mínimos de proteção e controle definirá que o sistema de monitoramento de redes instalado em subestações deverá detectar e reportar ao ONS qualquer tempo de latência superior a 3 ms para esse tipo de mensagem.

De acordo com a apresentação da SEL no XV STPC, o valor calculado de disponibilidade para as conexões de fibra óptica foi na ordem de 99,999%. No que se refere à confiabilidade, de acordo com a norma CEI/IEC 61850-3:2002, uma subestação deve continuar operável em caso de falha de qualquer dispositivo. O Submódulo 2.11 estabelece a redundância e independência das cadeias de proteção principal e alternada, para que não haja ponto de falha comum, devendo esse requisito ser aplicado também às redes de subestações digitais (XV STPC).

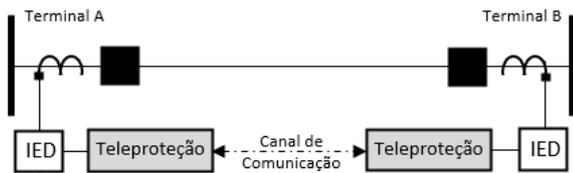


Figura 2. Arquitetura Simplificada de Teleproteção

Dados os requisitos apresentados, a classe de serviço URLLC da rede 5G se mostra um facilitador para atingir valores tão críticos de latência e confiabilidade. Além disso, devido à divisão de criticidade para cada mensagem dentro de uma subestação, o *network slicing* pode trazer benefícios no fatiamento da rede local, contribuindo na segurança e no desempenho da rede.

**Teleproteção:** A teleproteção é uma técnica de troca de informações entre equipamentos de proteção instalados em subestações distintas através de canais de telecomunicação. Esse esquema (ilustrado na Figura 2), é amplamente utilizado no setor de transmissão e tem como objetivo mitigar faltas que possam ocorrer em Linhas de Transmissão (LT). Para realizar essa troca de sinais entre os dois pontos, utilizam atualmente meios de comunicação como OPLAT (Ondas Portadoras em Linhas de Alta Tensão) ou fibra óptica através de cabos OPGW (*Optical Ground Wire*).

Para esquemas de teleproteção nas LT que fazem parte da Rede Básica, alguns requisitos como a redundância completa e independente dos canais de teleproteção para as duas cadeias de proteção da linha (principal e alternada), são definidas pelo ONS no Submódulo 2.11. Além disso, os canais devem ser instalados de forma a manter a confiabilidade e a segurança da teleproteção. Minicz (2018) aborda que os requisitos de disponibilidade da rede de comunicação devem ser os mesmos tanto para redes internas à subestação quanto fora da subestação, apresentando valores em torno de 99,9999%.

Dentro desse contexto, algumas normas estabelecem os requisitos de desempenho para a teleproteção dependendo de sua aplicação, como é o caso da norma IEEE 1646 (IEEE, 2005) que especifica que o tempo de transferência de dados para teleproteção deve ser de 8 a 12 ms. Em contrapartida, alguns autores mostram que, dependendo da aplicação do esquema de teleproteção, latências diferentes são necessárias para o envio do sinal. De acordo com De Almeida (2020), a latência para envio de sinais de bloqueio de operação deve ser entre 3 a 5 ms, já que essa aplicação preserva o sistema de proteção de uma atuação indevida em faltas externas à LT. Fodero et al. (2018) aborda que, para a atuação da função diferencial de linha (ANSI 87L), o tempo de latência deve estar na faixa de 8 ms. Ambos os autores relatam que para mensagens de *Direct Transfer Trip* a latência deve estar em torno de 10 ms. Bächli et al. (2017) especifica que o tempo de desempenho crítico para quaisquer esquema de teleproteção para proteção de linha deve ser menor do que 10 ms, independente do meio físico utilizado.

No que se refere à taxa de dados necessária para tal aplicação, alguns equipamentos terminais como o SEL-2595 codificam os dados que deverão ser transmitidos ao outro terminal a uma taxa de 64 kbps. Nesse contexto,



Figura 3. Arquitetura Simplificada do SMSF

a norma IEEE C37.94 (IEEE, 2017) define um formato padrão para que a mensagem seja enviada do equipamento multiplexador para o equipamento de teleproteção, e vice-versa. Assim, ao se adequar à essa estrutura, os pacotes passam a ser transmitidos a uma taxa de 2048 kbps.

Portanto, as arquiteturas atualmente utilizadas para teleproteção, como cabos OPGW, atendem aos requisitos com confiabilidade e segurança. Porém, alguns problemas como limitação de infraestrutura e alto investimento na instalação de meios físicos de comunicação com fio podem ser superados caso existam tecnologias sem fio consolidadas que atendam os requisitos da aplicação, como a princípio é o caso da classe de serviço URLLC do 5G. Vale ressaltar que, hoje, para sistemas de teleproteção na Rede Básica do SIN não é permitido o uso de infraestruturas de rede de operadoras, porém, a avaliação do desempenho de redes privadas 5G pode se mostrar válida para essa aplicação em outros setores.

**Sistemas de Medição Sincronizada de Fasores (SMSF):** As unidades de medição fasorial, do inglês *Phasorial Measurement Unit* (PMU), são dispositivos instalados em pontos específicos no Sistema Elétrico de Potência (SEP), que estimam os parâmetros de magnitude, ângulo e frequência dos sinais amostrados do sistema, como corrente e tensão (IEC/IEEE 60255-118-1). Tais amostras são sincronizadas entre si através da estampa de tempo associada à cada uma delas, sendo então possível analisar o comportamento do sistema em um momento específico, recurso que pode otimizar a operação do sistema e a análise de eventos de contingência que acometem o sistema interligado. Nesse contexto, o ONS coleta as informações de diversas PMU instaladas em pontos específicos do mapa brasileiro e realiza análises inter-regionais desses dados de fasores sincronizados. Para isso, através do Submódulo 2.13 dos PR, são estabelecidos os requisitos mínimos para a implantação de PMU e para a rede de comunicação do agente. A arquitetura simplificada do SMSF é representada pela Figura 3.

De acordo com o referido submódulo, as PMU devem ser configuradas como Classe de M (medição) e a latência máxima de uma medição sincrofásorial é de 500 ms. Além disso, devem conter em seu pacote computacional algumas medições de tensão, corrente e frequência estabelecidas. Considerando que uma PMU contenha a medição referente a uma LT (módulo e ângulo de tensão e corrente) numa taxa de 60 *fps*, calcula-se uma taxa de dados em torno de 64 kbps. Em relação aos requisitos de confiabilidade e disponibilidade, a rotina operacional estabelecida no Submódulo 2.15 dos PR especifica que os recursos de comunicação entre a rede do agente e a do ONS devem manter uma disponibilidade total de 99,98% e uma taxa de perda de pacotes menor do que 1%, o que implica na confiabilidade acima de 99%.

Dados tais valores, nota-se que as aplicações de PMU em SMSF não possuem requisitos tão restritos para que a rede de comunicação seja definida como missão crítica. A alta criticidade com relação aos dados das PMU está na estampa de tempo associada às medições, isto é, se os fasores não estiverem sincronizados corretamente. Porém, considerando um possível aumento significativo no número de PMU instaladas no SEP e até no setor de distribuição, a implantação de uma rede 5G pode ser uma alternativa para a infraestrutura de comunicação devido à classe de serviço mMTC. Além disso, através do *network slicing*, seria possível dividir a rede 5G dentro da subestação para comunicações mais críticas como barramento de processo e para o envio de dados das PMU ao centro de controle sem comprometer os requisitos da outra aplicação.

*Smart Grid no setor de distribuição:* No setor de distribuição de energia, que contempla desde as subestações de média tensão até o consumidor final, o conceito de *Smart Grid* vem se desenvolvendo através da aplicação de tecnologias que possam aprimorar o fornecimento de energia. A utilização de sensores, medidores e religadores inteligentes são alguns exemplos. Nesse contexto, para que seja possível comunicar os diferentes dispositivos dentro da rede de distribuição, é necessária uma rede de comunicação bem estabelecida (Aggarwal et al., 2010).

Com o objetivo de se garantir a QoS para esse tipo de rede, alguns requisitos como latência e largura de banda são apresentados na literatura. Em Yan et al. (2013), para sensoriamento e medições em tempo real, a latência da rede deve ser de 12 a 20 ms, a depender de qual o esquema de proteção para qual o sinal será utilizado. Porém, para envio de dados com a finalidade apenas de monitoramento, espera-se para mensagens de estado dos disjuntores, por exemplo, uma latência fim-a-fim em torno de 2 s.

De forma mais abrangente, S et al. (2019a) considera que a infraestrutura de rede de *Smart Grid* pode ser dividida em domínios. O primeiro deles é a Rede de Acesso, que conecta medidores inteligentes e subestações secundárias, e o segundo a Rede Backhaul, que conecta elementos nas subestações secundárias de média tensão. Conforme o autor, a latência fim-a-fim para a primeira deve ser menor do que 1 s, enquanto para a Rede Backhaul o requisito deve ser mais estrito e a latência menor do que 50 ms.

S et al. (2019a) também expõe que a largura de banda para uma rede de acesso, em geral, é menor do que a Rede Backhaul, sendo que a primeira deve ser suficiente para suportar uma taxa de transmissão na ordem de 1 kbps e a segunda acima de 1 Mbps. Com o objetivo de apresentar os requisitos de largura de banda para uma rede de média tensão, Yan et al. (2013) modelou uma subestação de distribuição conectada a 10.000 alimentadores, onde cada um desses se conectava a 10 clientes. Nesse modelo, os alimentadores trocavam mensagens entre si e com a subestação. Assim, foi avaliado que a largura de banda necessária para a aplicação deve suportar uma taxa de transmissão acima de 100 Mbps.

Em relação à disponibilidade da rede de comunicação, os requisitos apresentados por S et al. (2019a) abordam que, para a Rede de Acesso, a indisponibilidade da rede deve estar em torno de 9 h por ano, enquanto para a Rede

Backhaul, esse valor deve ser em torno de 50 min ao ano, isto é, 99,897% e 99,990% respectivamente.

Vale ressaltar que outros requisitos para as aplicações no âmbito da distribuição devem ser levantados. Em geral, para que haja o monitoramento completo de uma rede de distribuição, a rede deverá cobrir um sensoriamento em escala de cidades e municípios. Além disso, o consumo de bateria de uma rede de sensores sem fio é preocupante devido à manutenção exaustiva e ao alto consumo dos dispositivos (Park et al., 2005). Nesse contexto, a tecnologia 5G apresenta a classe de serviço mMTC que, além de possibilitar uma quantidade massiva de dispositivos conectados em uma grande área de cobertura, tem como premissa a economia no consumo de bateria, o que favorece a aplicação de sensores sem fio espalhados pela rede elétrica. Outro aspecto favorável do 5G é a possibilidade do uso de redes privadas, já que por aspectos de segurança cibernética, não é recomendado que se utilize a rede pública para as aplicações no setor (Hauser et al., 2008).

*Realidade Aumentada:* Nas últimas décadas, o desenvolvimento de tecnologias que utilizam Realidade Aumentada (AR) se tornou crescente tanto no meio acadêmico quanto no mercado (Chatzopoulos et al., 2017). De acordo com Azuma et al. (2001), AR pode ser definida como um sistema que consegue combinar elementos reais e virtuais e estabelecer uma interação entre esses em tempo real.

Tendo em vista as limitações das redes sem fio existentes, muito se promete com a infraestrutura da tecnologia 5G. As aplicações de realidade aumentada apresentam uma taxa de dados maior do que 1 Gbps e a latência fim-a-fim esperada para aplicações em geral deve ser de 10 ms, e de 1 ms para aplicações com maior criticidade (Braud et al., 2017). Além disso, pode-se considerar seus requisitos de confiabilidade e disponibilidade na faixa de 99,999 %, conforme estabelecidos pela especificação técnica 3GPP TS 22.261 (2021).

Dentro do setor elétrico, aplicações de AR vêm sendo cada vez mais prospectadas, podendo trazer benefícios como inspeção ou até manutenção remota em subestações e redes de distribuição. Na Seção 5.1 desse artigo, será apresentada a fase 1 de uma Prova de Conceito na qual foi realizado um teste de Assistência Remota utilizando *smartglasses* e smartphones em uma rede de comunicação 5G.

Tabela 1. Requisitos das aplicações para o setor elétrico - Taxa de Dados, Latência, Confiabilidade e Disponibilidade

Aplicações	Taxa	Latência	Conf.	Disp.
SPCS (SV)	> 16,5 Mbps	< 3 ms	-	99,999%
SPCS (GO- OSE)	> 10 kbps	< 3 ms	-	99,999%
Teleproteção	> 64 kbps	< 10 ms	-	99,999%
SMSF	> 62 kbps	500 ms	99,000%	99,980%
SG <sup>1</sup> (Rede de Acesso)	1 kbps	< 1 s	-	99,897%
SG <sup>1</sup> (Backhaul)	> 1 Mbps	< 50 ms	99,999%	99,990%
Realidade Aumentada	> 1 Gbps	< 10 ms	99,999%	99,999%

<sup>1</sup> *Smart Grid*

#### 4.2 Casos de uso Pelo Mundo

Atualmente, muitas expectativas têm sido criadas em relação ao 5G em diversos setores. Através do *5th Generation Public-Private-Partnership*, a Comissão Europeia tem estabelecido diversos suportes como parte do programa *Connecting Europe Facility Digital* (CFE Digital), para acelerar o desenvolvimento de soluções através da tecnologia 5G, como veículos autônomos, mobilidade urbana, *smart cities*, entre outros.

No setor elétrico, com o objetivo de minimizar a infraestrutura de comunicação cabeada nas redes de distribuição, foi proposto por Qi Tu (2021) um método de identificar a topologia de uma rede utilizando a tecnologia 5G para comunicação entre os dispositivos inteligentes. Em Li et al. (2020) foi modelada uma rede de distribuição em RTDS (*Real Time Digital Simulation*) onde, utilizando método de identificação de topologia e faltas, foi simulado um esquema de recomposição de faltas para a rede de distribuição. Nessa mesma linha, através do projeto *Slicenet* proposto pelo 5GPPP na Europa, a Efacec concebeu uma solução de *self-healing* através da tecnologia 5G, com o objetivo de diminuir a área afetada pela falta na rede de distribuição, reconfigurando a rede com mais rapidez.

Ainda no setor elétrico, aspectos como a alta capacidade de sensoriamento e a aplicação da realidade aumentada foram abordados em Gan et al. (2021) como forma de utilizar a comunicação 5G para inspeções inteligentes em subestação de alta tensão, aumentando a confiabilidade e diminuição no custo de manutenção e inspeção dessas instalações.

### 5. TESTE DE APLICAÇÃO DO 5G

Considerando as aplicações em potencial para o Setor Elétrico a partir da tecnologia 5G, uma Prova de Conceito (PoC - *Proof of Concept*) tem sido implementada em subestação da Enel, concessionária de distribuição de energia elétrica do Estado de São Paulo, para investigar casos de uso associados à assistência remota (*Digital Twin*) por meio de aplicações de realidade aumentada, bem como automação de rede (*Grid Automation*) com esquemas de teleproteção de religadores automáticos e monitoramento de transformadores de poste de baixa tensão (BT) e média tensão (MT). Tais casos de uso estão sendo desenvolvidos em duas fases para essa PoC, a saber: (i) Fase 1 – Assistência Remota, utilizando os conceitos de *Digital Twin*, e (ii) Fase 2 – Automação de Rede (*Grid Automation*).

As duas fases da PoC são providas pela rede 5G da TIM, operadora de serviços de telecomunicações, por meio da implementação da Rede de Acesso Rádio (RAN – *Radio Access Network*), rede de transporte, bem como com a capacidade e integrações da Core de rede na arquitetura 5G autônoma (5G SA – *Standalone*), cujas funções dos elementos serão explicadas adiante. Como a Fase 2 encontra-se ainda em execução, neste trabalho serão apresentados apenas os resultados da Fase 1 da PoC.

#### 5.1 Fase 1: Assistência Remota (*Digital Twin*)

Esta fase procurou estabelecer a conectividade dos dispositivos através da oferta do 5G via acesso fixo sem fio (FWA

– *Fixed Wireless Access*<sup>1</sup>) para permitir a aplicação de Assistência Remota (*Digital Twin*). Na execução da PoC, uma vez que os dispositivos, tais como os *smartglasses*, religadores e os transformadores BT/MT, não são compatíveis com o 5G, foi necessária a utilização de CPEs (*Customer Premises Equipment*) para que o sinal 5G, na frequência de 3,5 GHz, pudesse ser irradiado em frequência Wi-Fi. A RAN conecta os dispositivos em teste da subestação ao Core 5G SA no TIM Lab, que é conectado ao datacenter com as aplicações da Enel por meio da rede de transporte da TIM. A arquitetura de referência é mostrada na Figura 4.

A conectividade dos CPEs na solução FWA foi comprovada quando ocorreu o “attach” dos dispositivos, ou seja, foi possível registrar e autenticar tais dispositivos na rede 5G SA controlada a partir do Core 5G nas dependências do TIM Lab. Após o registro e autenticação dos dispositivos, foi possível estabelecer o início da Fase 1, instalando a aplicação de Assistência Remota em dois *smartphones*, conectados à Internet por meio da rede 5G SA em 3,5 GHz, enquanto, de maneira paralela, os *smartglasses* se conectaram à Internet por meio dos CPEs. Esses *setups* serão referidos como “5G – 5G” e “CPE – 5G”, respectivamente.

Dessa forma, testou-se a conexão dos smartphones para avaliar os parâmetros da rede 5G SA estabelecida, como a velocidade e a estabilidade da conexão, aferindo as taxas de pico de *download*, a conectividade para suportar dispositivos simultaneamente, e a latência RTT (*Round Trip Time*), através da aplicação *Speedtest* da Ookla<sup>2</sup>. Os desempenhos aferidos serão apresentados adiante.

Após aferido o desempenho dos *smartphones* conectados à Internet, foi possível testar a aplicação de Assistência Remota em conjunto com os *smartglasses* de realidade virtual conforme a arquitetura de referência apresentada na Figura 4, realizando o caso de uso da Fase 1: *Digital Twin*. O objetivo foi verificar se a maior velocidade observada até então melhoraria a qualidade da conexão.

*Fase 1: Resultados:* Na Tabela 2, são apresentados os resultados para os *setups* detalhados anteriormente. Há um *setup* adicional, chamado “4G – 4G”, cujos resultados foram aferidos apenas para referência e comparação com os resultados obtidos por meio da rede da presente PoC. É possível notar a significativa diferença de desempenho das redes 5G SA para redes puramente 4G, especialmente sobre as taxas de *downlink* e *uplink*.

Tabela 2. Desempenhos de Downlink (DL), Uplink (UL) e Latência aferidos nos *setups*

<i>Setup</i>	Taxa DL máx.	Taxa UL máx.	Latência RTT
CPE – 5G	613 Mbps	40 Mbps	40 ms
5G – 5G	1231 Mbps	82 Mbps	43 ms
4G – 4G <sup>1</sup>	50 Mbps	10 Mbps	40 ms

<sup>1</sup> Para referência

Com relação à latência RTT (*Round Trip Time*), testes de bancada anteriores à Prova de Conceito aqui apresentada

<sup>1</sup> Método de acesso à Internet de banda larga via um enlace rádio entre a torre de telefonia celular e a casa do cliente.

<sup>2</sup> <https://www.speedtest.net/pt>

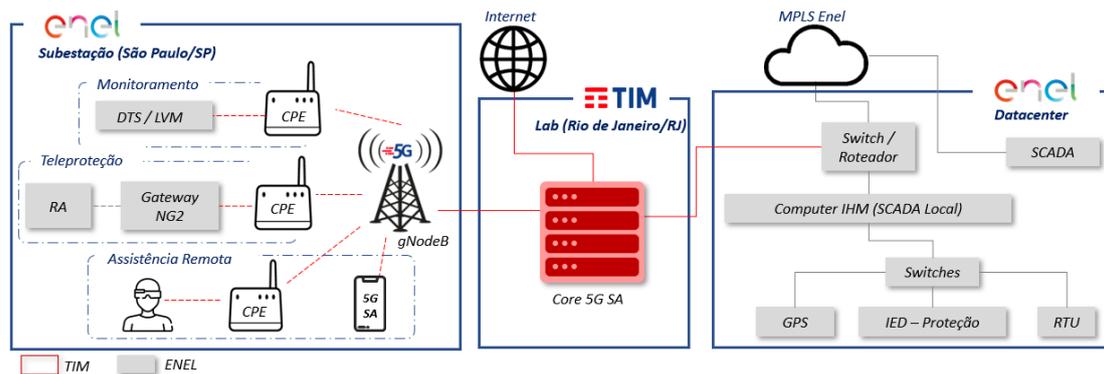


Figura 4. Arquitetura de referência da Prova de Conceito

atingiram latências da ordem de 1 a 10 ms, e a latência elevada pode ser explicada pela distância entre os dispositivos e o Core 5G, que estão localizados em São Paulo e no Rio de Janeiro, respectivamente. Reduzindo as distâncias físicas, por meio da adoção de *Edge Computing*, por exemplo, é possível trazer a latência aos patamares experimentados em bancada. Avaliando-se os resultados do *setup* “5G - 5G”, foi comprovada maior qualidade de imagem e som, com interações realizadas com menor latência. Porém, conforme se afastava o usuário dos *smartglasses* de realidade virtual conectados ao CPE, a qualidade da imagem sofria certa degradação.

## 6. DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Considerando os avanços advindos da introdução do 5G no setor elétrico, urge a necessidade de avanços tecnológicos e definição de requisitos que proporcionem a sua implementação. Um dos principais desafios inerentes é a implementação do uso do 5G no setor elétrico dada a compatibilidade com a infraestrutura existente. Os meios de comunicação empregados em sistemas de transmissão, geração e distribuição devem ser utilizados de forma acessível e compatível com os padrões 5G. Apesar de o setor estar em constante atualização no que tange à comunicação e digitalização do sistema, como apresentado em Costa Junior (2021), ainda há limitações de estudos e requisitos relacionados à latência e disponibilidade. Um exemplo dado em S et al. é a aplicação em *Smart Grids* e a necessidade de um estudo avaliando o impacto do uso do 5G em ambientes com uma alta quantidade de equipamentos conectados associado à latência de envio de mensagens.

Nesse contexto, entende-se que ainda há uma necessidade de validação dessa tecnologia para as aplicações no setor elétrico. Por outro lado, a adoção do 5G expõe novas perspectivas relacionadas à alta conectividade, baixa latência e segurança através de comunicação sem fio. Ademais, vale avaliar também se o uso do 5G proporciona o ganho financeiro com o emprego de aplicações sem fio e redes configuradas logicamente sem o uso de equipamentos e topologias físicas complexas.

## 7. CONCLUSÃO

Considerando o histórico de aplicações de tecnologias sem fio dentro do setor elétrico, o 5G vem apresentando

notórias características que podem superar desafios em algumas aplicações atuais. Nesse artigo, foram levantados os requisitos das aplicações do setor elétrico que podem ser beneficiados pelo 5G e quais características deste que englobam as necessidades de cada uma das aplicações. Foi apresentada também uma Prova de Conceito que tem sido implementada numa subestação da Enel onde, na primeira fase, analisou-se a conectividade entre os dispositivos e o desempenho do 5G nessa aplicação com resultados promissores, da ordem de 1 a 10 ms local e chegando a 43 ms de ida e volta entre São Paulo e Rio de Janeiro. Em trabalhos futuros, será implementada a fase 2 dessa PoC, cujo objetivo será aprimorar a automação da rede de distribuição da Enel utilizando a conectividade 5G. Além disso, através dos requisitos levantados, espera-se que outras Provas de Conceitos sejam feitas para avaliar a efetividade da tecnologia nas aplicações consideradas.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho faz parte do projeto FAPERJ 5GIRLS (Inclusion of Women in Science through 5G Infrastructure for Ultra-Reliable and Low Latency Communications in Power Systems). É um projeto em conjunto da Universidade Federal Fluminense, Instituto Federal Fluminense e CEFET/RJ Campus Nova Friburgo. O CIGRE-BR (por meio do D2) e a TIM S.A também apoiam o projeto. As autoras também agradecem a Enel Distribuição São Paulo, por fornecerem detalhamento dos resultados alcançados na PoC, cujo trabalho está relacionado ao projeto “*Underground Smart Grid*” sob PD-0390-1080 / 2017 ANEEL. A Enel agradece ao programa de Pesquisa e Desenvolvimento da ANEEL pelo suporte ao projeto.

## REFERÊNCIAS

- 3GPP TS 22.261(2021) (2021). 3rd generation partnership project; technical specification group services and system aspects; service requirements for the 5g system; stage 1 (release 18). Technical report.
- Abdel-Latif, K.M., Eissa, M.M., Ali, A.S., Malik, O.P., and Masoud, M.E. (2009). Laboratory investigation of using wi-fi protocol for transmission line differential protection. *IEEE Transactions on Power Delivery*.
- Aggarwal, A., Kunta, S., and Verma, P.K. (2010). A proposed communications infrastructure for the smart grid. In *2010 ISGT*, 1–5.
- Azuma, R., Baillet, Y., Behringer, R., Feiner, S., Julier, S., and MacIntyre, B. (2001). Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*.

- Braud, T., Bijarbooneh, F.H., Chatzopoulos, D., and Hui, P. (2017). Future networking challenges: The case of mobile augmented reality. In *2017 IEEE 37th ICDCS*.
- Bächli, R., Häusler, M., and Kranich, M. (2017). Teleprotection solutions with guaranteed performance using packet switched wide area communication networks. In *2017 70th Annual CPRE*.
- CEI/IEC 61850-3:2002 (2002). Communication networks and systems in substations - part 3: General requirements. Standard, International Electrotechnical Commission, Geneva, CH.
- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z., and Hui, P. (2017). Mobile augmented reality survey: From where we are to where we go. *IEEE Access*, 5, 6917–6950.
- Costa Junior, A. (2021). A digitalização do setor elétrico brasileiro: The digitalization of the brazilian electric sector. 1. URL <https://bit.ly/3uPk1Or>.
- De Almeida, e.a. (2020). Control networks and smart grid teleprotection: Key aspects, technologies, protocols, and case-studies. *IEEE Access*, 8, 174049–174079.
- Fodero, K., Huntley, C., and Robertson, P. (2018). Deterministic communications for protection applications over packet-based wide-area networks. In *2018 71st Annual CPRE*.
- Gan, X., Geng, X., Xiong, Z., Wu, Z., Du, S., Gao, Y., and Guo, Y. (2021). Application of 5g communication technology on intelligent inspection in 750kv substation. *Journal of Physics: Conference Series*, 1983, 012089.
- Gungor, V.C., Lu, B., and Hancke, G.P. (2010). Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- Hamidi, V., Smith, K.S., and Wilson, R.C. (2010). Smart grid technology review within the transmission and distribution sector. In *2010 IEEE PES ISGT Europe*.
- Hauser, C., Bakken, D., Dionysiou, I., Gjermundrod, H., Irava, V., Helkey, J., and Bose, A. (2008). Security, trust, and qos in next-generation control and communication for large power systems. *IJCIS*, 4, 3–16.
- IEC/TS 61850-2:2003(E) (2003). Communication networks and systems in substations – part 2: Glossary. Standard, IEC, Geneva, CH.
- IEEE (2005). Communication Delivery Time Performance Requirements for Electric Power Substation Automation. Technical report.
- IEEE (2017). Ieee standard for n times 64 kbps optical fiber interfaces between teleprotection and multiplexer equipment. *IEEE Std C37.94-2017 (Revision of IEEE Std C37.94-2002)*, 1–23.
- IEEE (2018). ISO/IEC/IEEE - International Standard - Information technology—Telecommunications and information exchange between systems—Local and metropolitan area networks—Specific requirements—Part 11: Wireless LAN medium access control (MAC) and physical layer (PHY) specifications. *ISO/IEC/IEEE 8802-11:2018(E)*, 1–3538.
- IEEE (2020). Ieee standard for low-rate wireless networks. *IEEE Std 802.15.4-2020 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2015)*, 1–800.
- Kumari, N., Chernogorov, F., Ashraf, I., Torsner, J., Kronander, J., Wikström, G., and Sahoo, S. (2019). Enabling process bus communication for digital substations using 5g wireless system. In *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on PIMRC*.
- Li, X., Gao, H., Yuan, T., and Xu, B. (2020). 5g communication based distributed fault recovery scheme of active distribution network. *E3S Web of Conferences*, 185, 01039.
- Lopes, Y., Muchaluat-Saade, D.C., Fernandes, N.C., and Fortes, M.Z. (2015). Geese: A traffic generator for performance and security evaluation of iec 61850 networks. In *2015 IEEE 24th ISIE*.
- Meng, S., Wang, Z., Tang, M., Wu, S., and Li, X. (2019). Integration application of 5g and smart grid. In *11th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, 1–7.
- Minicz, M. (2018). Redes de missão crítica - um estudo de caso do iec 61850 entre subestações elétricas. In *Rio Oil Gas Expo and Conference 2018*.
- Neoenergia (2020). Neoenergia leva medidores inteligentes ao interior de são paulo. URL <https://bit.ly/34FSaQK>.
- Parikh, P.P., Kanabar, M.G., and Sidhu, T.S. (2010). Opportunities and challenges of wireless communication technologies for smart grid applications. In *IEEE PES General Meeting*, 1–7.
- Park, C., Lahiri, K., and Raghunathan, A. (2005). Battery discharge characteristics of wireless sensor nodes: an experimental analysis. In *IEEE SECON 2005*.
- Popovski, P., Trillingsgaard, K.F., Simeone, O., and Durisi, G. (2018). 5g wireless network slicing for embb, urllc, and mmcc: A communication-theoretic view. *IEEE Access*, 6, 55765–55779.
- Qi Tu, Xin Li, H.G. (2021). Topology identification method of urban power grid based on 5g communication. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 770(1), 012078.
- Qualcomm (2016). Making 5g nr a reality: Leading the technology inventions for a unified, more capable 5g air interface. White paper, Qualcomm Technologies, Inc., San Diego, CA.
- Rinaldi, S., Ferrari, P., Flammini, A., Gringoli, F., Loda, M., and Ali, N. (2016). An application of iec 802.11ac to smart grid automation based on iec 61850. In *IECON 2016 - 42nd*.
- Rodríguez, M., Lázaro, J., Bidarte, U., Jiménez, J., and Astarloa, A. (2021). A fixed-latency architecture to secure goose and sampled value messages in substation systems. *IEEE Access*, 9, 51646–51658.
- S, S.R., Dragičević, T., Siano, P., and Prabakaran, S.S. (2019a). Future generation 5g wireless networks for smart grid: A comprehensive review. *Energies*, 12.
- S, S.R., Dragičević, T., Siano, P., and Prabakaran, S.S. (2019b). Future generation 5g wireless networks for smart grid: A comprehensive review. *Energies*, 12(11).
- Submódulo 2.11 (2021). Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção. Requisitos, ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico.
- Submódulo 2.13 (2020). Requisitos mínimos para sistemas de medição sincronizada de fasores. Requisitos, ONS.
- Submódulo 2.15 (2021). Requisitos mínimos para telecomunicações. Requisitos, ONS.
- Tanenbaum, A., Feamster, N., and Wetherall, D. (2021). *Redes de Computadores*. Bookman Editora.
- XV STPC (2021). *XV Seminário Técnico de Proteção e Controle*. Comitê Nacional Brasileiro de Produção e Transmissão de Energia Elétrica CIGRÉ-Brasil.
- Yan, Y., Qian, Y., Sharif, H., and Tipper, D. (2013). A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 15(1), 5–20.
- Zhang, Z. and Wang, Q. (2021). Application status and prospects of 5g technology in distribution automation systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2021, 1–9.