

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO 5G EM APLICAÇÕES DE  
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

*Analysis of 5G usage in Smart Grids Applications.*

**Wélington Borsato Rodrigues**

Junho de 2022

Santa Rita do Sapucaí - MG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**Wélington Borsato Rodrigues**

**ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO 5G EM APLICAÇÕES DE  
REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

*Analysis of 5G usage in Smart Grids Applications.*

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Sistema Elétrico de Potência

Orientador: Prof. Ph.D. Benedito Donizeti Bonatto

Coorientador: Prof. Ph.D. Alexandre Baratella Lugli

Junho de 2022

Santa Rita do Sapucaí - MG

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir chegar nesse ponto de minha carreira acadêmica. Agradeço eternamente a meus pais, Reinaldo e Ana Lúcia, que nunca mediram esforços para que tudo de melhor acontecesse em minha vida e são os responsáveis pela minha educação, meu caráter e minha força. Agradeço meu irmão Reinaldo Borsato Rodrigues por ser um exemplo na vida acadêmica e profissional. Agradeço minha noiva Milene Oliveira, que sempre me apoia, me incentiva e está presente em todos os meus sonhos. Agradeço a minha cunhada-irmã Marina, que me viu crescer, amadurecer e faz parte de cada conquista da minha vida. Agradeço também a toda a família Oliveira e “agregados”, da qual tenho o privilégio de fazer parte e que é um grande exemplo de união e superação. Agradeço também a minha vó Anna, que se emociona a cada nova conquista e a minha vó Maria, que foi morar no céu no início do curso, mas que pôde manifestar sua felicidade por minha aprovação. Agradeço também a minha madrinha Vera e meu padrinho Dito, que me acompanham desde meu nascimento e personificam o amor ao próximo.

Por fim, sou grato a todos os colegas de estudo e aos professores que passaram por minha vida acadêmica, pois eles exercem a profissão mais bonita de todas e têm grande influência no meu futuro e no futuro da sociedade. Agradecimento especial aos professores Alexandre Baratella Lugli e Benedito Donizeti Bonatto, pela confiança e por gentilmente aceitarem me orientar neste trabalho.

## RESUMO

O sistema elétrico brasileiro possui características particulares que demandam requisitos operacionais e aplicações de redes elétricas inteligentes bastante específicas. Pode-se citar, por exemplo, o fato de o sistema ser majoritariamente interligado, com grande extensão territorial e com a maior parte da geração elétrica sendo de origem hidráulica, situação que permite a inclusão de monitoramento de recurso hídrico como uma aplicação de redes elétricas inteligentes. Além disso, outras aplicações estão presentes, tais como medição remota, gerenciamento de energia, automação, resposta de demanda, eletrificação veicular, geração distribuída e controle de sistemas de proteção. Um fator que viabiliza estas aplicações é o uso de tecnologias de comunicação, as quais devem atender requisitos específicos para cada uma delas. Sendo assim, uma vasta gama de tecnologias precisam ser analisadas criteriosamente e tecnicamente para cada caso, como por exemplo *WiMAX*, *NB-IoT*, *LoRa*, *Sigfox*, *Bluetooth*, *Zigbee*, *GOES*, *Wi-Fi*, *Ingenu*, *6LoWPAN*, *DASH7* e as diversas tecnologias celulares. Neste cenário, o sistema de telecomunicações no Brasil está em constante atualização e se prepara para a chegada da rede móvel 5G, o qual foi analisado em todas as aplicações citadas e se mostra viável na maioria delas. Além disso, o 5G vem sendo amplamente estudado, sendo uma das tecnologias de comunicação sem fio mais citadas em publicações científicas relacionadas às redes elétricas inteligentes.

**Palavras-chave** – 5G, aplicações de *Smart Grid*, rede elétrica inteligente, sistema elétrico, sistema interligado nacional, tecnologias celulares, tecnologias sem fio, telecomunicações.

## **ABSTRACT**

*The Brazilian electrical system has particular characteristics that demand very specific operational requirements and Smart Grids applications. One example is the fact of the system is mostly interconnected, with a large territorial extension and with most of the electric generation being of hydraulic origin, what is a situation that allows the inclusion of water resource monitoring as an Smart Grids application. In addition, other applications are present, such as remote metering, energy management, automation, demand response, vehicular electrification, distributed generation and control of protection systems. One factor that makes these applications viable is the use of communication technologies, which must meet specific requirements for each kind of application. Therefore, a wide range of technologies need to be analyzed carefully and technically for each case, such as WiMAX, NB-IoT, LoRa, Sigfox, Bluetooth, Zigbee, GOES, Wi-Fi, Ingenu, 6LoWPAN, DASH7 and cellular technologies. In this scenario, the telecommunications system in Brazil is constantly being updated and is being prepared to receive the 5G cellular network, which has been analyzed in all the aforementioned applications and is shown to be viable in most of them. In addition, 5G has been widely studied, being one of the most cited wireless communication technologies in scientific publications related to Smart Grids. This scenario shows a great interest of the scientific community of 5G in Smart Grids context.*

**Keywords** – 5G, Brazilian national integrated system, cellular technologies, electric system, Smart Grids, Smart Grids applications, telecommunications, wireless technologies.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Linhas de transmissão do SIN. Fonte: [3] .....	2
Figura 2-1 – Organização em camadas da comunicação. Fonte: O próprio autor... 6	6
Figura 2-2 – Organização da AMI. Fonte: O próprio autor .....	8
Figura 2-3 – Dispositivos na <i>HEMS</i> . Fonte: O próprio autor .....	9
Figura 2-4 – Curva de Demanda Horária no Brasil. Fonte: [22] .....	11
Figura 2-5 – PCD instalada às margens do Rio Tocantins. Fonte: O próprio autor	15
Figura 2-6 - 5G associado a redes elétricas inteligentes. Fonte: Adaptado de [39]. .....	23
Figura 2-7 – Topologia da tecnologia <i>LoRa</i> . Fonte: Adaptado de [52]. .....	28
Figura 2-8 – <i>Wi-Fi Mesh</i> . Fonte: [62].....	31
Figura 2-9 – <i>Piconet</i> e <i>Scatternet</i> . Fonte: O próprio autor .....	33
Figura 2-10 – Topologias do <i>Zigbee</i> . Fonte: O próprio autor .....	34
Figura 3-1 – Topologia de DA. Fonte: O próprio autor .....	40
Figura 3-2 – Distribuição de PCDs pelo Brasil. Fonte: [76] .....	44
Figura 3-3 – Comparação entre cobertura celular e localização de PCDs no Pará. Fonte: O próprio autor.....	45
Figura 4-1 – Tecnologias citadas entre 2010 e 2013. Fonte: O próprio autor .....	50
Figura 4-2 – Tecnologias citadas entre 2014 e 2016. Fonte: O próprio autor .....	51
Figura 4-3 – Tecnologias citadas entre 2017 e 2019. Fonte: O próprio autor .....	53
Figura 4-4 – Tecnologias citadas entre 2020 e 2022. Fonte: O próprio autor .....	54
Figura 4-5 – Relacionamento do 5G aplicado em <i>redes elétricas inteligentes</i> . Fonte: O próprio autor .....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Requisitos técnicos para <i>HAN</i> [37].....	19
Tabela 2 – Requisitos técnicos para <i>NAN</i> [37].....	19
Tabela 3 – Requisitos técnicos para <i>WAN</i> [37].....	21
Tabela 4 – Comparação entre 3G e 4G [16], [37] e [49]. .....	26
Tabela 5 – Características da tecnologia NB-IoT.....	27
Tabela 6 – Características técnicas do <i>Bluetooth</i> [63]. .....	32
Tabela 7 – Tipos de dispositivos <i>Zigbee</i> [14]. .....	34
Tabela 8 – Frequências e taxas de transmissão do <i>6LoWPAN</i> [61]. .....	35
Tabela 9 - Compilação de tecnologias, características técnicas e aplicação.....	48
Tabela 10 – Compilação das tecnologias citadas de 2010 a 2013 .....	50
Tabela 11 - Compilação das tecnologias citadas de 2014 a 2016 .....	52
Tabela 12 - Compilação das tecnologias citadas de 2017 a 2019 .....	53
Tabela 13 - Compilação das tecnologias citadas de 2020 a 27 de março de 2022	55

## LISTA DE SIGLAS

6LoWPAN	<i>IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
ANA	Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BEMS	<i>Build Energy Management System</i>
BPL	<i>Broadband over Power Lines</i>
CEMS	<i>Community Energy Management System</i>
DEMS	<i>Data Center Energy Management System</i>
DA	<i>Distributed Automation</i>
DCS	<i>Data Collecting System</i>
DER	<i>Distributed Energy Resource</i>
DNP3	<i>Distributed Network Protocol 3</i>
DR	Resposta da Demanda
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
EMS	<i>Energy Management System</i>
EIRP	Potência Efetivamente Irrradiada
EV	Veículo elétrico
GD	Geração Distribuída
GOES	<i>Geostationary Operational Environmental Satellites</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HAN	<i>Home Area Network</i>



<i>HEMS</i>	<i>Home Energy Management System</i>
<i>IEDs</i>	<i>Intelligent Electronic Devices</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>IoT</i>	<i>Internet das Coisas</i>
<i>ITU-R</i>	<i>International Telecommunication Union Radio-communication Sector</i>
<i>LAN</i>	<i>Local Area Network</i>
<i>LoRa</i>	<i>Long Range</i>
<i>LPWAN</i>	<i>Low Power Wide Area Network</i>
<i>LTE</i>	<i>Long Term Evolution</i>
<i>mMTC</i>	<i>Massive machine-type communication</i>
<i>MRH</i>	<i>Monitoramento de Recurso Hídrico</i>
<i>NAN</i>	<i>Neighbourhood Area Network</i>
<i>NOAA</i>	<i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i>
<i>ONS</i>	<i>Operador Nacional do Sistema</i>
<i>PCD</i>	<i>Plataforma Coletora de Dados</i>
<i>PLC</i>	<i>Power Line Communication</i>
<i>PRODIST</i>	<i>Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional</i>
<i>QoS</i>	<i>Qualidade de Serviço</i>
<i>SIN</i>	<i>Sistema Interligado Nacional</i>
<i>TIC</i>	<i>Tecnologia da Informação e Comunicação</i>
<i>UHE</i>	<i>Usina Hidrelétrica</i>
<i>URLLC</i>	<i>Ultra-reliable and low-latency communications</i>
<i>V2G</i>	<i>Vehicle-to-Grid</i>
<i>WAN</i>	<i>Wide Area Network</i>
<i>WASA</i>	<i>Wide-Area Situational Awareness</i>
<i>Wi-Fi</i>	<i>Wireless Fidelity</i>
<i>WiMAX</i>	<i>Worldwide Interoperability Microwave Access</i>

---

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	I
RESUMO.....	II
<i>ABSTRACT</i> .....	III
LISTA DE FIGURAS.....	IV
LISTA DE TABELAS.....	V
LISTA DE SIGLAS.....	VI
SUMÁRIO.....	1
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA.....	1
1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
1.4. PUBLICAÇÕES GERADAS .....	5
<b>2. TELECOMUNICAÇÕES NAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES ..</b>	<b>6</b>
2.1. APLICAÇÕES .....	6
2.1.1. INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO AVANÇADA – AMI .....	7
2.1.2. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA - EMS .....	8
2.1.3. AUTOMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO – DA.....	10
2.1.4. REPOSTA DA DEMANDA - DR .....	10
2.1.5. VEÍCULOS ELÉTRICOS – EV .....	12
2.1.6. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA – GD .....	13
2.1.7. WIDE-AREA SITUATIONAL AWARENESS – WASA.....	13
2.1.8. MONITORAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS - MRH .....	14
2.1.9. RECURSOS DE ENERGIA DISTRIBUÍDA - DER.....	15
2.2. REQUISITOS DE COMUNICAÇÃO PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES.....	15
2.2.1. REQUISITOS TÉCNICOS .....	16
2.2.2. REQUISITOS SISTÊMICOS .....	18

---

2.2.3.	REQUISITOS POR APLICAÇÃO.....	18
2.3.	5G .....	22
2.4.	VISÃO GERAL DE OUTRAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO	25
2.4.1.	TECNOLOGIAS CELULARES.....	25
2.4.2.	WiMAX.....	26
2.4.3.	NB-IoT .....	27
2.4.4.	LoRa e LoRaWAN .....	28
2.4.5.	Sigfox .....	29
2.4.6.	INGENU – RPMA .....	30
2.4.7.	Wi-Fi .....	30
2.4.8.	Bluetooth .....	32
2.4.9.	ZigBee .....	33
2.4.10.	6LoWPAN.....	35
2.4.11.	DASH7.....	35
2.4.12.	GOES .....	36
<b>3.</b>	<b>ANÁLISE DE UTILIZAÇÃO DO 5G .....</b>	<b>38</b>
3.1.	5G PARA INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO AVANÇADA .....	38
3.2.	5G PARA SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA.....	39
3.3.	5G PARA AUTOMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO.....	40
3.4.	5G PARA RESPOSTA DA DEMANDA.....	41
3.5.	5G EM VEÍCULOS ELÉTRICOS .....	42
3.6.	5G PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA .....	42
3.7.	5G PARA WIDE-AREA SITUATIONAL AWARENESS.....	43
3.8.	5G PARA MONITORAMENTO DE RECURSO HÍDRICO .....	44
3.9.	5G PARA RECURSOS DE ENERGIA DISTRIBUÍDA .....	46
3.10.	COMPILAÇÃO DAS ANÁLISES.....	47
<b>4.</b>	<b>CENÁRIO DO 5G APLICADO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES</b>	<b>49</b>
4.1.	ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2010 E 2013.....	50

---

4.2.	ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2014 E 2016.....	51
4.3.	ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2017 E 2019.....	52
4.4.	ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2020 E 2022.....	54
4.5.	ANÁLISE DO RELACIONAMENTO DO 5G COM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES.....	55
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>57</b>
5.1.	CONTRIBUIÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	57
5.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>60</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>69</b>

---

## 1. INTRODUÇÃO

Este Capítulo tem o objetivo de introduzir o tema que será estudado neste trabalho, apresentando uma contextualização do assunto, o objetivo e a estrutura da dissertação.

### 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO E RELEVÂNCIA DO TEMA

O sistema elétrico brasileiro é composto por uma diversidade de fontes de geração de energia. Devido às características naturais, estima-se que a geração hidrelétrica seja responsável por 65% de toda a geração elétrica nacional [1]. Até 2050, acredita-se que a energia hidrelétrica ainda seja responsável por 40% da matriz energética brasileira [2].

O Brasil possui o Sistema Interligado Nacional (SIN), o qual interliga quase a totalidade das usinas geradoras de energia elétrica em todo o território, com exceção do estado de Roraima, que deve ser conectado até 2024, conforme mostra a Figura 1-1. Desta maneira, o SIN transforma o sistema elétrico brasileiro em uma robusta malha de unidades consumidoras e geradoras interconectadas que permite maior gerenciamento de recursos naturais usados na geração, facilita a transmissão de energia gerada por qualquer usina do sistema para qualquer parte do país.



Figura 1-1 – Linhas de transmissão do SIN. Fonte: [3]

Para que o SIN funcione, é necessário, além da interligação elétrica, uma interligação em nível de redes de telecomunicações, de modo que o Operador Nacional do Sistema (ONS), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), empresas do setor elétrico, distribuidoras de energia, consumidores, prosumidores e demais partes tenham controle e acesso as informações pertinentes do setor elétrico. Esse cenário de comunicação ilustra como deve ser uma rede elétrica inteligente.

Em *Smart Grids Opportunities, Developments, and Trends* [4], uma rede elétrica inteligente é definida como: “Uma rede elétrica inteligente usa sensoriamento, processamento embarcado e comunicação digital para habilitar a rede elétrica para ser observável [...], controlável [...], automática [...], totalmente integrada [...]”.

De acordo com o *U.S Department of Energy*: “A rede inteligente é habilitada por tecnologia digital aplicada em dispositivos e sistemas que permitem detecção e controle aprimorados dos elementos da rede, compartilhamento e comunicação de informações mais difundidas, computação mais poderosa e controle mais preciso” [5].

---

Com o uso de tecnologias de comunicação em redes elétricas inteligentes, novos modelos de geração e distribuição podem ser incorporados ao sistema elétrico, melhorando sua sustentabilidade. Para isso, é necessário que se tenha uma maior capacidade de monitoramento e controle do sistema, que é provida pelo aumento da conectividade [6].

As comunicações de uma rede elétrica inteligente são diretamente relacionadas aos diversos domínios da topologia do sistema elétrico: Geração, Transmissão, Distribuição e Consumidores [7]. Cada domínio tem seus sensores, medidores inteligentes, atuadores e um sistema de supervisão, porém o cenário brasileiro permite incluir um novo parâmetro no domínio da geração: os recursos hídricos.

A resolução conjunta entre a Agência Nacional das Águas e Saneamento Básico (ANA) e a ANEEL nº 3 de agosto de 2010 estabelece “[...] as condições e os procedimentos a serem observados pelos concessionários e autorizados de geração de energia hidrelétrica para a instalação, operação e manutenção de estações hidrométricas visando ao monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos, e dar outras providências” [8]. Desta forma, o sistema hídrico diretamente relacionado a usinas hidrelétricas é monitorado por plataformas coletoras de dados (PCD), as quais enviam dados extremamente importantes para o controle da geração de energia, tais como vazão e nível de rios e reservatórios.

Para prover condições de se ter um sistema de monitoramento robusto e controle de ações relacionadas a geração, transmissão, distribuição e tarifação, é necessário empregar diversas tecnologias de comunicação, além de diversos protocolos de comunicação, capazes de viabilizar um sistema elétrico cada vez mais eficiente, sustentável e robusto.

A escolha dessas tecnologias e protocolos não é simples, porque cada um destes domínios tem seus próprios requisitos de comunicação. Por exemplo, a automação de subestações necessita de latência menor que 200ms, porém um monitoramento de carregamento de veículos elétricos pode ter uma latência de minutos [9].

---

Existe uma diversidade entre as tecnologias já empregadas em cada solução, como por exemplo o uso de tecnologia celular de gerações diferentes (2G, 3G, *Long Term Evolution (LTE)*, também chamado de 4G, *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)*, entre outros). Diversas tecnologias padronizadas pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (*Institute of Electrical and Electronics Engineers - IEEE*) também são utilizadas, tais como os padrões da série *IEEE802 (Bluetooth, Zigbee, etc.)*. Além disso, são utilizadas tecnologias cabeadas, como o *Power Line Communication (PLC)* e a fibra ótica [10] e, também, existem algumas tecnologias promissoras ainda pouco utilizadas, como é o caso do 5G.

## **1.2. OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO**

A escolha inadequada de uma tecnologia de comunicação para uma aplicação de redes elétricas inteligentes podem causar um ônus considerável aos envolvidos na implementação, visto que podem ocorrer problemas de desempenho, escalabilidade, confiabilidade e segurança. Sendo assim, este trabalho visa apresentar uma compilação de informações e considerações sobre tecnologias de comunicação aplicável às redes elétricas inteligentes, tanto as tecnologias utilizadas atualmente quanto as tecnologias promissoras, como, por exemplo, o 5G. Além disso, é realizada uma análise da utilização da tecnologia 5G em cada uma das aplicações citadas para redes elétricas inteligentes, de modo que as partes envolvidas no desenvolvimento do sistema tenham um material de referência para novas implementações tecnológicas no setor elétrico.

## **1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO**

Buscando criar um documento que atinja o objetivo proposto, esta dissertação foi estruturada em cinco Capítulos.

O primeiro Capítulo apresenta uma introdução sobre o tema, trazendo conhecimento geral do cenário do setor elétrico brasileiro, apresenta justificativas e cita o objetivo deste trabalho.

O segundo Capítulo traz o conhecimento das aplicações de telecomunicações em redes elétricas inteligentes e equipamentos utilizados nesta área. Nesta mesma seção, são apresentados requisitos técnicos de comunicação para redes elétricas



---

inteligentes, características das tecnologias aplicáveis e protocolos de comunicação focados no setor elétrico.

No terceiro Capítulo, são feitas análises técnicas sobre cada tipo de aplicação de telecomunicações em redes elétricas inteligentes. Esta análise permite determinar em quais cenários cada tipo de tecnologia e protocolo pode ser utilizado de maneira mais eficiente. Além disso, nesta seção também se verifica a viabilidade do uso da tecnologia 5G nas redes elétricas inteligentes, nas aplicações citadas.

O quarto Capítulo apresenta uma análise bibliográfica sobre o volume citações do 5G no contexto das redes elétricas inteligentes, de modo que se possa mensurar o interesse da comunidade científica na tecnologia.

O quinto Capítulo apresenta as conclusões referentes às análises técnicas e o ensaio efetuado no Capítulo quatro. Além disso, esta seção traz propostas para trabalhos futuros em continuidade desta dissertação.

As referências bibliográficas estão dispostas ao final da dissertação.

#### **1.4. PUBLICAÇÕES GERADAS**

Como requisito obrigatório, este trabalho gerou a publicação na revista internacional, *ICIC Express Letters, Part B: Applications*, com o título: “5G Utilization Analysis For Smart Grid Applications Compared To Wimax And Lpwan Technologies” [11], o qual é apresentado no ANEXO I.

## 2. TELECOMUNICAÇÕES NAS REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Esse Capítulo tem por finalidade apresentar os conceitos de sistemas de telecomunicações aplicados às redes elétricas inteligentes.

### 2.1. APLICAÇÕES

No contexto de redes elétricas inteligentes, diversas aplicações distintas necessitam do uso de Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) para garantir a operacionalidade e a eficiência da rede.

Essas aplicações estão presentes em todos os níveis de abrangência de uma rede elétrica inteligente, seja ela de curto, médio ou longo alcance. Sendo assim, pode-se dividir a telecomunicação das redes elétricas inteligentes em camadas, tais como a *Home Area Network (HAN)*, que representa as comunicações do lado do consumidor [12], a *Neighbourhood Area Network (NAN)*, que representa a parte da comunicação que coleta os dados dos medidores inteligentes [12] através de pontos de acumulação de dados e a *Wide Area Network (WAN)*, que interconecta toda a estrutura com os centros de controle [13]. A Figura 2-1 ilustra esta organização.

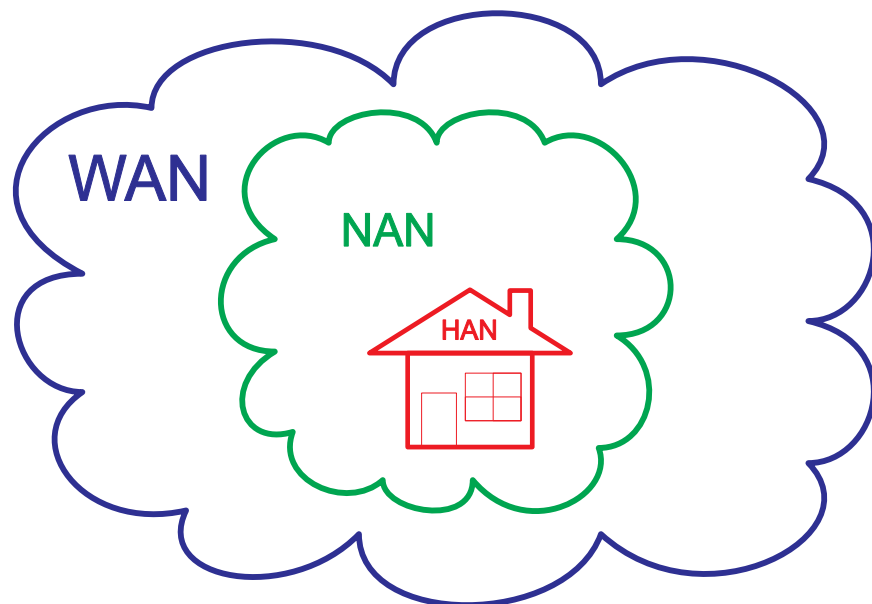


Figura 2-1 – Organização em camadas da comunicação. Fonte: O próprio autor.

Este Capítulo apresenta essas aplicações e, também, evidencia como as telecomunicações são usadas em cada uma delas.

### 2.1.1. INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO AVANÇADA – AMI

A Infraestrutura de Medição Avançada (*Advanced Metering Infrastructure - AMI*) representa a integração de vários elementos, tais como medidores inteligentes, *HANs*, sensores avançados, sistemas de controle, interfaces de *softwares* padronizados e sistemas de gerenciamento de informações que permitem a coleta e a disseminação de informações entre usuários e as companhias de energia [14].

A *AMI* se estende pelas camadas de comunicação das redes elétricas inteligentes: Na *WAN*, ela é o núcleo de comunicação que interliga as outras camadas de comunicação. A *AMI* em uma *NAN* é implementada no sistema de distribuição para coletar dados de várias *HANs*, tendo foco em precificação e controle da entrega de potência. A *NAN* usa a *AMI* do *WAN* como um *gateway* para transmissão das informações. Por fim, a *AMI* na *HAN* é baseada no medidor inteligente (*smart meter*), que concentra informações dos dispositivos da casa, tais como geração fotovoltaica, sensores e *Home Energy Management System (HEMS)* [15]. A Figura 2-2 mostra a organização da *AMI*, produzida com dados extraídos de [14].

Dentre os principais benefícios da *AMI*, pode-se citar:

- Gerenciamento remoto da medição;
- Detecção remota de interrupção/falta;
- Envio em tempo real de informações sobre preços e emissão de CO<sub>2</sub>;
- Conhecimento da demanda em tempo real;
- Envio de sinais de precificação para equipamentos do usuário através da *HEMS*;
- Monitoramento da qualidade de energia;
- Medição de frequência da rede.

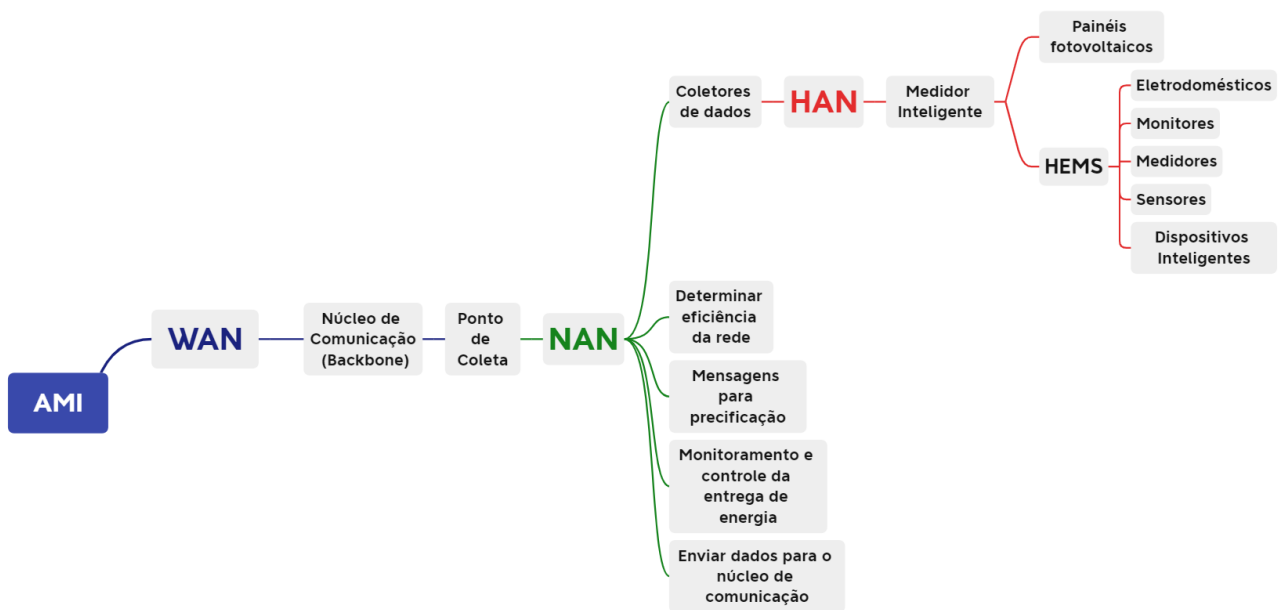


Figura 2-2 – Organização da AMI. Fonte: O próprio autor

Um dos desafios da *AMI* é garantir a interoperacionalidade do sistema, porque diversas tecnologias de comunicações são empregadas, sejam elas cabeadas, tais como *PLC*, fibra óptica, *Broadband over Power Lines (BPL)*, ou sem fio, tais como *Wireless Fidelity (Wi-Fi)*, Celular, *WiMAX*, *Bluetooth*, Satélite, *Zigbee*, *IPv6 over Low-Power Wireless Personal Area Networks (6LoWPAN)* e *Z-Wave*, além de tecnologias *Low Power Wide Area Network (LPWAN)*, tais como *Narrow Band – Internet of Things (NB-IoT)*, *Long Range (LoRa)*, *Sigfox*, *Ingenu*, entre outras [15].

### 2.1.2. SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA - EMS

Uma das funções do Sistema de Gerenciamento de Energia (*Energy Management System - EMS*) é viabilizar a alocação de diferentes fontes de energia para os clientes, por meio da integração de fontes de energia renováveis, garantindo a confiabilidade, segurança e proteção do sistema [16]. Dentre as divisões do *EMS*, pode-se citar o *Home Energy Management System (HEMS)*, o *Building Energy Management System (BEMS)*, o *Community Energy Management System (CEMS)* e o *Data Center Energy Management System (DEMS)* [17].

O *DEMS* está relacionado a otimização de equipamentos de TIC (Tecnologia da Informação e Comunicação) e sistemas de ar condicionado [17]. O *CEMS* é situ-

ado entre os fornecedores de energia e os consumidores. No *CEMS* existem equipamentos de armazenamento de energia para suprimento da comunidade [18].

O *HEMS* está relacionado a parcela da rede elétrica inteligente presente dentro das casas. Dentre suas características, está o monitoramento do consumo de energia em tempo real e o controle do fluxo de energia. Estes fatores permitem que se atinja economia de energia, automação residencial e controle remoto dos aparelhos. Dentre os aparelhos presentes nas *HEMS*, podem ser listados as tomadas inteligentes, eletrodomésticos conectados e medidores inteligentes. Em *HEMS* mais avançadas, sistemas de segurança podem ser implementados [14]. Estas características do *HEMS* são aplicáveis ao *BEMS*, conforme apresentado em [19], porém o *BEMS* também pode englobar escritórios, prédios, escolas e franquias [17].

A integração entre a *HEMS* e a *AMI* pode permitir que os aparelhos eletroeletrônicos alterem seu perfil de utilização dependendo do valor atual das tarifas de energia [14]. A Figura 2-3 ilustra uma *HEMS*, na qual aparelhos inteligentes podem ser facilmente encontrados no mercado brasileiro em versões cuja conectividade é provida por tecnologias, tais como, *Bluetooth*, *Wi-Fi* e *Zigbee* [14].

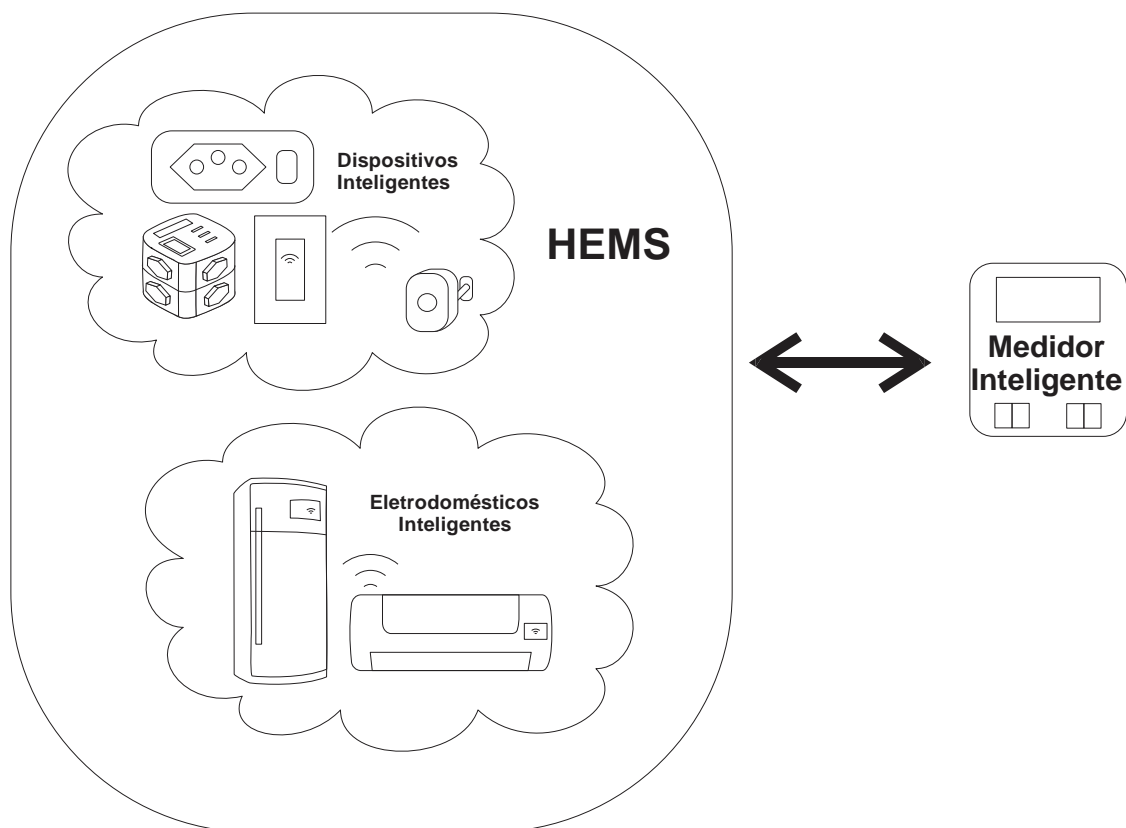


Figura 2-3 – Dispositivos na *HEMS*. Fonte: O próprio autor

### 2.1.3. AUTOMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO – DA

As redes elétricas inteligentes possibilitam a realização do gerenciamento do sistema elétrico em tempo real. Dentre as grandezas gerenciadas neste monitoramento estão sinalizações de *status*, frequência, tensão, corrente [14], controles de banco de capacitores, detectores de falta, chaves e reguladores de tensão, ou seja, a Automação da Distribuição (*Distribution Automation – DA*) é a parte da rede elétrica inteligente que monitora, controla e gerencia a rede de distribuição [15].

Para que o sistema de distribuição seja devidamente operado, diversas tecnologias de comunicação passam a integrar os dispositivos inteligentes das redes elétricas inteligentes. Dentre elas, mostram-se viáveis a Redes de Sensores baseada em Rádio Cognitivo (CRSN), *Wi-Fi*, *Z-Wave*, *PLC*, tecnologias celular e tecnologias *LPWAN* [15].

### 2.1.4. REPOSTA DA DEMANDA - DR

A resposta da demanda (*Demand Response – DR*) é uma aplicação de redes elétricas inteligentes na qual o consumo de energia do cliente da concessionária de energia é ajustado com o foco na manutenção do balanceamento do sistema elétrico e redução dos picos de consumo [20]. Estas ações são tomadas baseadas no valor da tarifa de energia e outros possíveis incentivos por parte das concessionárias. Desta maneira, a expansão do sistema elétrico se torna menos necessária [15], porque o consumo se torna mais eficiente, visto que o usuário é instigado a diminuir ou aumentar o seu consumo em determinados horários, que são baseados no seu próprio padrão de consumo [21].

A Figura 2-4 apresenta dados de demanda no sistema elétrico brasileiro.

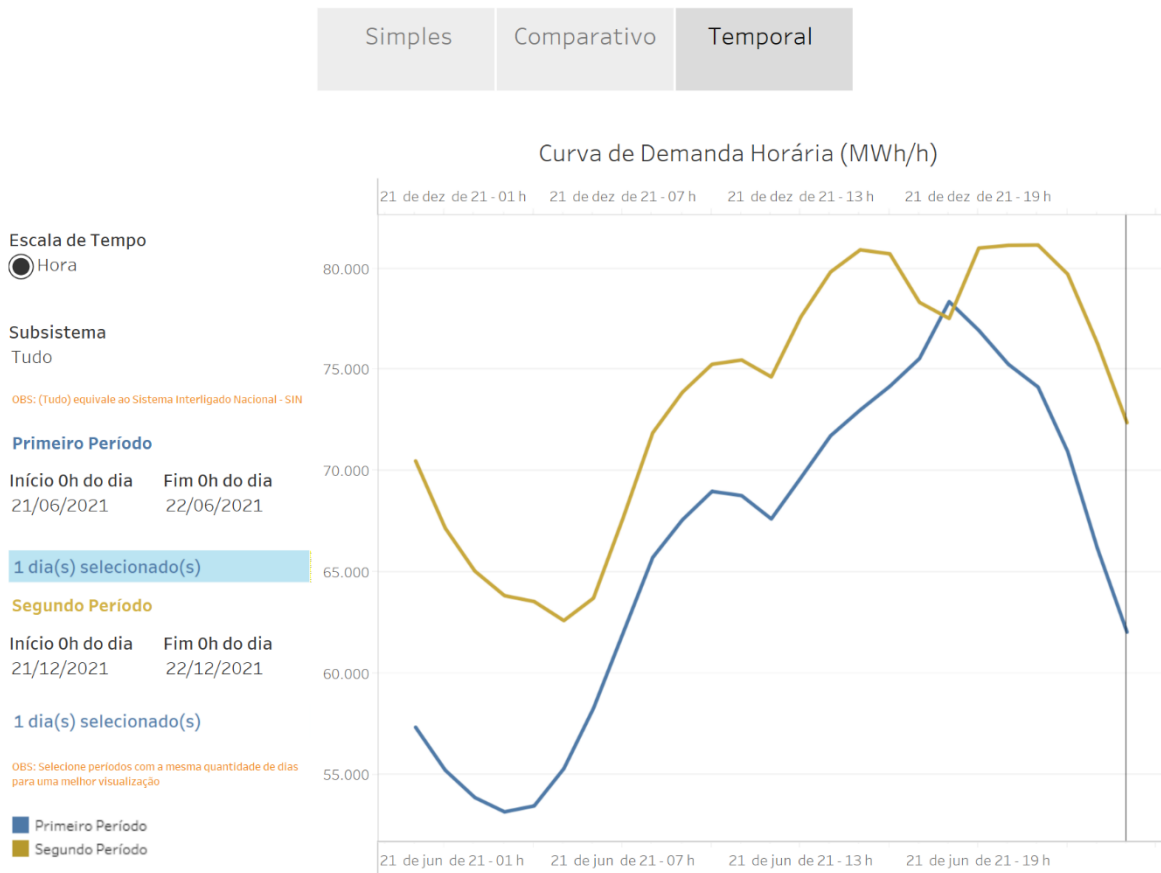


Figura 2-4 – Curva de Demanda Horária no Brasil. Fonte: [22]

Duas curvas foram plotadas na Figura 2-4, sendo em azul o gráfico de demanda em 21/06/2021, data do solstício de inverno e em amarelo, dados de 21/12/2021, data do solstício de verão. É possível perceber que a maior demanda nacional ocorreu no verão, porém, a demanda no inverno foi maior às 18h.

É importante salientar que o Brasil possui uma extensão territorial considerável que abrange diferentes situações climáticas. Aparelhos de ar-condicionado, aquecedores e chuveiros elétricos, por exemplo, têm usos bastantes distintos em cada região. Outro ponto importante é que as usinas geradoras não estão distribuídas uniformemente pelo país, logo é mais eficiente que o consumidor esteja fisicamente próximo da unidade geradora. Sendo assim, a *DR* deve ser implementada regionalmente para que se obtenha resultados mais eficientes.

Para que haja um gerenciamento da resposta da demanda, é necessário que haja uma estrutura de comunicação, inicialmente composta por um medidor inteligente, que fornece comunicação bidirecional entre consumidores e concessionárias

e eventualmente dispositivos de controle de carga, os quais podem ser gerenciados automaticamente pelas concessionárias [15].

Dentre as tecnologias utilizadas na aplicação de resposta da demanda, pode-se citar o IEEE802.15.4, IEEE802.11 e o *PLC*. Tecnologias celular como *LTE* e *5G* também podem ser aplicadas, como apresentado em [23] e [21], respectivamente.

### 2.1.5. VEÍCULOS ELÉTRICOS – EV

A eletrificação veicular está proporcionando uma mudança no sistema energético mundial. Em primeiro lugar, pode-se citar que o consumo e a poluição causada por combustíveis fósseis será reduzida. Alguns dos desafios desta nova era são o aumento da carga e problemas de qualidade de energia, como desvios de frequência e instabilidades de tensão proporcionadas, principalmente, nos momentos em que os veículos estão sendo recarregados [14]. Este cenário cria um viés para que as companhias de eletricidade atuem com tarifas dinâmicas para que o sistema seja mais estável e sustentável, por exemplo [14].

Além de dados sobre o carregamento dos EVs, a rede elétrica inteligente também é conectada diretamente aos veículos, quando transmitem outras informações em tempo real, como posicionamento e estado da carga (*State of Charge – SoC*) [14]. A tecnologia *Vehicle-to-Grid (V2G)*, a qual permite que um veículo elétrico com bateria seja recarregado e também se comporte como um gerador de energia elétrica, devolvendo energia a rede [24], também necessita de comunicação entre veículo e o carregador *V2G* (protocolo IEC15118) e entre o carregador *V2G* e a concessionária (protocolo IEC61850) [25].

A infraestrutura de comunicação deve ser segura, escalável e confiável, além de suportar uma quantidade de dados suficientes [14]. Dentre as tecnologias de comunicação usadas nestes cenários, encontram-se a *PLC* [25] e as tecnologias sem fio [14]. Além disso, é válido ressaltar que os carros estão cada vez mais conectados. Sendo assim, tecnologias como *LoRa*, *DASH7*, *NB-IoT* e celular [26], que hoje fazem parte de sistemas inteligentes dos veículos, podem ser participantes do sistema de monitoramento e gerenciamento de EVs.



### 2.1.6. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA – GD

Segundo dados divulgados pelo ONS em seu site, em 2025 estima-se que a geração fotovoltaica será responsável por cerca de 4% da matriz energética nacional, sendo que em 2021, ela foi responsável por 2,6% [27].

Sabendo do crescimento desta fonte de energia, o monitoramento das usinas fotovoltaicas se torna um fator determinante para a otimização da geração. Dentre os fatores nos quais um monitoramento é importante, verifica-se a otimização do tempo de limpeza da usina, de modo a reduzir custos de manutenção e aumentar a geração. Estes dados podem até mesmo ser utilizados para se determinar o melhor posicionamento das placas fotovoltaicas [28]. O monitoramento também permite detectar painéis solares com falhas, sombreamento e eventuais degradações no sistema de geração. A detecção destes problemas permite que a geração seja cada vez menos prejudicada por fatores externos [29].

Outro benefício do monitoramento da GD é a previsão de geração. Isto é um fato importante porque valores indeterminados de geração podem prejudicar a qualidade de energia elétrica, tais como alterações de tensão e falha no controle de energia reativa [28]. Em conjunto com a previsão da geração, pode-se atrelar também a previsão financeira do sistema solar.

A geração fotovoltaica também pode estar interligada a veículos elétricos, visto que existem topologias em que inversores solares são conectados diretamente a carregadores de EVs, como demonstradas em [30]. Dentre as tecnologias utilizadas no monitoramento deste tipo de sistema, pode-se citar o *Zigbee*, o *Bluetooth*, redes celulares e o *Wi-Fi* [28].

### 2.1.7. WIDE-AREA SITUATIONAL AWARENESS – WASA

O WASA é o segmento das redes elétricas inteligentes responsável por decisões automáticas relacionadas a proteção do sistema elétrico. As decisões são tomadas com base em medições de grandezas elétricas obtidas por Dispositivos Eletrônicos Inteligentes (IEDs) e Unidades de Medição Fasorial (PMUs). Pode se notar então que a característica de *Self-Healing*, ou seja, uma auto resolução de problemas do sistema elétrico está presente no contexto da WASA [15].

---

Para o funcionamento da *WASA*, tecnologias de comunicação devem ser empregadas, porém, sua escolha deve ser cuidadosa, porque muitos monitoramentos ocorrem em alta tensão, a qual pode causar interferências na rede de comunicação [15].

Dentre as tecnologias sem fio utilizadas em *WASA* encontram-se o *WiMAX*, Celular, *LPWAN* e Satélite [31].

#### **2.1.8. MONITORAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS - MRH**

A resolução conjunta entre a ANA e a ANEEL nº 3, de agosto de 2010, estabelece o monitoramento dos reservatórios e rios responsáveis pela geração hidrelétrica nacional, de modo a viabilizar um melhor controle dos recursos de geração. Sendo assim, ficou estabelecido a instalação de Plataformas Coletoras de Dados (PCDs) que visam o “monitoramento pluviométrico, limnimétrico, fluviométrico, sedimentométrico e de qualidade da água associado a aproveitamentos hidrelétricos” [8]. As agências determinam as especificações técnicas das PCDs, as quais utilizam tecnologias celular ou *Geostationary Operational Environmental Satellites (GOES)* [32] associadas a mensagens no padrão SOAP enviadas para um *webservice* [33]. Esta topologia permite o monitoramento em tempo real do recurso hidráulico para geração elétrica.

A Figura 2-5 mostra uma PCD que monitora o nível do rio Tocantins no município de Imperatriz, no estado do Maranhão. Os dados desta plataforma são consumidos pela Usina Hidrelétrica (UHE) de Tucuruí, no estado do Pará, e são transmitidos por tecnologia *GOES*.



Figura 2-5 – PCD instalada às margens do Rio Tocantins. Fonte: O próprio autor

### 2.1.9. RECURSOS DE ENERGIA DISTRIBUÍDA - DER

O Recurso de Energia Distribuída (*Distributed Energy Resource - DER*) é uma área de atuação das redes elétricas inteligentes. Nela está contida a integração de diversas fontes de geração de eletricidade, sejam elas renováveis (fotovoltaica, microturbinas hidráulicas, turbinas eólicas) ou não-renováveis (células de combustível, diesel, gás natural), armazenamento de energia e operação em ilha, ou seja, *DER* é o segmento das redes elétricas inteligentes que aborda os conceitos de *microgrids* [15]. A legislação brasileira apenas permite que a geração distribuída injete energia elétrica oriunda de fontes renováveis [34], ou seja, geração feita por combustíveis fósseis não pode ser interconectada à rede elétrica.

Os *DERs* são conectados ao sistema elétrico através de *IEDs* em conjunto com tecnologias de comunicação que possuem requisitos temporais definidos. Dentre as tecnologias utilizadas, encontram-se o GPRS, protocolos IEEE802.11 e o *PLC* [15].

### 2.2. REQUISITOS DE COMUNICAÇÃO PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Definir os requisitos de comunicação para cada nível das redes elétricas inteligentes é essencial, visto que as empresas do setor elétrico realizam projetos cuja operação pode durar vários anos. Por outro lado, as tecnologias de comunicação

são atualizadas muito mais rapidamente. Tecnologias sem fio por exemplo, são substituídos entre 4 a 6 anos [35].

Dentre os requisitos de comunicação, existem aqueles nos quais o cumprimento depende exclusivamente de questões técnicas e outros que dependem de ações sistêmicas.

### 2.2.1. REQUISITOS TÉCNICOS

Os requisitos técnicos estão diretamente ligados às características das tecnologias de comunicação. São eles:

- **Confiabilidade** – Porcentagem do tempo em que a rede de comunicação opera sem falhas. Para algumas aplicações críticas de redes elétricas inteligentes, a confiabilidade da rede de comunicação pode ser de 99,9999%, o que resulta em menos de 1s de falha por dia [6].
- **Consumo de energia** – Um consumo energético reduzido sempre é o melhor cenário, porém algumas aplicações de redes elétricas inteligentes aceitam um consumo mais elevado. Isso depende da tecnologia aplicada [36].
- **Disponibilidade** – Parâmetro que indica a porcentagem do tempo em que a rede de comunicação está disponível. Uma maneira de aumentar este parâmetro é com o uso de redundâncias [36].
- **Escalabilidade** – Esta característica pode ser dividida em duas partes: Escalabilidade de carga e escalabilidade geográfica. A primeira delas se refere a capacidade do sistema de comunicação comportar mais tráfego de dados. A segunda, se refere à capacidade de cobertura territorial [6]. É importante para as redes elétricas inteligentes que novos dispositivos de rede não prejudiquem significativamente a qualidade do serviço de comunicação. Isto pode ser obtido com a aplicação de soluções de internet da coisas (IoT) [36] em conjunto com a computação em nuvem [31].
- **Flexibilidade, heterogeneidade e interoperabilidade** – Estes três termos são utilizados na literatura para se referir ao fato de que o sistema de

---

comunicação da rede elétrica inteligente deve permitir a integração de serviços e dispositivos com características, protocolos, aplicações e requisitos diferentes, ou seja, o sistema deve ser capaz integrar todas as entidades de comunicação [6], [31]. É importante ressaltar que apenas o uso de uma tecnologia heterogênea não é suficiente para garantir a flexibilidade necessária ao sistema. Toda a arquitetura deve estar preparada para lidar com toda a diversidade de requisitos de comunicação [37].

- **Largura de Banda e Taxa de Dados** – As redes elétricas inteligentes demandam larguras de banda e taxas de transmissão de dados diferentes para cada aplicação, ou seja, é muito importante que se determine os requisitos de largura de banda antes de escolher uma tecnologia a ser aplicada [35].
- **Latência** – Este parâmetro representa quanto tempo demora para que um pacote de dados trafegue entre dois pontos de rede [35]. De maneira geral, a determinação da latência aceitável em cada aplicação, depende da aplicação e dos requisitos de projeto em que as redes elétricas inteligentes estão submetidas. Algumas aplicações dentro da *HAN* aceitam latências na casa de minutos, por exemplo [31], [37].
- **Qualidade de Serviço (QoS)** – Em redes de telecomunicações, a QoS vem para garantir o fluxo de mensagem. Isto é feito através de alocação de recursos e priorização de mensagens, visto que cada pacote de dados pode ter prioridades diferentes dentro do contexto das redes elétricas inteligentes. Por exemplo, em aplicações com medidores, latências na casa de segundos são aceitáveis, porém ações imediatas podem ser necessárias durante o monitoramento da transmissão [6].
- **Segurança** – As redes elétricas inteligentes devem ser seguras contra ataques [35]. A segurança da rede de comunicação pode ser feita através da proteção física da rede, porém a rede elétrica está se tornando cada vez mais inteligente, conectada e autônoma. Isto cria novas vulnerabilidades ao sistema [6]. A segurança nos protocolos de comunicação pode causar aumento de latência e de consumo de energia dos

dispositivos de rede, e, portanto, análises mais detalhadas devem ser tomadas caso a caso [36].

### 2.2.2. REQUISITOS SISTÊMICOS

Os requisitos sistêmicos estão relacionados a ações e comportamento das partes envolvidas na gerência das redes elétricas inteligentes. Pode-se então citar:

- Aumento de eficiência buscando a preservação de recursos e do ambiente [35];
- Viabilizar o crescimento de novos mercados de eletricidade [35];
- Acomodar as opções de geração e armazenamento de energia [35];
- Permitir restabelecimento automático (*Self-healing*) [35];
- Motivar a participação dos consumidores na rede elétrica [35];
- Promover a redução do desperdício com falhas [35];
- Permitir a penetração de geração de energia intermitente [35];
- Promover serviços com análise de custo [35];
- Ser observável para permitir ser medida e visualizável [4];
- Ser controlável para permitir manipulação e otimização [4];
- Ser automatizada, o que permite adaptação e automanutenção [4];
- Ser totalmente integrada, ou seja, funcionar com sistemas existentes e incorporar diversas fontes de energia [4].

### 2.2.3. REQUISITOS POR APLICAÇÃO.

Cada requisito de comunicação é aplicado de forma diferenciada em cada camada de uma rede elétrica inteligente. Por exemplo, a largura de banda da tecnologia aplicada em dispositivos de *HEMS* pode ser menor do que a largura de banda da tecnologia utilizada nos pontos de coleta da *NAN*, os quais transmitem uma quantidade de dados muito maior do que apenas uma *NAN*. As Tabela 1, Tabela 2 e Tabela 3 apresentam dados adaptados de [37] com estas informações.

Tabela 1 – Requisitos técnicos para *HAN* [37].

Aplicação	Tamanho típico dos dados (Bytes)	Latência	Confiabilidade (%)
Automação residencial	10 – 100	Segundos	> 98
Automação predial	> 100	Segundos	> 98

Tabela 2 – Requisitos técnicos para *NAN* [37].

Aplicação	Tamanho típico dos dados (Bytes)	Latência	Confiabilidade (%)
Administração da rede	25	< 20 s	> 98
Atualização de firmwares	400k – 2000k	< 2 min – 7 dias	> 98
Automação da distribuição - <i>DA</i>	25 – 1000	< 4 s	> 99.5
Controle de armazenamento de energia dos clientes	25	< 5 s	> 99,5
Resposta da demanda	100	< 1 min	> 99.5
Envio de preços para PHEV	255	< 15 s	> 98
Falta e restauração da rede	25	< 20 s	> 98
Informações de conta para clientes	50 / 200	< 15 s	> 99

Tabela 2– Requisitos técnicos para NAN (Continuação).

Aplicação	Tamanho típico dos dados (Bytes)	Latência	Confiabilidade (%)
Leitura de medição em massa	MB	< 1 h	> 99.5
Leitura de medidor comercial/industrial agendada	1600 – 2400	< 2 h	> 98
Leitura de medidores - sob demanda	100	< 15 s	> 98
Leitura de medidores residenciais agendada	1600 – 2400	< 4 h	> 98
Precificação crítica de pico	100	< 1 min	> 98
Precificação em tempo real	100	< 1 min	> 98
Precificação por tempo de uso	100	< 1 min	> 98
Pré-pagamento do serviço de eletricidade	50 – 150	< 30 s	> 98
Programação/Configuração de dispositivos	25k–50k	< 5 min – 3 dias	> 98
Serviço de controle (ligar e desligar suprimentos)	25	< 1 min	> 98
Verificação de carga de PHEV	100	< 15 s	> 98



Tabela 3 – Requisitos técnicos para WAN [37].

Aplicação	Tamanho típico dos dados (Bytes)	Latência	Confiabilidade (%)
<b>Proteção</b>			
Ilhamento adaptativo	4 – 157	< 0.1 s	> 99,9
Controle de carga por subfrequencia	4 – 157	< 0.1 s	> 99,9
Controle de estabilidade de tensão	4 – 157	< 5 s	> 99,9
Controle de estabilidade de transiente	4 – 157	< 0.1 s	> 99,9
Controle de amortecimento de oscilação	4 – 157	< 0.1 s	> 99,9
<b>Monitoramento</b>			
Monitoramento de oscilação local	> 52	< 30 s	> 99,9
Monitoramento de oscilação em grande área	> 52	< 0.1 s	> 99,9
Monitoramento de estabilidade de tensão local	> 52	< 30 s	> 99,9
Monitoramento de estabilidade de tensão em área ampla	> 52	< 5 s	> 99,9
Estimativa de estado baseado em PMU	> 52	< 0.1 s	> 99,9
Estimativa de estado dinâmico	> 52	< 0.1 s	> 99,9
Estimativa de estado assistida por PMU	> 52	< 2 min	> 99,9

### 2.3.5G

O padrão de comunicação móvel 5G é uma tecnologia celular que traz ganhos de desempenho quando comparado à tecnologia 4G, como, por exemplo, taxa de dados 100 vezes maior, duração de bateria 10 vezes maior e latência 5 vezes menor [38].

A tecnologia 5G possui três categorias que foram definidas pelo setor de radiocomunicação da União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union Radiocommunication Sector - ITU-R*), sendo elas: Banda larga móvel aprimorada (*Enhanced Mobile Broadband - eMBB*), Comunicação Massiva do Tipo Máquina (*Massive machine-type communication – mMTC*) e Comunicações Ultra-confiáveis e de Baixa Latência (*Ultra-reliable and low-latency communications – URLLC*) [39].

Cada uma das categorias apresenta aplicações diferentes descritas a seguir:

- *eMBB* se aplica, por exemplo, a conectividade de banda larga, uso corporativo e realidade virtual aumentada [39];
- *mMTC* se aplica a alguns conceitos presentes no contexto de redes elétricas inteligentes, tais como *internet* das coisas, cidades inteligentes, monitoramento de energia, monitoramento remoto e casas inteligentes [39];
- *URLLC* também traz aplicações relacionadas a rede elétrica inteligente, tais como veículos autônomos e aplicações de redes elétricas inteligentes que demandem latências na casa de milissegundos [39].

A Figura 2-6 apresenta uma representação das aplicações associadas a redes elétricas inteligentes frente as três categorias de aplicação do 5G.

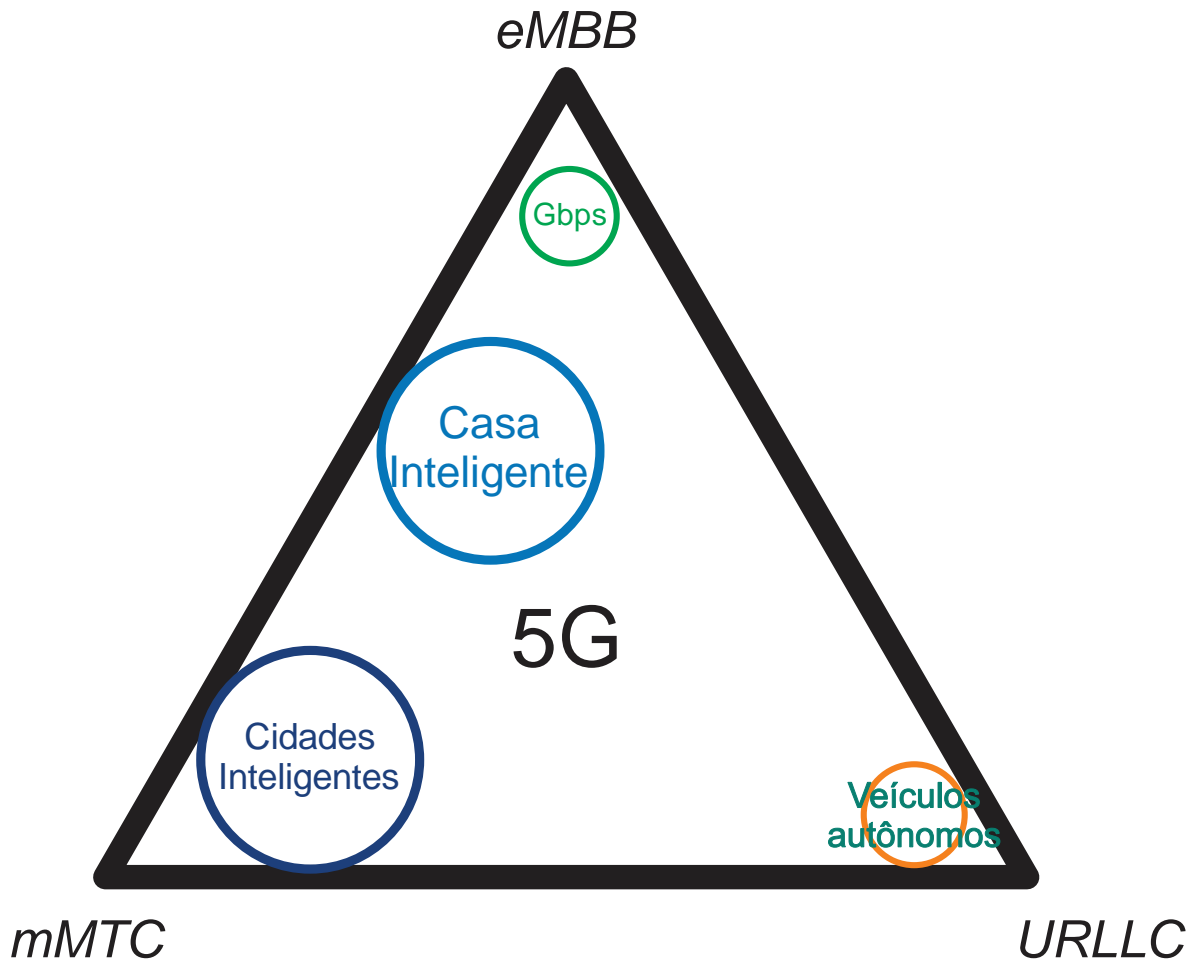


Figura 2-6 - 5G associado a redes elétricas inteligentes. Fonte: Adaptado de [39].

A documentação referente ao 5G foi apresentada inicialmente no *release* 15 do 3GPP, porém atualizações e correções foram feitas com o passar do tempo. O *release* 18 é última versão lançada até o momento de escrita deste dissertação [40].

Dentre as características documentadas, encontra-se o isolamento de cada camada de rede, o qual proporciona segurança e confiabilidade similar às redes dedicadas, tais como como fibra óptica [41]. O isolamento (ou fatia, em algumas traduções) de rede é uma alocação virtual de recursos de comunicação com ciclo de vida independente e requisitos de operação personalizáveis de acordo com diferentes níveis de rede. Múltiplas fatias da rede podem ser gerenciadas de forma unificada, o que permite a interoperabilidade entre si [42].

O fatiamento de rede do 5G também permite a criação de redes especiais sob demanda baseada em requisitos de projeto, tais como prioridade de pacotes, prioridades de fatias de rede, políticas de controle, mobilidade, latência, disponibilidade, confiabilidade, taxa de dados e controle de usuários [40].

A segurança é mais uma característica abordada no fatiamento de rede, visto que o sistema 5G deve permitir a remoção, inclusão ou mudança de equipamentos dos usuários entre fatias de rede baseado em assinaturas e políticas da operadora, as quais podem ser diferentes entre fatias de rede. Além disso, pode-se criar fatias de rede públicas e privadas [40].

Além da possibilidade de fatiamento de rede, a tecnologia de comunicação em 5G possui outras características para aplicações em uma rede inteligente:

- Latência inferior a 1 ms [43], característica que viabiliza o 5G em aplicações de proteção do sistema elétrico;
- Até 10Gbps de taxa de dados [42], que pode interessante em aplicações da *AMI* devido a concentração de dados;
- Cobertura de até 50 km a 100 Mbps, no 5G-Range [44] e cobertura de até 100 km a 1 Mbps em áreas com até 2 usuários/km<sup>2</sup> [40], a qual pode viabilizar medição remota em áreas rurais;
- Autenticação customizável por fatia de rede [45], o que pode ser usado na segurança e no controle do sistemas de comunicação das redes elétricas inteligentes;
- O uso de energia por bit pode ser 1000 vezes menor se comparada à tecnologia 4G, o que melhora a viabilidade técnica de dispositivos funcionarem com bateria [43].
- Operação em possíveis três faixas de frequência: acima de 6 GHz (para *eMBB*), entre 1 GHz e 6 GHz (para *mMTC* e *URLLC*) e a terceira faixa em torno de 700 MHz (para longa cobertura) [38];
- As redes 5G podem ser construídas usando redes de células pequenas englobando até 100 vezes mais localizações de antenas do que redes 3G ou 4G, o que viabiliza o aumento do número de dispositivos que seriam conectados à rede [43];
- As células pequenas podem ser instaladas em mobiliário urbano, tais como pontos de ônibus, luminárias, semáforos, entre outros. [39];
- O 5G possui alta mobilidade (até 500km/h), ou seja, pode ser utilizado em meios de transporte de alta velocidade de modo a viabilizar a integração

com cidades inteligentes[38];

- O 5G possui como premissa uma confiabilidade de pelo menos 99,99% para serviços de taxa de dados e latência reduzida [40].
- A tecnologia 5G também possui como premissa o fornecimento de localização com precisão de pelo menos 10 metros, ou seja, cria-se uma possibilidade do uso da tecnologia para monitoramento geográfico em rodovias, ferrovias e objetos voadores não tripulados [40].

## **2.4. VISÃO GERAL DE OUTRAS TECNOLOGIAS DE COMUNICAÇÃO**

Este Capítulo traz uma visão geral de outras tecnologias já utilizadas para comunicação em redes elétricas inteligentes.

### **2.4.1. TECNOLOGIAS CELULARES**

Com a chegada do 5G, é iminente a subutilização de tecnologias mais antigas, como 2G, 3G e 4G. Isto não acontecerá rapidamente, mesmo porque não existem tantos dispositivos compatíveis com 5G no Brasil. Além disso, segundo dados de dezembro de 2021 da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), cerca de 10,3% dos acessos a dados móveis ocorrem através da tecnologia 2G, 11,4% através 3G e 77,9% ocorrem através do 4G [46]. Sendo assim, aplicações de redes elétricas inteligentes que usem tecnologias móveis 3G ou 4G ainda podem ser consideradas.

A chegada do 5G pode viabilizar novas utilizações das redes de geração anteriores (2G, 3G e 4G), visto que, com uma menor quantidade de usuários, existe uma tendência para a melhora do desempenho do sistema comunicação. Este cenário pode criar novos modelos de negócios para as operadoras de telefonia, pois assim pode-se verificar condições para que a infraestrutura antiga continue operacional e lucrativa. Uma comparação entre as tecnologias 3G e 4G é apresentada na Tabela 4, a qual utiliza dados adaptados de [16], [37], [49] e [39].

Tabela 4 – Comparação entre 3G e 4G [16], [37] e [49].

	<b>3G</b>	<b>4G</b>
<b>Cobertura</b>	31 km	30 km
<b>Taxa de Dados</b>	Até 56 Mbps	Até 3,3 Gbps no modo <i>LTE</i> avançado
<b>Consumo energético</b>	0,5 - 0,6W	0,5 – 1 W
<b>Frequência</b>	800 MHz à 1900 MHz	700 MHz à 2500 MHz
<b>Segurança</b>	Segura	Mais segura
<b>Latência</b>	212 ms	60-98 ms

#### 2.4.2. WiMAX

A tecnologia *WiMAX*, que é descrita no padrão IEEE802.16, foi desenvolvida com o intuito de alcançar distâncias maiores, o que a faria uma tecnologia adequada para aplicações em *WAN*. No entanto, ela pode ser usada tanto para *NAN* e *WAN* [15]. Todavia, a tecnologia *WiMAX* traz diversos benefícios para as redes elétricas inteligentes, o que viabilizou seu uso em todos os níveis de comunicação, ou seja, *WiMAX* pode ser utilizada para leitura de medidores sem fio, tarifação em tempo real, detecção de falta de energia e demais monitoramentos [14].

Dentre as principais características da tecnologia *WiMAX* para redes elétricas inteligentes, observa-se a latência e largura de banda determinadas, além de alcance de 16 a 50 km, aproximadamente. A tecnologia *WiMAX* também possui controle de potência em malha fechada, qualidade de serviço (QoS) adequada aos requisitos funcionais e priorização de mensagens, função importantíssima para redes elétricas inteligentes, visto que os eventos presentes na rede elétrica podem ter prioridades diferenciadas [35]. Além disso, *WiMAX* pode trabalhar com protocolos de segurança e é escalável, característica que permite expansão da rede de comunicação [14].

Com uma taxa de dados de até 75 Mbps, a tecnologia *WiMAX* pode operar

em 2,5 GHz, 3,5GHz ou 5,8 GHz [48], com uma latência máxima de 100ms [14].

A tecnologia *WiMAX* possui um perfil operacional próprio para redes elétricas inteligentes, chamado *WiGRID*, o qual permite uma configuração otimizada através do ajuste de diversos parâmetros, tais como duração e tamanho dos quadros de comunicação, estratégias de agendamento e mapeamento de tráfego de dados [12].

### 2.4.3. NB-IoT

A comunicação via *NB-IoT* se diferencia dentre as tecnologias de rádio *LPWAN*, uma vez que foi desenvolvida para permitir uma ampla gama de comunicação entre dispositivos e serviços usando comunicação celular [49]. Com isto ela tem seu funcionamento baseado em funcionalidades da rede *LTE* já existentes [26]. Algumas simplificações foram realizadas para esse padrão, a fim de atender os dispositivos com menor processamento computacional e capacidade de armazenamento de energia.

A camada física *NB-IoT* foi concebida para caber em um subconjunto do padrão *LTE*, mas limita a largura de banda a uma única banda estreita de 200 kHz usada tanto para *Uplink*, quanto para *Downlink*. A comunicação via *NB-IoT* é capaz de fornecer boa cobertura e usa a mesma arquitetura de rede da *LTE* com algumas otimizações para aplicativos IoT. As bandas sugeridas para a tecnologia são 700 MHz, 800 MHz e 900 MHz [50]. A Tabela 5 apresenta mais dados técnicos da tecnologia NB-IoT, adaptados de [51] e [26].

Tabela 5 – Características da tecnologia NB-IoT.

<b>Taxa de dados</b>	100 kbps	<b>Dispositivos por ponto de acesso</b>	Aprox. 55000
<b>Largura de banda efetiva</b>	3 kHz	<b>Sensibilidade de recepção</b>	-137 dBm
<b>Banda de frequência</b>	Licenciada	<b>Padrão</b>	LTE
<b>Latência</b>	1,6s a 10s	<b>Cobertura</b>	Até 15km

#### 2.4.4. LoRa E LoRaWAN

A tecnologia *Long Range (LoRa)* se inclui dentro da classe das *LPWAN*, que foram desenvolvidas para atender aplicações em que se deseja conectividade sem fio de médio e longo alcance, e ao mesmo tempo com consumo de energia limitado. Esta tecnologia é patenteada pela Semtech Corporation [52]. Ele utiliza uma modulação de espectro espalhado não licenciado na banda de sub-GHz para permitir cobertura de longo alcance, além de suportar a quantidade de dispositivos definida em seus requisitos técnicos [50]. A frequência utilizada pela tecnologia *LoRa* é bastante diversificada, sendo que nos Estados Unidos é usada entre 902 e 928 MHz, na Europa entre 863 MHz e 870 MHz, mas pode, também, operar em 433 MHz e 169 MHz [53], com taxa de transmissão entre 0,3 kbps a 37,5 kbps. Seu alcance pode atingir até 15km em área rural e até 5km em área urbana [52]. A rede comporta até 1.000.000 de nós [50], sendo que cada gateway pode trabalhar com aproximadamente 10.000 nós [52].

A tecnologia *LoRa* utiliza o protocolo LoRaWAN. Neste padrão, a estrutura básica de uma rede *LoRa* geralmente é composta de um servidor de rede e aplicações, um concentrador ou gateway, e os dispositivos finais dispostos em configuração estrela, conforme mostra a Figura 2-7, adaptada de [52].

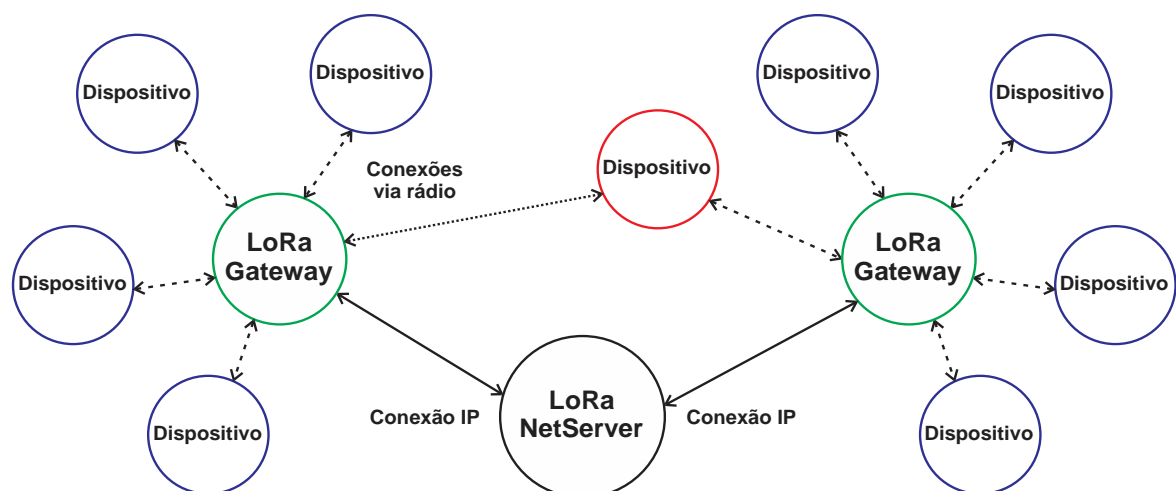


Figura 2-7 – Topologia da tecnologia *LoRa*. Fonte: Adaptado de [52].

Quando são considerados aspectos de transmissão com essa tecnologia, há dois fluxos de transmissão de dados. O primeiro é o *Uplink*, quando o nó final transmite dados para o *gateway* e o segundo é o *Downlink*, momento em que o *gateway*



transmite dados para o nó final. Nesse tipo de rede, a comunicação não se dá diretamente entre os nós finais [50].

O padrão LoRaWAN estabelece que os dispositivos devem ser ativados para que possam se comunicar com o servidor [50]. Além disso, o padrão os classifica de acordo com seu método de operação entre três classes, que são:

- Classe A: Classe em que dispositivos ficam maior parte do tempo no modo de economia de energia. Para cada momento de *uplink*, são esperados duas transmissões de *downlink* com latência aproximada de 1s. Todos os dispositivos *LoRa* precisam ter a classe A selecionada por padrão [26];
- Classe B: Apresenta o mesmo comportamento da Classe A, porém os momentos de *uplink* e *downlink* são agendados [26];
- Classe C: Classe usada para aplicações em tempo real, visto que a comunicação é constante e permite o tráfego máximo de dados sem latência significativa [26]. Este modo apresenta um maior consumo de energia, portanto é recomendado quando os dispositivos são alimentados pela rede elétrica [52].

#### 2.4.5. SIGFOX

A tecnologia Sigfox possui algumas características semelhantes à tecnologia *LoRa*, também sendo considerado uma tecnologia *LPWAN*. Um dos pontos em comum das duas tecnologias é o uso de espectro não licenciado para operação [52]. Isto permite que ambas as tecnologias possam ser utilizadas na troca de informações em longas distâncias dispensando o uso de redes celulares, pois possuem estrutura própria.

Com isso, os dados de medição adquiridos por meio de sensores chegam até servidores em nuvem por meio de um *gateway*. Esses servidores descobrem os dados coletados e exploram os resultados em seus serviços [51].

Os sistemas sem fio Sigfox enviam pacotes contendo 12 bytes, se utilizando de taxas muito lentas, cerca de 100 bps, e apresenta latências entre 1 e 2s [49]. Isto permite aumentar o alcance da transmissão, possibilitando comunicações em longas distâncias (até 50km). O protocolo também permite pouco mais de 140 mensagens

por dia, aproximadamente uma mensagem a cada 10 minutos. Além disso, não há reconhecimento de transmissão, nem comunicação bidirecional, e com isso é possível se perceber algumas limitações em termos de confiabilidade, segurança e taxa de transferência [50].

#### 2.4.6. INGENU – RPMA

A Ingenu é uma tecnologia de comunicação proprietária da empresa *On Ramp Wireless*, a qual é descrita no padrão IEEE802.15.4k [52]. Esta tecnologia é chamada também de *Random Phase Multiple Access* (RPMA), pois assim foi chamada em sua patente, ocorrida em 2010 [54].

A Ingenu se encaixa dentro das tecnologias *LPWAN* e tem seu alcance superior ao Sigfox e ao *LoRa*. Cada ponto de acesso Ingenu pode cobrir mais de 300 mi<sup>2</sup> (777km<sup>2</sup>) [54]. A tecnologia pode cobrir cerca de 15km de raio [53]. Sua latência não ultrapassa os 10 segundos [55].

A Ingenu permite taxas de 624 kbps para *uplink* e 156 kbps para *downlink*. Ela é considerada uma tecnologia de IoT para espectro não-licenciado devido a sua escalabilidade e seus requisitos funcionais. [56].

A Ingenu opera em 2,4GHz, assim como diversas outras tecnologias, ou seja, interferências podem ocorrer visto que esta faixa do espectro é muito utilizada. Como solução deste problema, mais nós de redes são necessários, aumentando então o custo de operação, manutenção e implantação [57].

Cada pacote de dados utilizando a tecnologia Ingenu pode ter de 6 bytes até 10k bytes. As topologias possíveis são estrela e árvore.

#### 2.4.7. Wi-Fi

O *Wi-Fi* é uma tecnologia descrita no padrão IEEE802.11 que vem sendo amplamente usada para acesso à internet. No contexto de redes elétrica inteligentes, o *Wi-Fi* pode ser usado nas *HANs* para monitoramento do consumo energético [58], nas *NANs*, para integração de dados de diversas residências e nas *WAN*, através de redes *Wi-Fi* com cobertura municipal para agregar diversos tipos de dispositivos [59].

Dentre as principais características do *Wi-Fi*, pode-se citar:

- Taxa de dados podem atingir a taxa de Gbps [58]. O padrão IEEE802.11 ad pode, teoricamente, atingir taxas de 6,76 Gbps [60].
- Curto alcance, podendo atingir até 100 metros [58];
- Suporta operação em 2,4GHz e 5GHz [59];
- Funcionamento em bateria limitado a horas [61];
- Suporta *Internet Protocol v6* (IPv6) [61];
- Tecnologia muito presente em novos dispositivos eletrônicos[61];
- Latência pode ser menor do que 3 ms [55];

A tecnologia *Wi-Fi* apresenta uma versatilidade quanto às topologias. Encontra-se disponível no mercado aparelhos como roteadores, repetidores e conversores que permitem a expansão da tecnologia e a intercambialidade entre outros meios de comunicação, sejam eles físicos ou sem fio. Além disso, versões mais recentes da tecnologia passaram a suportar topologia *mesh*, conforme mostra Figura 2-8.

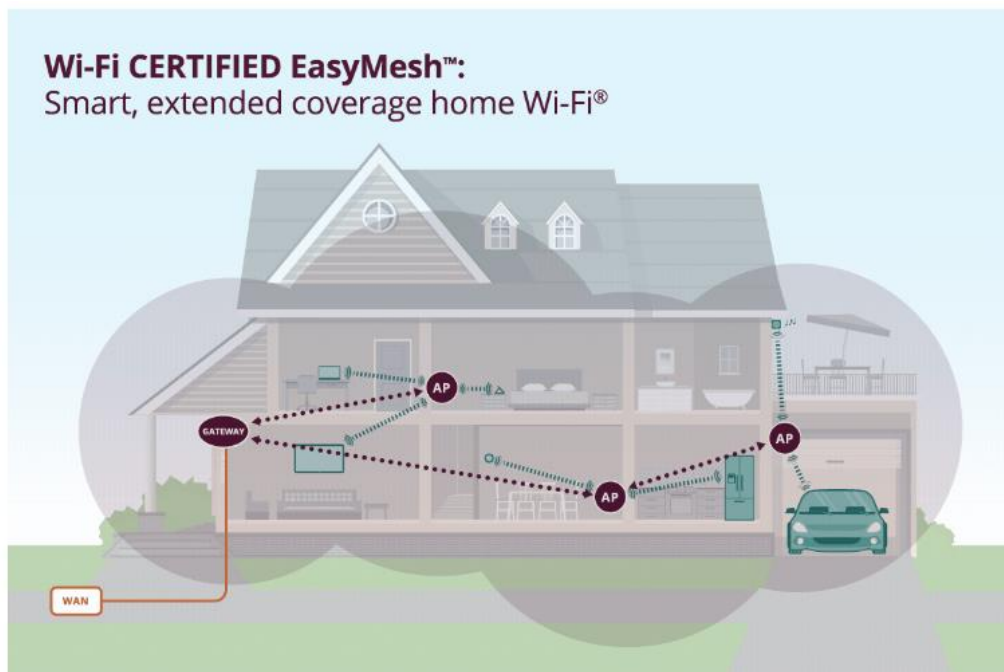


Figura 2-8 – *Wi-Fi Mesh*. Fonte: [62]

### 2.4.8. BLUETOOTH

O *Bluetooth* é uma tecnologia de comunicação sem fio estabelecida pelo padrão IEEE802.15.1 [63]. Ela opera em 2.4GHz e é indicada para comunicações ponto a ponto.

A tecnologia *Bluetooth* possui classes de potência padronizadas, conforme mostrado na Tabela 6, que foi adaptada de [63]. Seu alcance pode atingir no máximo 100 metros para dispositivos classe 1 [47] com uma latência inferior a 100 ms[55]. A Tabela 6 apresenta a diferença de potência em cada classe do *Bluetooth*.

Tabela 6 – Características técnicas do *Bluetooth* [63].

Classe de potência	Potência máxima de saída	Potência nominal de saída	Potência mínima de saída
1	100 mW (20dBm)	N/A	1 mW (0 dBm)
2	2.5 mW (4 dBm)	1 mW (0 dBm)	0.25mW (-6dBm)
3	1 mW (0 dBm)	N/A	N/A

A tecnologia *Bluetooth* possui taxa de dados máxima de 1Mbps e permite operar em duas topologias diferentes: *Piconet* e *Scatternet*. A topologia *Piconet* consiste em um dispositivo mestre que se comunica com até sete dispositivos escravos, totalizando oito nós. A topologia *Scatternet* é uma associação de *Piconets* [14]. Estas topologias podem ser vistas na Figura 2-9.

Em uma comparação apresentada em [47], o *Bluetooth* é considerado um meio de comunicação mais seguro do que o *Zigbee* e o *LoRaWAN*.

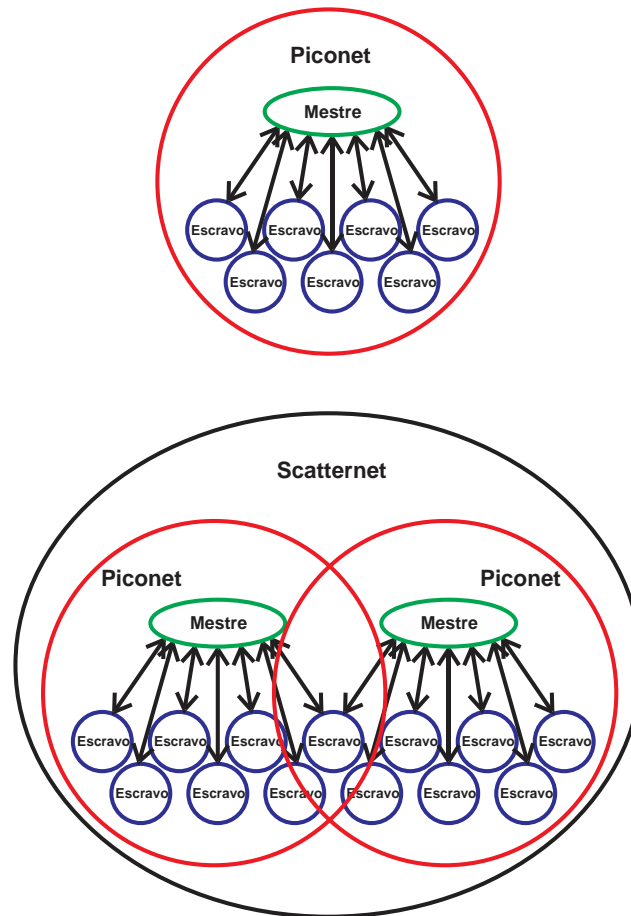


Figura 2-9 – Piconet e Scatternet. Fonte: O próprio autor

#### 2.4.9. ZIGBEE

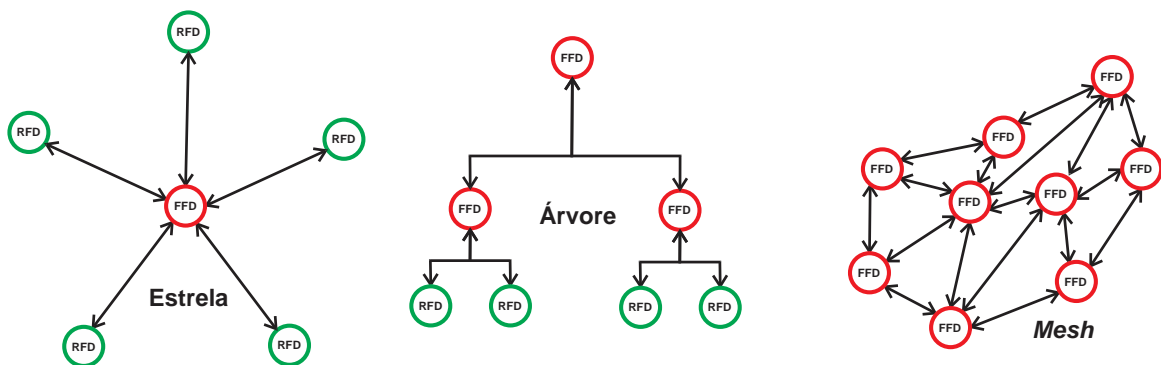
O *Zigbee* é uma tecnologia de comunicação sem fio estabelecida pelo padrão IEEE 802.15.4 [64]. Ela pode operar em três frequências diferentes, sendo 2,4 GHz, 915MHz e 868MHz, com taxas de dados por canal de 250 kbps, 40 kbps e 20 kbps, respectivamente [14].

A tecnologia *Zigbee* estabelece dois tipos de dispositivos que podem operar em três funções diferentes. A Tabela 7 explica esta característica com dados adaptados de [14].

Tabela 7 – Tipos de dispositivos *Zigbee* [14].

Dispositivo com funções completas (FFD)	Coordenador	Responsável por iniciar a sessão e cuidar de sua segurança [14]
	Roteador	Responsável por roteamento e interconexão dos dispositivos [65]
Dispositivo com funções reduzidas (RFD)	Dispositivo Final	Comunica apenas com FFDs [65]

A tecnologia *Zigbee* pode atingir distância de comunicação ponto-a-ponto entre 10 e 75m [14], com um latência em torno de 16 ms [55], porém tem a capacidade de operar em topologia estrela, árvore e *mesh* [66], conforme mostrado na Figura 2-10.

Figura 2-10 – Topologias do *Zigbee*. Fonte: O próprio autor

A *ZigBee Alliance*, uma associação de empresas que oferece soluções sem fio estabelece diversos padrões dentro do ambiente *Zigbee* que atendem requisitos distintos. São eles, *ZigBee Building Automation*, *ZigBee Remote Control*, *ZigBee Smart Energy*, *Smart Energy Profile 2*, *ZigBee Healthcare*, *ZigBee Home Automation*, *ZigBee Input Device*, *ZigBee Light Link*, *ZigBee Telecom Services* e *ZigBee Network Devices*. O padrão *Smart Energy Profile 2 (SEP2)*, por exemplo, oferece funcionalidade de protocolo IP que viabiliza sua utilização em medidores inteligentes, sensores e outros dispositivos inteligentes. Esta característica aumenta a interoperabilidade e compatibilidade, que são requisitos da rede elétrica inteligente [14].

#### 2.4.10. 6LoWPAN

O *6LoWPAN* é uma tecnologia de comunicação que combina o padrão *IEEE802.15.4*, também usado pelo *Zigbee*, com o protocolo *IPv6*. O padrão que descreve o *6LoWPAN* é o IETF RFC 4944 [61].

A tecnologia *6LoWPAN* pode operar em três frequências diferentes, com três taxas de transmissões, conforme mostra a Tabela 8.

Tabela 8 – Frequências e taxas de transmissão do *6LoWPAN*[61].

Frequência de transmissão	Taxa de transmissão
2,4 GHz	250 kbps
915 MHz	40 kbps
868 MHz	20 kbps

O *6LoWPAN* é uma tecnologia com alcance máximo de 200 metros, mas que opera em topologia *mesh*, o que é cria um suporte para maior escalabilidade. Ela é ideal para dispositivos que possuem consumo elétrico definidos e que possuem comunicação sob o protocolo IP, tais como sensores e controladores [14].

#### 2.4.11. DASH7

O DASH7 é uma tecnologia de comunicação aberta e sem fins lucrativos, pensada para sensores e atuadores que operam em 433 MHz, 868 MHz ou 915 MHz.[61]. Suas principais características são o consumo de energia limitado, que garante duração estendida de baterias, especialmente para nós em movimento, taxa de dados de até 167 kbps [67] e ampla cobertura de até 2km [26].

Os dispositivos de uma rede DASH7 são os dispositivos finais, subcontroladores e o *gateway*, os quais têm as seguintes características de comunicação [26]:

- Pacotes em rajada: Ocorrem transmissões esporádicas;
- Pacotes leves: Pacotes limitados em 256 bytes sincronizados;
- Comunicação assíncrona: A comunicação ocorre no formato pergunta/resposta, sem período de sincronização;

- Invisibilidade: Não é necessária a descoberta dos dispositivos. A comunicação ocorre com *gateways* pré-aprovados;
- Transitividade: Os dispositivos podem se locomover entre diferentes *gateways*;
- A latência de uma comunicação em DASH7 pode atingir até 305 ms [26].
- Sua cobertura pode atingir até 2km

#### 2.4.12. GOES

Os satélites geoestacionários operam sobre orientação da *National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA*. Seu uso é gratuito para fins de utilidade pública ou governamentais [68]. Todos os transmissores utilizados para transmissão de dados ao *GOES* devem ser certificados e registrados, visto que cada unidade recebe um ID por parte da *NOAA* [69].

Sua aplicação está em monitoramentos remotos realizados pelas PCDs em conformidade com o *GOES Data Collection System – GOES DCS* e a resolução conjunta ANA e ANEEL . Embora seu uso seja gratuito, o sistema tem características técnicas bastante restritas [32], [69]:

- Sua taxa de transmissão pode ser selecionada entre 300 ou 1200 bps;
- Para transmissão 300 bps, existem 532 canais com frequências entre 401,701 MHz e 402,09925 MHz, ou seja, incrementos de 750 Hz;
- Para transmissão 1200 bps, os incrementos são de 2250 Hz;
- É permitida uma variação de  $\pm 125$  Hz;
- O tempo de transmissão máximo é de 110s, porém a *NOAA* regula um tempo máximo para cada estação meteorológica ou PCD. Em casos práticos verificados no Brasil, este tempo é de 10s, o que resulta em, no máximo, 3k bytes enviados a cada ciclo de transmissão;
- O transmissor de satélite pode operar em modo aleatório ou por transmissões agendadas. Em casos práticos verificados no Brasil, as transmissões ocorrem 1x por hora;
- O transmissor precisa de duas antenas, sendo uma para transmissão



---

e outra para sincronismo de horário via *Global Positioning Signal (GPS)*;

- A potência efetivamente irradiada (EIRP) deve estar entre 37 e 41 dBm para transmissões em 300bps e entre 43 e 47 dBm para transmissões em 1200bps. A NOAA é quem determina a taxa de transmissão para cada transmissor;
- A informação é unidirecional, ou seja, não é possível enviar comandos as PCDs via satélite;
- Todos os dados são públicos e podem ser consultados no sistema do *GOES DCS*.

Informações adicionais referente ao uso do *GOES* podem ser encontradas em [70].

### 3. ANÁLISE DE UTILIZAÇÃO DO 5G

Este Capítulo traz uma análise da utilização da tecnologia 5G em cada uma das aplicações citadas anteriormente. Para isso, diversas comparações de parâmetros técnicos são apresentadas, além de ponderações sobre os casos de uso e eventuais questões não-técnicas que possam impedir ou inviabilizar o uso do 5G.

#### 3.1. 5G PARA INFRAESTRUTURA DE MEDIÇÃO AVANÇADA

A *AMI* atua como camada integradora de comunicação da rede elétrica inteligente, ou seja, os dados das demais aplicações trafegam pela rede da *AMI*. Sendo assim, a *AMI* tem como maior requisito a interoperabilidade de diversas tecnologias, sejam elas cabeadas ou sem fio[14].

O 5G é descrito como uma tecnologia que permite interoperabilidade com gerações anteriores de rede móvel, de acordo com o *release 18* do 3GPP [40], característica que vai de encontro com o cenário da *AMI*, a qual apresenta uma diversidade de tecnologias de comunicação. Interconectar todas elas e, então, transmitir as informações através do 5G é viável, porém haverá a necessidade do desenvolvimento de *gateways*, caso os dispositivos não se comuniquem diretamente em 5G.

Outra necessidade da *AMI* é a comunicação em forma de *backbone* [15], conforme mostra a Figura 2-2, apresentada no Capítulo anterior. Em *backbones*, existe uma tendência para que o volume de dados seja elevado, porque ali trafegam informações de diversos dispositivos e redes diferentes. Neste cenário, o 5G se mostra muito adequado, porque sua taxa de dados é a maior dentre as tecnologias sem fio aplicáveis a rede elétrica inteligente. Mais uma vez, é necessário citar que, para que existam *backbones* em 5G, *gateways* e coletores de dados deverão ser construídos utilizando esta tecnologia.

O 5G ainda apresenta a característica do seu alcance [40], que pode ser viável para a integração de *WAN*, *NAN* e *HAN* diretamente com os sistemas das companhias de energia elétrica.

Vale ressaltar no entanto que o 5G não atinge *eMBB*, *mMTC* e *URLLC* simultaneamente, portanto é necessário o entendimento dos requisitos de cada projeto de modo que a tecnologia 5G atenda aplicação [39].

Por fim, o Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), através do Módulo 5 – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura regulamenta a medição remota de energia elétrica [71]. Isto cria a possibilidade de se utilizar o 5G na comunicação com medidores inteligentes de energia, os quais são as interfaces com outras aplicações que serão citadas posteriormente.

### 3.2. 5G PARA SISTEMA DE GERENCIAMENTO DE ENERGIA

O *EMS* é um sistema diretamente relacionado ao gerenciamento de energia. Sendo assim, sua base tecnológica é a medição e controle do consumo de energia elétrica.

Analisando-se as subdivisões do *EMS*, verifica-se que *BEMS*, *DEMS* e *HEMS* estão diretamente associadas a dispositivos fisicamente próximos entre si instalados dentro de uma edificação, ou seja, tecnologias como o *Bluetooth*, *Zigbee* e *6LoWPAN* se mostram ideais para que a comunicação seja estabelecida [14]. Estas tecnologias possuem alcances que possibilitam que sistemas de segurança físicos possam ser implementados, tais como controle de acesso de pessoas as áreas monitoradas. Eventualmente, pode ser necessário um *gateway* convertendo as tecnologias citadas para acesso à internet e a computação em nuvem.

O *Wi-Fi* é outra tecnologia utilizada em *BEMS*, *DEMS* e *HEMS*, visto que ele permite acesso direto a Local Area Network (*LAN*), realiza o monitoramento e controle remoto e é utilizado nos diversos tipos de edificação.

O *EMS* também engloba a *CEMS*, que necessita de tecnologias de comunicação com cobertura maior, visto que são sistemas de gerenciamento de energia de uma comunidade.

A tecnologia 5G engloba, também, o *EMS* pela sua presença nos medidores inteligentes que interligam o *EMS* à *AMI*, visto que a tecnologia celular já é utilizada neste tipo de aplicação [14].

Outra vertente possível do 5G aplicado no *EMS* é a sua utilização em substituição da internet banda larga por fibra ótica ou cabos, porém o modelo de negócio de redes móveis pode inviabilizar esta substituição em muitos casos devido às limitações de consumo de dados.

### 3.3. 5G PARA AUTOMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

A DA é uma parte muito importante aplicado à rede elétrica inteligente. Esta aplicação permite que o sistema de distribuição pode ser monitorado e gerenciado pelas empresas de energia. Esta gestão é feita através de Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA) que recebem informações de diversos equipamentos instalados na rede de distribuição[14], conforme ilustra a Figura 3-1.

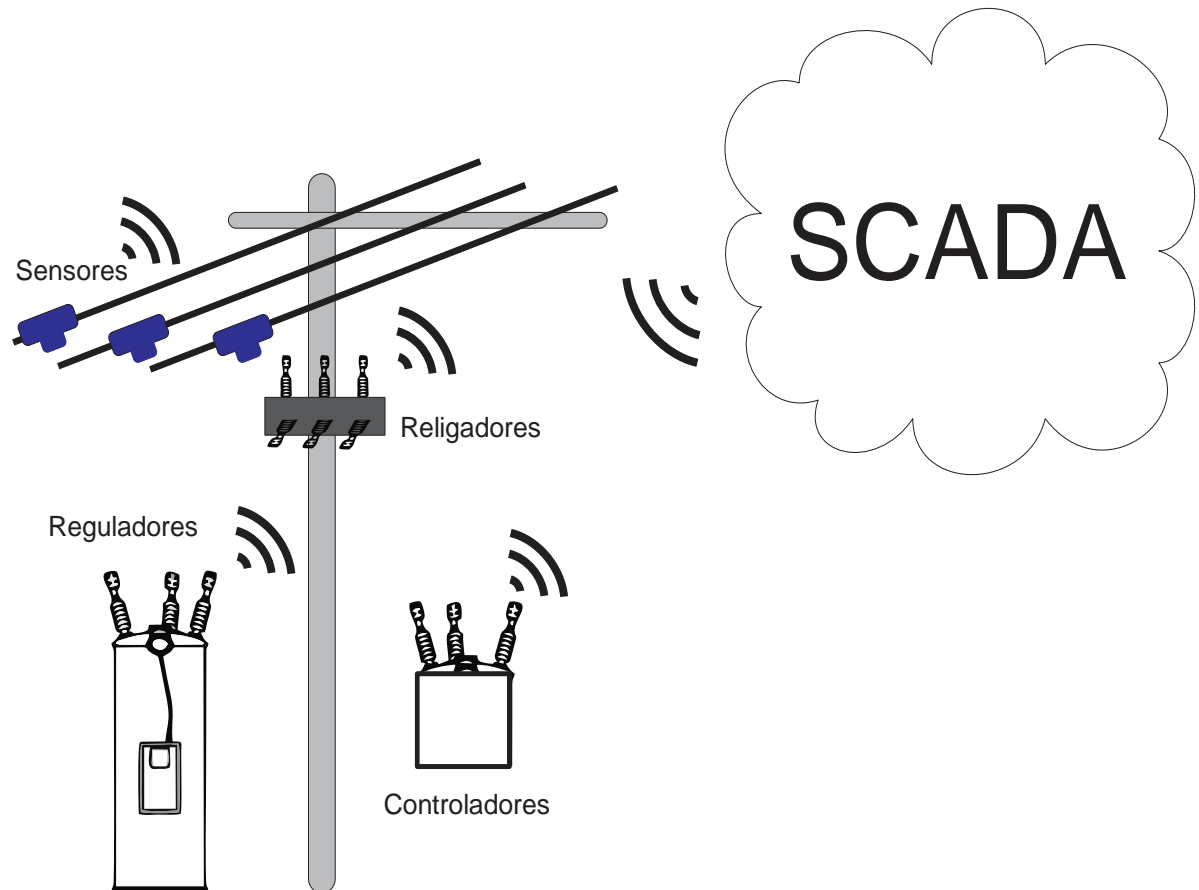


Figura 3-1 – Topologia de DA. Fonte: O próprio autor

Diversas tecnologias diferentes podem ser utilizadas para que esse sistema funcione, conforme citado no Capítulo 2, porém o 5G traz alguns diferenciais significativos neste cenário:

- O 5G é uma tecnologia sem fio com maior alcance se comparado às tecnologias *Bluetooth*, *Zigbee* e *Wi-Fi*, o que viabiliza a instalação de dispositivos de monitoramento e controle em pontos mais afastados dos centros urbanos;

- O 5G possui consumo energético por bit menor que o 4G [43]. Isto pode ser aplicável à aparelhos alimentados por baterias, mesmo aqueles dispositivos cujas baterias são carregadas por indução eletromagnética da própria linha de energia, como por exemplo, o SEL-FLT [72] e o EATON *GridAdvisor Series II* [73];
- As aplicações de *DA* aceitam latências de até 4 segundos conforme mostrado na Tabela 2, ou seja, embora a tecnologia 5G possibilite latências na casa de milissegundos, esta característica não é um diferencial para se definir sobre a aplicação do 5G em *DA*.
- Dispositivos de *DA* podem enviar mensagens não solicitadas, como por exemplo aquelas que utilizam o protocolo DNP3 [74]. O 5G se mostra adequado nesta situação devido a sua confiabilidade superior a 99,99% [40].
- O uso do 5G diretamente nos sensores e atuadores dispensa o uso de gateways para conversão de tecnologias para a rede IP, como é o caso de tecnologias como *Bluetooth*, *Zigbee* e *LoRa*, por exemplo.
  - O 5G pode atingir taxa de dados na faixa de Gbps, o que viabiliza monitoramentos em escalas maiores. Isto o torna viável para gateways e coletores de dados remotos, pois eles podem ter volumes significativos de informação a serem trocadas com o SCADA. Além disso, o 5G é uma tecnologia que viabiliza atualização de firmware em dispositivos que estejam em campo, visto que a quantidade de dados nessa situação é bastante elevada, conforme mostrado na Tabela 2.

### 3.4. 5G PARA RESPOSTA DA DEMANDA

A *DR* visa fazer com que as curvas de demanda sejam menos variáveis, ou seja, que o consumo se aproxime de sua média. Para isto, é necessário um sistema de medição de demanda capaz de obter dados em cada região, bem como garantir a bidirecionalidade de dados entre consumidores e concessionárias de energia [15], a qual viabilize a gestão de horários de consumo e então haja o controle da demanda energética.

Nesse cenário, sistemas de comunicação são muito importantes, portanto o 5G

aplicado nos medidores inteligentes se mostra uma tecnologia que viabiliza a DR em áreas mais afastadas dos centros urbanos.

Além dos medidores inteligentes, pode-se incluir controladores de sistemas de ar condicionado, bombas, aquecedores, veículos elétricos [37], os quais podem usar controladores cuja comunicação é baseada em rede celular.

### **3.5. 5G EM VEÍCULOS ELÉTRICOS**

O contexto de EVs engloba, basicamente, dois elementos: O carregador e o veículo. Sendo assim, o estudo de viabilidade do 5G neste cenário é mais restrito, pois as aplicações são bastante específicas.

Pode-se citar que o monitoramento do carregador é um dos principais pontos. Sabendo da autonomia limitada e do tempo de recarga dos EVs, a disponibilidade das informações em nuvem sobre os carregadores veiculares é essencial para o planejamento de rotas, ou seja, estado de carga e posicionamento são variáveis importantes [14]. A tecnologia 5G é aplicável, então, para viabilizar este tipo de informação em pontos mais afastados dos centros urbanos e no controle de posicionamento de veículos e carregadores [40], devido às suas características funcionais.

Do lado do veículo, diversas montadoras estão fabricando veículos com conexão à internet inclusa e diversas funcionalidades de conectividade.

O V2G é um outro caso que demandaria conexão para um funcionamento mais eficiente. A utilização do veículo como fonte geradora precisa ser medida e monitorada pela concessionária de energia [24].

Com base nessas premissas, a tecnologia 5G deve ser considerado em novas implementações de EVs, devido às suas características funcionais que pode ser essencial para que os EVs se integrem com as cidades inteligentes.

### **3.6. 5G PARA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

O monitoramento e a análise dos dados de usinas fotovoltaicas é necessário para que se evite perdas na geração e, conseqüentemente, se tenha mais retorno sobre o investimento [28]. Para isto, é importante que as usinas estejam conectadas.

As informações das usinas fotovoltaicas devem ser acessadas tanto pelos proprietários quanto pelas concessionárias, em caso de sistemas conectados à rede de distribuição (*on-grid*). Para que esta premissa se cumpra, é importante que os inversores e os medidores estejam conectados.

De acordo com o PRODIST, através do seu módulo 3 [75], as concessionárias precisam utilizar medidos com leitura bidirecional, devido à necessidade de conhecimento de qual energia foi injetada na rede. Sendo assim, a medição remota, que é estabelecida pelo módulo 5 do PRODIST [71], pode utilizar a rede 5G.

Por outro lado, o gestor da usina precisa de informações em tempo real para tratar algum eventual problema. No caso de usinas em área urbana, o *Wi-Fi* se mostra como tecnologia principal para transmissão dos dados, visto que ela é muito presente nos inversores disponíveis no mercado Brasileiro. Para usinas em área rural, se o sistema for *on-grid*, o 5G possibilita a medição remota em áreas afastadas e o monitoramento do funcionamento da usina. Em caso de usinas desconectadas do sistema de distribuição (*off-grid*), o seu monitoramento é importante para manutenções e aumento da eficiência da geração.

### **3.7. 5G PARA WIDE-AREA SITUATIONAL AWARENESS**

A WASA é o segmento da rede elétrica inteligente responsável por tomadas de decisões de forma autônoma no sistema elétrico, ou seja, a WASA age sob o conceito de *Self-Healing* [15].

Para isso, é importante que os sistemas de telecomunicações da WASA funcionem de maneira propícia de acordo com os requisitos funcionais de operação. Também é notado que a WASA necessita de tecnologias de comunicação de longo alcance, sendo que em algumas aplicações utilizam o satélite como meio de comunicação.

A tecnologia *WiMAX* também é aplicada em WASA, porém esta tecnologia demanda infraestrutura específica, enquanto que o 5G utiliza a estrutura das operadoras de telefonia [31].

Além disso, algumas aplicações de proteção em alta tensão tem como requisitos de projeto uma latência menor do que 5 milissegundos e confiabilidade maior do que 99,9999% [40].

Com base nas análises feitas, o 5G se mostra como uma tecnologia promissora para WASA, tanto em substituição natural das tecnologias celulares anteriores quando para novas implementações devido as suas características técnicas.

### 3.8. 5G PARA MONITORAMENTO DE RECURSO HÍDRICO

Em decorrência da resolução conjunta nº 3 de agosto de 2010 [8], o Brasil apresenta monitoramento de suas bacias hidrográficas. Sendo assim, a maior parte dos rios abastecedores de usinas hidrelétricas têm seus níveis e vazões monitorados, bem como o nível das barragens. Os volumes de chuva nas suas cabeceiras também são monitorados. A Figura 3-2 apresenta a localização das PCDs por todo território nacional. Estes dados são obtidos pelo sistema HIDROWEB, o qual permite acesso a dados das PCDs cujos dados são enviados para a ANA [76].



Figura 3-2 – Distribuição de PCDs pelo Brasil. Fonte: [76]

Para que o monitoramento seja eficiente, as PCDs são muitas vezes instaladas em locais afastados dos centros urbanos, nas quais eventualmente sequer existe a cobertura de telefonia móvel. Nestes casos, as PCDs podem utilizar a tecnologia



GOES, conforme estabelecido em suas especificações técnicas [32].

Buscando o melhor entendimento deste cenário, é necessário comparar a localização das PCDs com a cobertura celular. Para isso, uma ilustração do estado brasileiro do Pará é apresentada. Este estado possui 2,83% de sua área com cobertura celular [77].

A Figura 3-3 apresenta a sobreposição dos dados extraídos dos sistemas da ANATEL e do HIDROWEB. Ela mostra as localidades com cobertura celular em dezembro de 2021, através de marcações em verde, no estado do Pará [78], Bem como as localidades onde existem uma PCD instalada, através das circunferências, referente a fevereiro de 2022.



Figura 3-3 – Comparação entre cobertura celular e localização de PCDs no Pará. Fonte: O próprio autor

Por meio da análise da Figura 3-3, é possível verificar a presença de PCDs em localidades em que não há a cobertura celular. Nestas situações a tecnologia GOES é utilizada.

Os cenários apresentados ilustram algumas situações em que o 5G poderá ser usado, sendo que em localidades muito afastadas, a tecnologia GOES ainda será mais eficaz.

A substituição de uma tecnologia por outras mais modernas é um processo natural. Sendo assim, em breve as PCDs terão suas tecnologias atualizadas e então o 5G poderá fazer parte deste contexto.

Outra questão importante é o custo. Através do Portal da Transparência [79], do governo brasileiro, foi possível consultar o valor pago nas últimas licitações de PCDs, sendo que a versão com comunicação via satélite foi comprada por R\$46210,67 e a versão com comunicação via dados móveis foi comprada por R\$4780,00, ou seja, o sistema via *GOES* tem a aquisição quase 10 vezes mais cara.

Além disso, o sistema *GOES* é limitado quanto a quantidade de dados enviadas. São poucos bytes a cada transmissão, que ocorre uma vez por hora. As especificações das PCDs construídas com tecnologia celular citam transmissões a cada 15 minutos [32].

Outro fator importante a ser levado em consideração é que as PCDs funcionam por energia solar. Segundo as especificações técnicas das PCDs [32]:

“As PCDs devem ser alimentadas por sistema de captação de energia solar composto de:

- Painel solar;
- Regulador de carga com potência de, no mínimo, 20 Watts (mesmo que o painel solar seja de potência inferior) e;
- Bateria do tipo selada, livre de manutenção e gelatinosa.”

Sendo assim, a tecnologia 5G pode ser aplicada nas PCDs, pois seu consumo energético é reduzido frente as demais tecnologias [38], melhorando a viabilidade técnica de uso de tecnologia celular em sistemas *off-grid*, como apresentado nas PCDs.

### **3.9.5G PARA RECURSOS DE ENERGIA DISTRIBUÍDA.**

Os *DERs* vem como a parte da redes elétricas inteligentes responsáveis pela integração em nível de comunicação das diversas fontes geradoras no sistema elétrico. Ele traz informações em tempo real e permite uma gestão mais adequada do sistema elétrico [15].

A informação dessas unidades geradoras é transmitida através de *IEDs*, os

---

quais já utilizam a tecnologia celular ou *Wi-Fi* como tecnologia sem fio, ou seja, o 5G naturalmente irá substituir as tecnologias por celular utilizadas atualmente.

Outra aplicação dentro do *DER* é o Ilhamento. Conforme mostrado na Tabela 3, esta aplicação demanda requisitos mais restritos, ou seja, o 5G possui potencial aplicação em *DER*.

### **3.10. COMPILAÇÃO DAS ANÁLISES**

Esta seção visa consolidar as análises feitas no Capítulo 3.

A Tabela 9 apresenta informações de latência, cobertura, frequência de operação e taxa de dados das tecnologias exploradas ao longo deste trabalho. Além disso, também foi realizado um cruzamento de informações entre as tecnologias e aplicações, de acordo com a literatura, onde o “x” representa que a tecnologia não foi citada na literatura como aplicada a determinada aplicação e o símbolo “√” demonstra que houve citações com relação a sua aplicação.

Na linha referente a tecnologia 5G, o símbolo “√” indica onde a tecnologia 5G pode ser utilizada de acordo com a análise feita no Capítulo 3.

Tabela 9 - Compilação de tecnologias, características técnicas e aplicação.

Tecnologia	Requisitos de comunicação				Aplicada em:								
	Latência	Cobertura	Frequência de operação	Taxa de dados	AMI	EMS	DA	DR	EV	GD	WASA	MRH	DER
<b>5G</b>	<1 ms	Até 100 km	>6 GHz Entre 1 GHz e 6 GHz 700 MHz	Até 10 Gbps	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>4G</b>	60-98 ms	Até 30 km	700 MHz - 2500 MHz	Até 3,3 Gbps	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>3G</b>	212 ms	Até 31 km	800 MHz - 1900 MHz	Até 56 Mbps	✓	x	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
<b>WiMAX</b>	<100 ms	Até 50 km	5,8 GHz 3,5 GHz 2,5 GHz	Até 75Mbps	✓	x	x	x	x	x	✓	x	x
<b>NB-IoT</b>	1,6 s a 10 s	Até 15 km	900 MHz 800 MHz 700 MHz	Até 100 kbps	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	x
<b>LoRa</b>	<1 s	Até 15 km	Não licenciada Sub-GHz	Até 37,5 kbps	✓	x	✓	x	✓	x	✓	x	x
<b>Sigfox</b>	<2 s	Até 50 km	Não licenciada Sub-GHz	100 bps	✓	x	✓	x	x	x	✓	x	x
<b>Ingenu</b>	<10 s	Até 15 km	2,4 GHz	624 kbps	✓	x	✓	x	x	x	✓	x	x
<b>Wi-Fi</b>	< 3ms	Até 100 m	5,8 GHz 2,4 GHz	Até 6,76 Gbps	✓	✓	x	✓	x	✓	x	x	✓
<b>Bluetooth</b>	<100 ms	Até 100 m	2,4 GHz	Até 1 Mbps	✓	✓	x	x	x	✓	x	x	x
<b>Zigbee</b>	<16 ms	Até 75 m	2,4 GHz 915 MHz 868 MHz	250 kbps 40 kbps 20 kbps	✓	✓	x	✓	x	✓	x	x	x
<b>6LoWPAN</b>	<16 ms	Até 200 m	2,4 GHz 915 MHz 868 MHz	250 kbps 40 kbps 20 kbps	✓	x	x	✓	x	x	x	x	x
<b>DASH7</b>	< 305 ms	Até 2 km	915 MHz 868 MHz 433 MHz	Até 167kbps	x	x	x	x	✓	x	x	x	x
<b>GOES</b>	10s	Continental	402 MHz	300 bps	x	x	x	x	x	x	x	✓	x

**Legenda:** AMI - Infraestrutura de Medição Avançada, EMS - Sistema de Monitoramento de Energia, DA – Automação da Distribuição, DR – Resposta da Demanda, EV – Veículos Elétricos, GD – Geração Distribuída, WASA – *Wide-Area Situational Awareness*, MRH – Monitoramento de Recurso Hídrico e DER – Recursos de Energia Distribuída.

## 4. CENÁRIO DO 5G APLICADO EM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES

Para que se verifique a disposição da comunidade ao redor da utilização do 5G, aplicado em rede elétrica inteligente, e se valide a possibilidade da aplicação da tecnologia, fez-se necessário o estudo da evolução tecnologia envolvida nas redes elétricas inteligentes, bem como o cenário tecnológico atual.

Inicialmente, foi feita uma investigação de aplicações do 5G em redes elétricas inteligentes que já se encontram em operação, porém a tecnologia não é amplamente difundida no Brasil e no exterior. Sendo assim, uma métrica relevante sobre o avanço do 5G é a análise de produções científicas envolvendo o tema.

Foi desenvolvida uma análise das tecnologias sem fio citadas nas produções científicas disponibilizadas na base de dados *IEEE Xplore* a partir do ano de 2010. As produções científicas foram agrupadas nos períodos 2010 a 2013, 2014 a 2016, 2017 a 2019 e 2020 a 2022. Para o levantamento das tecnologias, a sentença de busca utilizada foi “*Smart Grid Wireless*”, o qual se mostrou bastante eficiente para a obtenção de citação de tecnologias sem fio. Toda a análise foi feita com o auxílio do *software VOSviewer* [80].

Através do diagrama gerado pelo *software*, é possível analisar o volume de aparição dos termos, o qual é representado graficamente pelo tamanho das circunferências, ou seja, quanto maior a circunferência atrelada ao termo citado, mais produções bibliográficas distintas o citaram. O mesmo ocorre com o tamanho da fonte do termo citado.

Além disso, o diagrama gerado pelo *VOSviewer* apresenta o relacionamento das tecnologias de acordo com as publicações analisadas e, também, um agrupamento em *clusters*, que são representados por cores distintas. Cada *cluster* segmenta as tecnologias automaticamente, de acordo com os critérios da inteligência artificial do *software VOSviewer*. Sendo assim, alguns agrupamentos irrelevantes podem aparecer, os quais serão detalhados nas seções seguintes.

É importante citar que, para esta análise, foi considerado que cada termo deveria ser citado pelo menos em 4 produções científicas distintas, caso contrário, não irá aparecer no diagrama.

#### 4.1. ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2010 E 2013

No período compreendido entre 2010 e 2013, foram analisadas 948 produções científicas, que correspondem a totalidade disponível no *IEEE Xplore*. As tecnologias citadas e o relacionamento entre elas são mostrados na Figura 4-1 e a compilação da ocorrência das citações é apresentada na

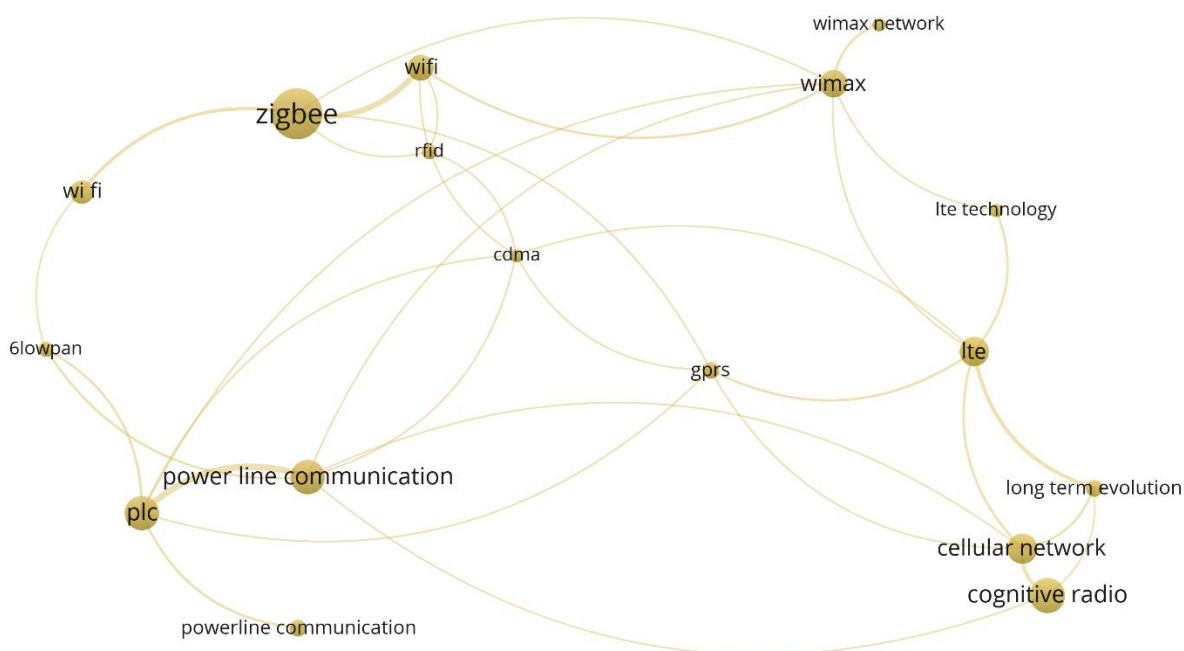


Figura 4-1 – Tecnologias citadas entre 2010 e 2013. Fonte: O próprio autor

Tabela 10 – Compilação das tecnologias citadas de 2010 a 2013

Tecnologia	% de citações
<i>PLC</i>	22%
<i>Zigbee</i>	22%
Rádio cognitivo	11%
<i>LTE (4G)</i>	11%
<i>Wi-Fi</i>	11%
Rede celular	8%
<i>WiMAX</i>	8%
<i>6LoWPAN</i>	2%
<i>CDMA</i>	2%
<i>GPRS</i>	2%
<i>RFID</i>	2%

A Figura 4-1 permite verificar que, no período compreendido entre 2010 e 2013, o *Zigbee* foi a mais citada, porém algumas tecnologias foram apresentadas e relacionadas mais de uma vez devido a forma como foram escritas nas produções científicas. Sendo assim, a Tabela 10 apresenta, de forma compilada, a porcentagem de publicações em que as tecnologias tiveram pelo menos uma citação. Pode-se verificar que naquele período, houve citações de tecnologias celulares. Naquele período, a tecnologia celular mais citada foi a *LTE*.

Algumas outras tecnologias apresentadas no decorrer deste trabalho também foram citadas, como o *Bluetooth*, *Wi-Fi* e o *6LoWPAN*. Observa-se também a presença do *PLC*, que é uma tecnologia cabeada, mas que apareceu no diagrama devido a quantidade de produções científicas que a relacionaram com tecnologias sem fio no contexto de redes elétricas inteligentes.

#### 4.2. ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2014 E 2016

No período compreendido entre 2014 e 2016, foram analisadas 964 produções científicas, que correspondem a totalidade disponível no *IEEE Xplore*. As tecnologias citadas e o relacionamento entre elas são mostrados na Figura 4-2.

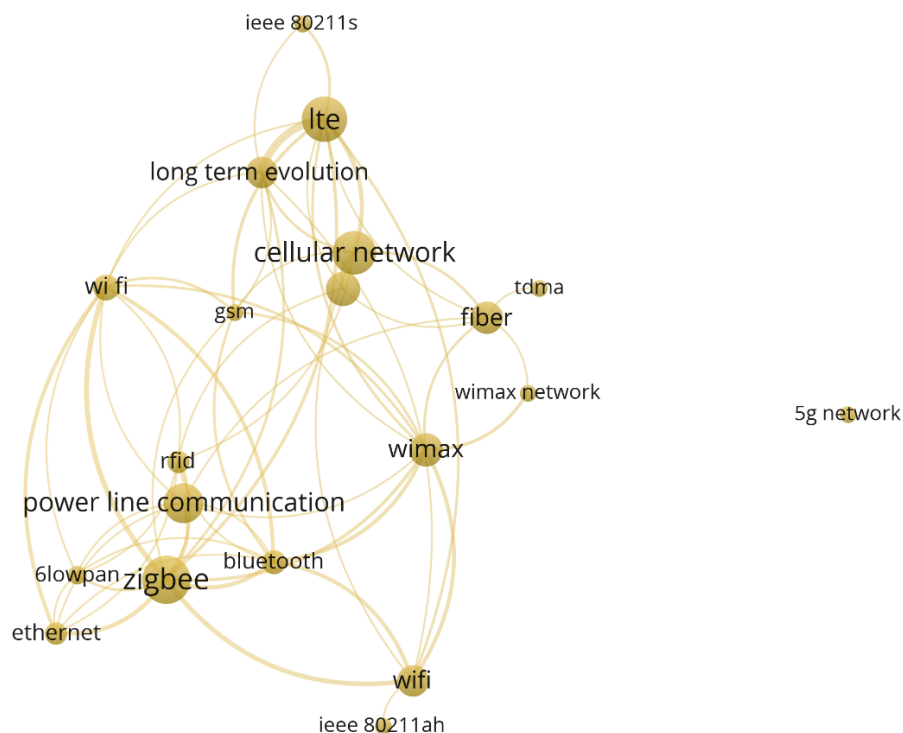


Figura 4-2 – Tecnologias citadas entre 2014 e 2016. Fonte: O próprio autor

Tabela 11 - Compilação das tecnologias citadas de 2014 a 2016

<b>Tecnologia</b>	<b>% de citações</b>
<i>LTE (4G)</i>	17%
<i>Wi-Fi</i>	13%
<i>Zigbee</i>	13%
Rede celular	11%
<i>PLC</i>	9%
Rádio cognitivo	7%
<i>WiMAX</i>	7%
Fibra óptica	6%
5g	3%
<i>Bluetooth</i>	3%
Ethernet	3%
RFID	3%
6LoWPAN	2%
GSM	2%
TDMA	2%

A Figura 4-2 mostra que as tecnologias citações no período de 2014 a 2016 são basicamente as mesmas do período anterior, porém o 5G teve sua primeira aparição associada a rede elétrica inteligente . Pode-se perceber, através da compilação feita na Tabela 11, que o *LTE* se tornou a tecnologia mais citada. Através desta análise, pode-se constatar que a tecnologia celular chamou mais atenção dos pesquisadores de redes elétricas inteligentes quando comparado ao período anterior.

#### **4.3. ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2017 E 2019**

No período compreendido entre 2017 e 2019, foram analisadas 1026 produções científicas, que correspondem a totalidade disponível no *IEEE Xplore*. As tecnologias citadas e o relacionamento entre elas são mostrados na Figura 4-3. *WiMAX*



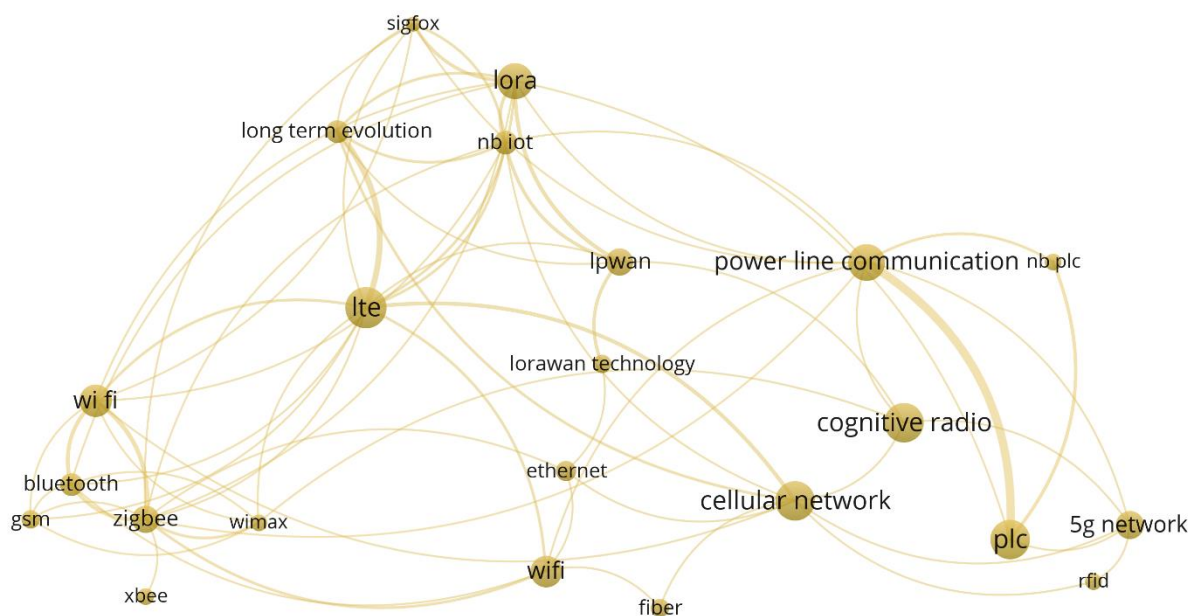


Figura 4-3 – Tecnologias citadas entre 2017 e 2019. Fonte: O próprio autor

Tabela 12 - Compilação das tecnologias citadas de 2017 a 2019

Tecnologia	% de citações
<i>PLC</i>	16%
<i>LTE (4G)</i>	12%
<i>Wi-fi</i>	11%
Rede celular	9%
Rádio cognitivo	9%
<i>LoRa</i>	9%
5g	5%
<i>LPWAN</i>	4%
<i>Zigbee</i>	4%
<i>Bluetooth</i>	3%
<i>NB-IoT</i>	3%
Ethernet	2%
Fibra óptica	2%
<i>GSM</i>	2%
<i>NB-PLC</i>	2%
<i>RFID</i>	2%
<i>WiMAX</i>	2%
<i>XBEE</i>	2%
<i>Sigfox</i>	1%

Através da Figura 4-3, pode-se constatar a aparição de novas tecnologias no contexto de redes elétricas inteligentes, tais como NB-IoT, *LoRa* e *Sigfox*. É possível verificar também, através dos dados compilados apresentados na Tabela 12, que o

número de citações da tecnologia 5G cresceu proporcionalmente ao *LTE*. No entanto o *LTE* foi a tecnologia sem fio mais citada no período. Isto demonstra uma predisposição da comunidade científica em analisar o uso do 5G em redes elétricas inteligentes.

Além disso, pode-se constatar que a tecnologia celular é muito importante para redes elétricas inteligentes, visto que “*cellular network*” é uma das sentenças com mais destaque nos três períodos já analisados.

#### 4.4. ANÁLISE DAS TECNOLOGIAS CITADAS ENTRE 2020 E 2022

No período compreendido entre 2020 e 2022, foram analisadas 823 produções científicas, que correspondiam a totalidade disponível no *IEEE Xplore* na data em que os dados foram coletados (27 de março de 2022). As tecnologias citadas e o relacionamento entre elas são mostrados na Figura 4-4. *WiMAX*

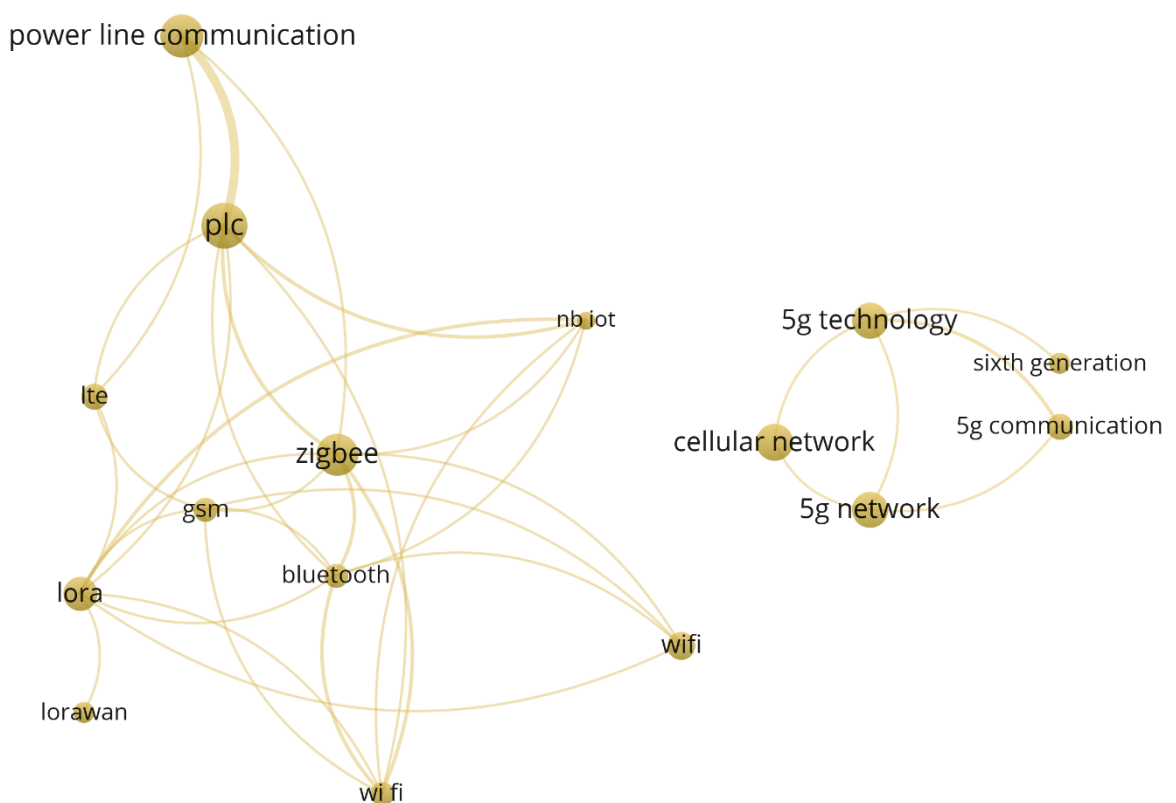


Figura 4-4 – Tecnologias citadas entre 2020 e 2022. Fonte: O próprio autor

Tabela 13 - Compilação das tecnologias citadas de 2020 a 27 de março de 2022

<b>Tecnologia</b>	<b>% de citações</b>
<i>PLC</i>	25%
5G	20%
<i>Zigbee</i>	11%
<i>LoRa</i>	10%
Rede celular	9%
<i>Wi-Fi</i>	9%
<i>Bluetooth</i>	4%
<i>GSM</i>	4%
<i>LTE (4G)</i>	4%
6G	3%
<i>NB-IoT</i>	2%

A Figura 4-4 apresenta claramente o avanço do 5G no contexto de redes elétricas inteligentes. Pode-se perceber, através da Tabela 13, que o 5G já possui mais citações que o *LTE* e que o termo “*cellular network*”, o qual foi um dos termos mais citados nos períodos anteriores.

Pode-se verificar, também, que não houve uma quantidade suficiente de trabalhos que interligassem o 5G com demais tecnologias para que o *software VOSviewer* criasse as linhas de conexão, porém existiram trabalhos nesse sentido, visto que alguns deles são referências desta dissertação. De qualquer forma, o gráfico deve ser analisado de forma macro, ou seja, pode-se afirmar que o 5G é uma tendência forte para aplicações em redes elétricas inteligentes.

#### **4.5. ANÁLISE DO RELACIONAMENTO DO 5G COM REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES**

Foi executada uma análise em 146 publicações na base *IEEE Xplore* através do termo “*5G Smart Grid*”, referentes aos anos de 2021 e 2022, até a data de 27 de março de 2022. O resultado gerado pelo *software VOSviewer* pode ser visto na Figura 4-5.



## 5. CONCLUSÕES GERAIS

Esse capítulo tem por objetivo realizar a conclusão e considerações finais do trabalho.

### 5.1. CONTRIBUIÇÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise feita sobre o cenário do 5G na comunidade científica mostra uma tendência de aumento na quantidade de pesquisas sobre esta tecnologia no contexto de redes elétricas inteligentes. Assim, este trabalho contribui para o desenvolvimento de soluções de redes elétricas inteligentes, visto que compilou informações técnicas sobre diversas tecnologias aplicadas, bem como a existência da viabilidade técnica para utilização do 5G em aplicações de redes elétricas inteligentes.

Esta viabilidade técnica foi comprovada através da comparação dos requisitos necessários para cada tipo de aplicação com as características técnicas do 5G, tais como as possibilidades de se ter, mesmo que de forma não conjunta, uma cobertura de dezenas de km, latência na casa de milissegundos e taxa de dados na faixa de Gbps. Além disso, foi demonstrado que o 5G pode ser utilizado em aplicações de mobilidade e localização, as quais são aplicáveis no contexto de cidades inteligentes.

Toda a análise feita mostrou que a utilização do 5G é coerente na maioria das aplicações citadas: Na Infraestrutura de medição avançada, mostra-se como uma tecnologia adequada principalmente em operações na *WAN* e na *NAN*; Na automação da distribuição, o 5G atende todos os requisitos discutidos; Para resposta da demanda, o 5G traz a bidirecionalidade de dados e viabiliza controle e medição de dispositivos mais afastados; Para eletrificação veicular, o 5G permite monitoramento de pontos de recarga, viabiliza ainda mais a conexão dos carros com a internet e cria novas possibilidades para *V2G*; Na geração distribuída, o 5G facilita o monitoramento e a manutenção das usinas fotovoltaicas. Para *wide-area situational awareness*, o 5G atende requisitos de alcance e latência e será naturalmente utilizado, visto que tecnologias celulares já fazem parte desta aplicação. No monitoramento hídrico, o 5G pode otimizar os sistemas *off-grid* das PCDs e aumentar a área de cobertura, porém não impede a existência de sistemas via satélite, principalmente na região no norte do Brasil. Para recursos de energia distribuída, o 5G vem como tecnologia promissora para uso em *IEDs*. A exceção está com as aplicações nas

quais as tecnologias de curto alcance se mostram mais adequadas, como é o caso do sistema de gerenciamento de energia, principalmente quando aplicado a casas, prédios e *data centers*.

Também foi verificado que a tecnologia celular é uma propulsora das redes elétricas inteligentes, ou seja, é natural que ocorra a evolução de diversos dispositivos de rede, os quais utilizam atualmente 2G, 3G ou *LTE*.

## 5.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho foi desenvolvido em um momento em que a utilização do 5G não havia se iniciado no Brasil. Sendo assim, existirá a necessidade de uma reavaliação do conteúdo apresentado, quando o 5G estiver difundido no contexto das redes elétricas inteligentes. Isso é necessário porque, geralmente, as características técnicas das tecnologias de comunicação não são totalmente atingidas durante a sua aplicação prática. Desta forma, é importante que mais ensaios práticos com as tecnologias de comunicação sejam feitos para que se tenha uma análise de utilização cada vez mais refinada.

O avanço tecnológico nas telecomunicações é muito rápido, sendo assim, diversas novas tecnologias de comunicação podem ficar disponíveis nos próximos anos, sejam elas públicas ou proprietárias, ou seja, é natural que estudos tecnológicos baseados em comparações no setor de telecomunicações necessitem de atualizações.

Uma das tecnologias em estudo é o 6G, a qual vem sendo discutida no contexto de redes elétricas inteligentes, assim como se pôde perceber na análise feita na Seção 4.4, situação similar a que ocorreu na primeira aparição do 5G associado à rede elétrica inteligente, apresentado na Seção 4.2.

Um complemento a este trabalho seria realizar uma investigação do cenário *de internet* das coisas no Brasil em conjunto com uma análise prática das tecnologias, a qual poderia apresentar resultados de medições reais de parâmetros de comunicação para as tecnologias citadas, o que permitiria uma comparação com os dados teóricos.

Outra sugestão é a criação de uma aplicação na *Internet* que permita a seleção de uma tecnologia de comunicação baseada nos requisitos de projeto. De forma

complementar, a mesma aplicação poderia disponibilizar um guia com soluções nas quais cada tecnologia é aplicável, bem como uma lista de prestadores de serviço e fornecedores por localidade.

**REFERÊNCIAS**

- [1] T. F. Costa, I. F. S. dos Santos, G. L. Tiago Filho, R. M. Barros, e R. T. Miranda, “Optimum hydropower potential study on nine Brazilian drainage basins using a numerical algorithm”, *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 23, n° 2, p. 1729–1758, 2021, doi: 10.1007/s10668-020-00648-7.
- [2] G. G. Dranka e P. Ferreira, “Towards a smart grid power system in Brazil: Challenges and opportunities”, *Energy Policy*, vol. 136, n° October 2019, 2020, doi: 10.1016/j.enpol.2019.111033.
- [3] A. Helseth, *Scheduling Toolchains in Hydro-Dominated Systems - Evolution, Current Status and Future Challenges*, n° August. 2020.
- [4] A. B. M. S. Ali, *Smart Grids Opportunities, Developments, and Trends*, vol. 6, n° June. 2014.
- [5] U.S. Department of Energy, “Smart Grid System Report 2018: Report to Congress”, n° November, p. 1–93, 2018, [Online]. Available at: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/02/f59/Smart Grid System Report November 2018\\_1.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/02/f59/Smart%20Grid%20System%20Report%20November%202018_1.pdf).
- [6] E. Ancillotti, R. Bruno, e M. Conti, “The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges”, *Comput. Commun.*, vol. 36, n° 17–18, p. 1665–1697, 2013, doi: 10.1016/j.comcom.2013.09.004.
- [7] N. S. Nafi, K. Ahmed, M. A. Gregory, e M. Datta, “A survey of smart grid architectures, applications, benefits and standardization”, *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 76, n° June, p. 23–36, 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2016.10.003.
- [8] N. J. H. Moreira e V. A. Guillo, *RESOLUÇÃO CONJUNTA Nº 3, DE 10 DE AGOSTO DE 2010*. 2010.
- [9] V. C. Gungor *et al.*, “A Survey on smart grid potential applications and communication requirements”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 9, n° 1, p. 28–42, 2013, doi: 10.1109/TII.2012.2218253.
- [10] V. C. Güngör *et al.*, “Smart grid technologies: Communication technologies and standards”, *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 7, n° 4, p. 529–539, 2011, doi: 10.1109/TII.2011.2166794.
- [11] W. B. Rodrigues, E. H. Teixeira, A. B. Lugli, J. F. da S. Neto, e B. D. Bonatto,



- “5g utilization analysis for smart grid applications compared to wimax and lpwan technologies ”, *ICIC International* © 2022 ISSN 2185-2766, vol. 13, nº 4, p. 355–362, 2022.
- [12] F. Aalamifar e L. Lampe, “Optimized WiMAX Profile Configuration for Smart Grid Communications”, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, nº 6, p. 2723–2732, 2017, doi: 10.1109/TSG.2016.2536145.
- [13] N. S. Nafi, K. Ahmed, M. A. Gregory, e M. Datta, “A survey of smart grid architectures, applications, benefits and standardization”, *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 76. Academic Press, p. 23–36, dez. 01, 2016, doi: 10.1016/j.jnca.2016.10.003.
- [14] A. Mahmood, N. Javaid, e S. Razzaq, “A review of wireless communications for smart grid”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 41, p. 248–260, 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.036.
- [15] E. U. Ogbodo, D. Dorrell, e A. M. Abu-Mahfouz, “Cognitive Radio Based Sensor Network in Smart Grid: Architectures, Applications and Communication Technologies”, *IEEE Access*, vol. 5, nº September, p. 19084–19098, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2749415.
- [16] S. K. Rathor e D. Saxena, “Energy management system for smart grid: An overview and key issues”, *Int. J. Energy Res.*, vol. 44, nº 6, p. 4067–4109, 2020, doi: 10.1002/er.4883.
- [17] Y. Nozaki, T. Tominaga, N. Iwasaki, e A. Takeuchi, “A technical approach to achieve smart grid advantages using energy management systems”, *2011 Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. WCSP 2011*, 2011, doi: 10.1109/WCSP.2011.6096961.
- [18] T. Miyamoto, S. Kitamura, K. Naito, K. Mori, e Y. Izui, “Distributed day-ahead scheduling of community energy management system group considering uncertain market prices using stochastic optimization”, *IEEJ Trans. Electr. Electron. Eng.*, vol. 15, nº 3, p. 401–408, mar. 2020, doi: 10.1002/tee.23068.
- [19] R. Missaoui, H. Joumaa, S. Ploix, e S. Bacha, “Managing energy Smart Homes according to energy prices: Analysis of a Building Energy Management System”, *Energy Build.*, vol. 71, p. 155–167, mar. 2014, doi:

- 10.1016/j.enbuild.2013.12.018.
- [20] H. Hui, Y. Ding, Q. Shi, F. Li, Y. Song, e J. Yan, “5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential”, *Appl. Energy*, vol. 257, nº October 2019, p. 113972, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113972.
- [21] J. Liu, S. Wang, Q. Yang, H. Li, F. Deng, e W. Zhao, “Feasibility study of power demand response for 5G base station”, *Proc. 2021 IEEE Int. Conf. Power Electron. Comput. Appl. ICPECA 2021*, p. 1038–1041, 2021, doi: 10.1109/ICPECA51329.2021.9362670.
- [22] ONS, “curva de carga horária”, 2022. [http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva\\_carga\\_horaria.aspx](http://www.ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/curva_carga_horaria.aspx) (acessado mar. 01, 2022).
- [23] A. Roy, H. Kim, N. Saxena, e R. R. Kandoori, “LTE multicast communication for demand response in smart grids”, *2014 IEEE Int. Conf. Adv. Networks Telecommun. Syst. ANTS 2014*, nº DI, p. 3–8, 2014, doi: 10.1109/ANTS.2014.7057282.
- [24] P. B. and Y. H. Z. LI, M. CHOWDHURY, “OPTIMIZING THE PERFORMANCE OF VEHICLE-TO-GRID (V2G) ENABLED BATTERY ELECTRIC VEHICLES THROUGH A SMART CHARGE SCHEDULING MODEL”, *Int. J. ...*, vol. 16, nº 5, p. 827–837, 2015, doi: 10.1007/s12239-015-0085-3.
- [25] S. Carcangiu, A. Fanni, e A. Montisci, “Optimization of a power line communication system to manage electric vehicle charging stations in a smart grid”, *Energies*, vol. 12, nº 9, p. 1–13, 2019, doi: 10.3390/en12091767.
- [26] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue, e J. C. Prévotet, “Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs Standards and Supported Mobility”, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 21, nº 2, p. 1561–1581, 2019, doi: 10.1109/COMST.2018.2877382.
- [27] ONS, “O sistema em números”, 2019. <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-sistema-em-numeros>.
- [28] S. Shapsough, M. Takrouri, R. Dhaouadi, e I. A. Zualkernan, “Using IoT and smart monitoring devices to optimize the efficiency of large-scale distributed

- solar farms”, *Wirel. Networks*, vol. 27, nº 6, p. 4313–4329, 2021, doi: 10.1007/s11276-018-01918-z.
- [29] J. Medina-garcía, A. D. Martín, J. M. Cano, J. A. Gómez-galán, e A. Hermoso, “Efficient wireless monitoring and control of a grid-connected photovoltaic system”, *Appl. Sci.*, vol. 11, nº 5, p. 1–21, 2021, doi: 10.3390/app11052287.
- [30] S. Aragon-Aviles, A. Trivedi, e S. S. Williamson, “Smart power electronics-based solutions to interface solar-photovoltaics (pv), smart grid, and electrified transportation: State-of-the-art and future prospects”, *Appl. Sci.*, vol. 10, nº 14, 2020, doi: 10.3390/app10144988.
- [31] L. Tightiz e H. Yang, “A comprehensive review on IoT protocols’ features in smart grid communication”, *Energies*, vol. 13, nº 11, 2020, doi: 10.3390/en13112762.
- [32] Agência Nacional de Águas, “ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS PLATAFORMAS DE COLETA DE DADOS (PCDs)”, 2011. [https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/EspecificacoesTecnicas\\_PlataformasdeColetasdeDados.pdf](https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/EspecificacoesTecnicas_PlataformasdeColetasdeDados.pdf) (acessado out. 11, 2021).
- [33] Agência Nacional de Águas, “ORIENTAÇÕES PARA ENVIO DOS DADOS HIDROLÓGICOS EM TEMPO REAL DAS ESTAÇÕES TELEMÉTRICAS”, 2015. <https://arquivos.ana.gov.br/infohidrologicas/cadastro/OrientacoesParaEnvioDosDadosHidrologicosEmTempoRealDasEstacoes....pdf> (acessado out. 11, 2021).
- [34] ANEEL, *RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº 482, DE 17 DE ABRIL DE 2012*. Brasil.
- [35] M. Daoud e X. Fernando, “On the Communication Requirements for the Smart Grid”, *Energy Power Eng.*, vol. 03, nº 01, p. 53–60, 2011, doi: 10.4236/epe.2011.31008.
- [36] I. Jawhar, N. Mohamed, e J. Al-Jaroodi, “Networking architectures and protocols for smart city systems”, *J. Internet Serv. Appl.*, vol. 9, nº 1, 2018, doi: 10.1186/s13174-018-0097-0.
- [37] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, e S. Rahman, “Communication network

- 
- requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN”, *Comput. Networks*, vol. 67, p. 74–88, 2014, doi: 10.1016/j.comnet.2014.03.029.
- [38] R. M. Borges, “Analog Radio over Fiber Solutions for Multi-band 5G Systems Analog Radio over Fiber Solutions for Multi-band 5G Systems”, Universidade Federal de Itajubá, 2020.
- [39] ITU, *Setting the scene for 5G: Opportunities & Challenges*, n° July. 2018.
- [40] 3GPP, “3gpp ts 22.261 V18.6.1 (2022-06)”, vol. 1, n° Release 18, 2022.
- [41] “Smart Grid Powered by 5G SA-based Network Slicing”, *SGCC, China Telecom and Huawei*, p. 14, 2020.
- [42] S. Meng, Z. Wang, M. Tang, S. Wu, e X. Li, “Integration Application of 5G and Smart Grid”, *2019 11th Int. Conf. Wirel. Commun. Signal Process. WCSP 2019*, 2019, doi: 10.1109/WCSP.2019.8927874.
- [43] S. K. Rao e R. Prasad, “Impact of 5G Technologies on Smart City Implementation”, *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 100, n° 1, p. 145–159, 2018, doi: 10.1007/s11277-018-5618-4.
- [44] L. L. Mendes *et al.*, “Enhanced Remote Areas Communications: The Missing Scenario for 5G and beyond 5G Networks”, *IEEE Access*, vol. 8, p. 219859–219880, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3042437.
- [45] D. N. D. Tripathi e D. J. H. Reed, “5G Evolution : On the Path to 6G White Paper”, p. 1–40, 2020, [Online]. Available at: [https://www.rohde-schwarz.com/lt/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/overview/white-paper-5g-evolution-on-the-path-to-6g\\_253033.html](https://www.rohde-schwarz.com/lt/solutions/test-and-measurement/wireless-communication/overview/white-paper-5g-evolution-on-the-path-to-6g_253033.html).
- [46] ANATEL, “Painéis de Dados > Acessos”, 2022. <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/acessos> (acessado fev. 12, 2022).
- [47] K. Ahuja e A. Khosla, “Network selection criterion for ubiquitous communication provisioning in smart cities for smart energy system”, *J. Netw. Comput. Appl.*, vol. 127, p. 82–91, 2019, doi: 10.1016/j.jnca.2018.11.011.
- [48] V. Daravath e A. Daravath, “WI MAX ( IEEE 802 . 16 ) Broad Band Technology For”, p. 1273–1275, 2015.

- 
- [49] R. S. Sinha, Y. Wei, e S. H. Hwang, “A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT”, *ICT Express*, vol. 3, n° 1, p. 14–21, 2017, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004.
- [50] W. Anani, A. Ouda, e A. Hamou, “A Survey of Wireless Communications for IoT Echo-Systems”, *2019 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. CCECE 2019*, p. 1–6, 2019, doi: 10.1109/CCECE.2019.8861764.
- [51] Y. Kabalci e M. Ali, “Emerging LPWAN Technologies for Smart Environments: An Outlook”, *Proc. - 2019 IEEE 1st Glob. Power, Energy Commun. Conf. GPECOM 2019*, p. 24–29, 2019, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778626.
- [52] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, e M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: the rising stars in the IoT and smart city scenarios”, *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 23, n° 5, p. 60–67, 2016.
- [53] and M. Z. Marco Centenaro, Lorenzo Vangelista, Andrea Zanella, “Long-Range Communications in Unlicensed Bands: The Rising Stars in the IoT and Smart City Scenarios”, *IEEE Wirel. Commun.*, 2016.
- [54] M. A. M. Almuahaya, W. A. Jabbar, N. Sulaiman, e S. Abdulmalek, “A Survey on LoRaWAN Technology: Recent Trends, Opportunities, Simulation Tools and Future Directions”, *Electron.*, vol. 11, n° 1, 2022, doi: 10.3390/electronics11010164.
- [55] H. Taleb, A. Nasser, G. Andrieux, N. Charara, e E. Motta Cruz, “Wireless technologies, medical applications and future challenges in WBAN: a survey”, *Wirel. Networks*, vol. 27, n° 8, p. 5271–5295, 2021, doi: 10.1007/s11276-021-02780-2.
- [56] K. O. A. Alimi, K. Ouahada, A. M. Abu-Mahfouz, e S. Rimer, “A survey on the security of low power wide area networks: Threats, challenges, and potential solutions”, *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, n° 20, p. 1–19, 2020, doi: 10.3390/s20205800.
- [57] M. Bembe, A. Abu-Mahfouz, M. Masonta, e T. Ngqondi, “A survey on low-power wide area networks for IoT applications”, *Telecommun. Syst.*, vol. 71, n° 2, p. 249–274, 2019, doi: 10.1007/s11235-019-00557-9.
- [58] F. E. Abrahamsen, Y. Ai, e M. Cheffena, “Communication technologies for

- 
- smart grid: A comprehensive survey”, *Sensors*, vol. 21, n° 23, p. 1–24, 2021, doi: 10.3390/s21238087.
- [59] Wi-Fi Alliance, “Wi-fi for the Smart Grid”, *White Pap.*, n° September, p. 1–14, 2010, [Online]. Available at: [http://www.wi-fi.org/knowledge\\_center\\_overview.php?docid=4686](http://www.wi-fi.org/knowledge_center_overview.php?docid=4686).
- [60] K. Nguyen, M. Golam Kibria, K. Ishizu, e F. Kojima, “Performance Evaluation of IEEE 802.11ad in Evolving Wi-Fi Networks”, *Wirel. Commun. Mob. Comput.*, vol. 2019, 2019, doi: 10.1155/2019/4089365.
- [61] G. Lobaccaro, S. Carlucci, e E. Löfström, “A review of systems and technologies for smart homes and smart grids”, *Energies*, vol. 9, n° 5, p. 1–33, 2016, doi: 10.3390/en9050348.
- [62] Wi-Fi Alliance, “Wi-Fi EasyMesh”, 2022. <https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-easymesh> (acessado fev. 05, 2022).
- [63] IEEE, “IEEE 802.15.1-2002 - IEEE Standard for Telecommunications and Information Exchange Between Systems - LAN/MAN - Specific Requirements - Part 15: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Network”, 14 de junho de 2002, 2002. [https://standards.ieee.org/standard/802\\_15\\_1-2002.html](https://standards.ieee.org/standard/802_15_1-2002.html) (acessado dez. 30, 2021).
- [64] IEEE, “IEEE 802.15.4-2020 - IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks”, 23 de julho de 2020, 2020. [https://standards.ieee.org/standard/802\\_15\\_4-2020.html](https://standards.ieee.org/standard/802_15_4-2020.html) (acessado jan. 05, 2022).
- [65] N. C. Liang, P. C. Chen, T. Sun, G. Yang, L. J. Chen, e M. Gerla, “Impact of node heterogeneity in ZigBee mesh network routing”, *Conf. Proc. - IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, vol. 1, p. 187–191, 2006, doi: 10.1109/ICSMC.2006.384380.
- [66] S. Marksteiner, V. J. E. Jimenez, H. Valiant, e H. Zeiner, “An overview of wireless IoT protocol security in the smart home domain”, *Jt. 13th CTTE 10th C. Conf. Internet Things - Bus. Model. Users, Networks*, vol. 2018-Janua, p. 1–8, 2017, doi: 10.1109/CTTE.2017.8260940.
- [67] G. Peruzzi e A. Pozzebon, “A review of energy harvesting techniques for low

- power wide area networks (LPWANs)", *Energies*, vol. 13, nº 13, p. 1–24, 2020, doi: 10.3390/en13133433.
- [68] G. de T. ANA-CPRM, "Rede Hidrometeorológica Nacional de Referência – RHNR", 2017. [Online]. Available at: [https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22172/3/RHNR\\_Diretrizes\\_Implementacao.pdf](https://rigeo.cprm.gov.br/jspui/bitstream/doc/22172/3/RHNR_Diretrizes_Implementacao.pdf).
- [69] NOAA / NESDIS, "GOES Data Collection Platform Radio Set (DCPRS) CERTIFICATION STANDARDS at 300 bps and 1200 bps", 2009. [https://www.noaasis.noaa.gov/docs/DCPR\\_CS2\\_final\\_June09.pdf](https://www.noaasis.noaa.gov/docs/DCPR_CS2_final_June09.pdf) (acessado jan. 20, 2022).
- [70] NOAA, "NOAA SATELLITE INFORMATION SYSTEM". [https://www.noaasis.noaa.gov/GOES/GOES\\_DCS/goes\\_dcs.html](https://www.noaasis.noaa.gov/GOES/GOES_DCS/goes_dcs.html) (acessado jan. 20, 2022).
- [71] PRODIST, "Módulo 5 – Sistemas de Medição e Procedimentos de Leitura", 2021. [https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo5\\_Revisão6++Final/5f085533-3801-0b1d-dce2-2793ec7134a1](https://www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/Módulo5_Revisão6++Final/5f085533-3801-0b1d-dce2-2793ec7134a1) (acessado fev. 28, 2022).
- [72] S. E. L.- SEL, "SEL-FLT e SEL-FLR". <https://selinc.com/pt/products/flt/> (acessado mar. 01, 2022).
- [73] EATON, "Sensor inteligente GridAdvisor Series II". <https://www.eaton.com/br/pt-br/catalog/utility-and-grid-solutions/gridadvisor-ii.html> (acessado mar. 01, 2022).
- [74] K. Curtis, "A DNP3 Protocol Primer", 2005. [https://www.dnp.org/Portals/0/AboutUs/DNP3\\_Primer\\_Rev\\_A.pdf](https://www.dnp.org/Portals/0/AboutUs/DNP3_Primer_Rev_A.pdf) (acessado mar. 01, 2022).
- [75] PRODIST, "ANEXO III DA RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021", 2021. [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956\\_prodlist\\_modulo\\_3\\_v8.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodlist_modulo_3_v8.pdf).
- [76] ANA, "HIDROWEB", 2022. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb/mapa> (acessado fev. 19, 2022).
- [77] ANATEL, "Panorama", 2021.

- 
- <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura/panorama> (acessado fev. 19, 2022).
- [78] ANATEL, “Áreas cobertas”, 2021. <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/infraestrutura/areas-cobertas> (acessado fev. 19, 2022).
- [79] C.-G. DA UNIÃO, “Portal da Transparência”, 2022. <https://www.transparencia.gov.br/licitacoes> (acessado jul. 02, 2022).
- [80] Leiden University, “VOSviewer”. <https://www.vosviewer.com/> (acessado abr. 06, 2022).



# ANEXO I

ICIC Express Letters

Part B: Applications

ICIC International © 2022 ISSN 2185-2766

Volume 13, Number 4, April 2022

pp. 355–362

## 5G UTILIZATION ANALYSIS FOR SMART GRID APPLICATIONS COMPARED TO WiMAX AND LPWAN TECHNOLOGIES

Wellington Borsato Rodrigues<sup>1</sup>, Eduardo Henrique Teixeira<sup>1</sup>, Alexandre Baratella Lugli<sup>2</sup>,  
Jose Fernandes da Silva Neto<sup>1</sup> and Benedito Donizeti Bonatto<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Electrical Systems and Energy

Federal University of Itajubá (UNIFEI)

CEP 37.500-903, Itajubá, MG, Brazil

{welingtonborsato; eduardot; josefernandes}@gea.inatel.br; bonatto@unifei.edu.br

<sup>2</sup>Department of Industrial Automation

National Institute of Telecommunications (INATEL)

CEP 37.540-000, Santa Rita do Sapucaí, MG, Brazil baratella@inatel.br

Received August 2021; accepted November 2021

*Abstract. This paper aims to analyze the technical feasibility of applying 5G cellular technology in Smart Grids applications through the comparison among long-range communication technologies, such as NB-IoT, Sigfox, LoRa and WiMAX, which are technologies widely used in this context. Definitions and characteristics of these technologies are described and comparisons are performed among communication features such as latency, coverage distance, bandwidth, costs, energy consumption, and scenarios of application, and advantages and disadvantages for each one. At the end, all data are compiled and the feasibility of 5G application is justified.*

**Keywords:** 5G, LoRa, LPWAN, NB-IoT, Sigfox, Smart Grids, Telecommunications technologies, WiMAX

**1. Introduction.** According to the U.S. Department of Energy, “A smart grid uses digital technology to improve the reliability, flexibility, security, and efficiency of the electricity system – key ingredients in the ongoing modernization of the electricity delivery infrastructure” [1].

In Smart Grids Opportunities Developments and Trends, a *Smart Grid* is defined as: “A smart grid uses sensing, embedded processing and digital communications to enable the electricity grid to be observable (able to be measured and visualized), controllable (able to be manipulated and optimized), automated (able to adapt and self-heal), fully integrated (fully interoperable with existing systems and with the capacity to incorporate a diverse set of energy sources).” [2].

The Smart Grid is an opportunity to use new ICTs (Information and Communication Technologies), but any significant change may have a high cost and then must have strongly

reasoned technical justifications [3]. In most cases, wireless technologies have advantages over wired technologies because their deployment cost is lower and coverage in remote areas occurs immediately [4].

Smart Grids are commonly divided into four levels of communication: Wide Area Network (WAN), Field Area Network (FAN), Neighborhood Area Network (NAN) and Home Area Network (HAN). The interaction among these levels is illustrated in Figure 1.

DOI: 10.24507/icicelb.13.04.355

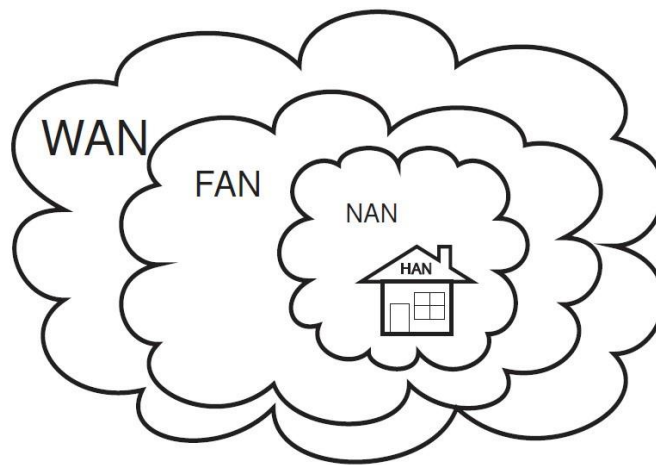


Figure 1. Communication levels of a Smart Grid network [6]

HAN is the consumer unit's own network and has a low reach. NAN is communication between neighboring devices. FAN and WAN are higher levels of communication, so they need communication technologies with bigger coverage [5]. In this way, the need to longrange technologies for solutions in Smart Grids is evidenced, such as smart metering, monitoring of power quality parameters, control of protection devices, and configuration of field devices [6].

Beyond the coverage, some other relevant operational requirements of a Smart Grid are latency and bandwidth [7]. Deployment, maintenance costs, and energy consumption are also important factors in any technological solution.

This article has the objective of support analysis of feasibility of applying 5G technology in smart grid applications. In order to reach that, data from five long-range wireless com-

---

munication technologies are presented, the main ones being 5G, three Low Power WAN technologies – LPWAN (Sigfox, LoRa and NB-IoT) and WiMAX. These technologies fully or partially meet the aforementioned requirements. They were selected because WiMAX and LPWAN are already being used in Smart Grid context, while the 5G deployment is growing worldwide, what may impact decisions of which technology should be used in new smart grid projects.

Prior to this work, it was presented in [4] a survey on 5G application, applied to Smart Grid networks, but the comparisons presented were concentrated on cellular technologies, such as Long Term Evolution (LTE). In [8], a survey presented a great potential of 5G application for demand response applications. In [9], authors presented a lot of technical information about communication technologies for Smart Cities and Smart Grids, but no information about 5G was presented in those applications. In [10], several features of 5G applied to Power Internet of Things (PIOT) were presented, but the comparisons given were related only to other cellular technologies. In [11], a state-of-the-art survey presented features of wired and wireless technologies for backhaul applications, for instance, LTE, 5G, WiMAX and the upcoming 6G, but there is no mention to any LPWAN technology. In [12], a study demonstrated deterministic latency framework for 5G networks, but the smart grid scenario was not analyzed. Therefore, this article complements, updates, and compiles technical information of 5G utilization in Smart Grids applications through comparisons among different communication technologies under operational criteria for Smart Grid applications, which shows a real possibility of applying 5G in Smart Grids.

This work was divided as follows. Chapter 1 presents an introduction to long-range technologies applied in Smart Grid, as well as a literature review on 5G. In the following session, a theoretical foundation is made about the technologies to be mentioned. In Chapter 3 comparisons are made among the technical requirements of a communication network for Smart Grid and the characteristics of each type of technology. Finally, Chapter 4 brings the conclusions regarding the application of 5G in different contexts of the Smart Grid and proposes future researches.

**2. Theoretical Foundation.** In order to properly analyze communication technologies, it is necessary to know some technical characteristics of each one of them, which are presented below.

2.1. **5G communication.** 5G has the multi-functionality and flexibility to further support many critical issues related to cost analysis and power management applications. The ultra-low latency and massive access network of resources can effectively meet the connection requirements of the central supervisory control of services in the electrical grid of a smart grid [4].

The network slicing technology was first implemented in 5G and provides security and isolation with reliability similar to dedicated networks such as optical fiber, but with significantly reduced deployment cost. A network slice is a virtual allocation of communication resources with an independent lifecycle and customizable operating requirements according to different network levels. The 5G network slicing also enables the creation of special networks based on demand in the established requirements. Multiple slices of the network can be managed in a unified way, effectively reducing operational costs [13].

In addition to the possibility of network slicing, 5G communication technology has other features for applications in a smart grid:

- 5G can be up to 100 times faster than 4G, with data rates of up to 10 Gb/s, capable of supporting UHD (Ultra High Definition) videos, virtual reality applications, web pages and monitoring of smart vehicles;
- Ultra-low latency lower than 1 ms;
- Several billion applications and hundreds of billions of machines;
- Energy usage per bit can be 1000 times less, which improves the technical feasibility of battery-operated devices [14].

5G networks allow Intelligent Electronic Devices (IED) to be interconnected more quickly in order to monitor the generation and consumption of electricity more efficiently and individually by each city or consumer group. This helps in reducing energy cost [4].

5G networks can be built by using small cell networks encompassing up to 100 times more antenna locations than 3G/4G networks, which makes it possible to increase the number of devices that would be connected to the network of the future [14].

Figure 2 illustrates the main advantages of using 5G communication technologies used in smart networks [4].

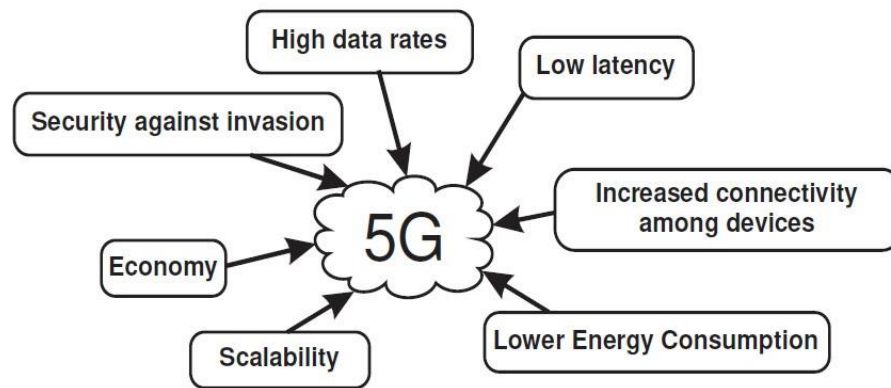


Figure 2. Benefits of 5G networks in Smart Grids

**2.2. LoRa communication.** The Long Range (LoRa) technology is included in the class of Low Power Wide Area Network (LPWAN), which was developed to meet applications where medium and long-range wireless connectivity is desired, and at the same time with low energy consumption. It uses a spread spectrum modulation in the GHz band to allow long range coverage, in addition to supporting a network with a large number of devices [15].

The basic structure of a LoRa network is usually composed of a network and application server, a hub or gateway, and the end devices. When considering transmission aspects with this technology, there are two streams of data transmission. The first is Uplink, when the end node transmits data to the gateway, and the second is Downlink, when the gateway transmits information to the end node. In this type of network, communication does not occur directly between end devices [15].

LoRa wireless technology uses low power transmission of small data packets (0.3 kbps to 37.5 kbps) to a long-distance receiver [15].

**2.3. Sigfox communication.** Sigfox has some characteristics similar to LoRa and is also considered an LPWAN technology. One of the common aspects of the two technologies is the use of unlicensed spectrum for operation [16]. This allows both to be used to exchange information over long distances, without the use of cellular networks, as they have their own structure.

As a result, the measurement data obtained through sensors reaches the cloud via a gateway. Cloud servers are responsible for discovering the collected data and using them in

their different applications. So there is an economical and simple way to install smart grids [17].

Sigfox wireless systems send small 12-byte packets at very slow rates, around 300 baud. This allows the increase of transmission range, enabling communications over long distances. As a result, Sigfox is not indicated for transmitting large data loads as the packet contains the capacity of only 12 bytes. With this protocol, it is possible to send just over 140 messages per day, resulting in an average of 6 sends per hour. In addition, the recognition of transmission or bidirectional communication is not performed, and then, some limitations in the security, reliability and performance requirements are pointed out [15].

**2.4. NB-IoT communication.** Communication via NB-IoT differs slightly from LPWAN radio technologies as it is designed to allow communication between a large number of devices and applications through mobile communication [18]. As a result, it operates based on existing LTE network functionalities [19]. Some simplifications were made to this standard in order to better serve devices with low computational power and low energy storage capacity.

NB-IoT is suitable for use in a subset of LTE network – its physical layer limits the bandwidth to a single narrowband of 200 kHz used for both sending and receiving data. Communication via NB-IoT is able to provide good coverage and uses the same network architecture as LTE with some optimizations for IoT applications. The ranges in which this narrow band is generally applied are 0.7 GHz, 0.8 GHz and 0.9 GHz [15].

To compare the mentioned LPWAN technologies, Table 1 brings a comparison between the different technologies in terms of their rates, sensitivity, bandwidth and modulation [17].

**2.5. WiMAX.** The WiMAX technology, which is described in the IEEE 802.16 standard, was developed with the intention of reaching large distances, which would make it a suitable technology for WAN applications. However, it can be used for either NAN, FAN and WAN [20]. The WiMAX technology brings many benefits to Smart Grids, which allowed its use in all levels of communication: WiMAX can be used for reading wireless meters, real-time charging, detection of power outages and other monitoring functions [21].

Table 1. Comparison of specifications of LPWAN technologies [17]

<b>Technology</b>	<b>Sigfox</b>	<b>LoRa</b>	<b>NB-IoT</b>
Data rate	100 bps	0.3-38.4 kbps	100 kbps
Effective bandwidth	300 Hz	3 kHz	3 kHz
Frequency band	Sub-GHz ISM	Sub-GHz ISM	Licensed
Standard transmission power	15 dBm	20 dBm	23 dBm
Maximum loss	162 dB	157 dB	160 dB
Reception sensitivity	-147 dBm	-137 dBm	-137 dBm
Standard	No	LoRaWAN	LTE

Among the main characteristics of WiMAX technology for Smart Grids, there is low latency, large bandwidth, easy deployment, long range (16 to 50 km approximately) and cheap physical structure when compared to other technologies, such as optical fiber. WiMAX also has closed-loop power control, high Quality of Service (QoS) and message prioritization, a very important function for Smart Grids, since events present in the electricity grid can have different priorities [7]. In addition, WiMAX can work with security protocols and is scalable, a feature that allows expansion of the communication network [21].

WiMAX communication technology is consolidated as one of the most suitable technologies when looking for long range, high data traffic, and low deployment cost, but it is necessary to pay attention to the energy consumption of the network elements, which is, in general, high [20].

WiMAX technology has its own operational profile for Smart Grids, called WiGRID, which allows an optimized configuration by adjusting several parameters, such as duration and size of communication frames, scheduling strategies and data traffic mapping [5].

**3. Application Analysis.** WiMAX technology has gained wide support within the context of smart grids in a time when there was the expansion of latest technologies as 5G and LPWAN technologies. Thus, at that time, WiMAX stood out positively for these applications. This article aims to update comparisons between current technologies and analyze the viability of 5G technology for Smart Grids. In this way, several comparisons are made to verify the technical feasibility.

**3.1. Latency.** As mentioned in the previous topics, the communication technology via 5G has an ultra-low latency of less than 1 ms. WiMAX typically has less than 100 ms latency [5]. NB-IoT has a typical latency of less than 10 s, which is still less than LoRA [18]. Sigfox has an average latency of up to 2 s [15], so it is considered that 5G would be a better choice for

---

low latency applications. Anyway, it is worth noting that latency in a network is directly proportional to the number of connected devices, i.e., in the future, when 5G networks are being used on a large scale, these statements can be discussed again.

**3.2. Bandwidth.** One of the biggest benefits of 5G is the possibility of massive communication with low latency. In this way, 5G technology becomes a great competitor to WiMAX, which also allows high communication rates. LPWAN technologies, in general, have much lower communication rates [20].

**3.3. Coverage.** All the mentioned technologies are suitable for use in NANs and WANs [20]. Furthermore, it is known that the range of wireless networks depends on the environment in which the antennas are installed, so this criterion is not decisive when choosing any of the technologies.

**3.4. Deployment cost.** The origin of the cost of deploying a 5G network for energy companies is quite similar to the one of NB-IoT technology. These two technologies are implemented by telecommunications operators, eventually with a government subsidy. Energy companies then need to hire a Virtual Private Network (VPN) and bear the data and chip costs for the network devices to work. All these costs are negotiated between telecommunications operators and electricity concessionaires. Thus, the utility's telecommunications infrastructure costs are mostly field equipment [21].

It has not yet been possible to make an accurate survey of the costs of network usage due to the fact that 5G technology is still in the process of being widely implemented [21].

When using technologies such as LoRa, Sigfox and WiMAX, the utility is responsible for the entire infrastructure of radios, repeaters and antennas [21].

Under these conditions, even a telecommunication system via WiMAX, which is considered to be a system with a low implementation cost, can be the most expensive among the mentioned technologies [21].

**3.5. Energy consumption.** The 5G technology brings the proposal of a significant reduction in consumption when compared to 4G, which has high energy consumption. WiMAX has high power consumption, comparable to 4G. LPWAN technologies have very low consumption [21].

Table 2 summarizes all presented information.



Table 2. Data comparison of all presented technologies

	<b>5G</b>	<b>WiMAX</b>	<b>LoRa</b>	<b>Sigfox</b>	<b>NB-IoT</b>
<b>Latency</b>	< 1 ms	< 100 ms	May be > 10 s	< 2 s	< 10 s
<b>Bandwidth</b>	High	High	Low	Low	Low
<b>Coverage</b>	Long	Long	Long	Long	Long
<b>Deployment costs</b>	Telecommunication operator	Utility	Utility	Utility	Telecommunication operator
<b>Energy consumption</b>	Medium	High	Low	Low	Low

4. **Conclusions.** This paper presented several technical characteristics of wireless communication networks for Smart Grids applications. Considerations were made on the 5G technology compared to Sigfox, LoRa, NB-IoT, and WiMAX, which is already widely used.

It could be concluded that 5G communications technology has great potential for new deployments instead of WiMAX. In addition, 5G brings several technical advantages over WiMAX, which makes it more interesting for the Smart Grids context, such as low latency, higher bandwidth, lower deployment costs and lower energy consumption. It is important to emphasize that WiMAX allows for a customization of the use of technology to be more suitable for Smart Grids according to the needs of companies, which is a very positive point. On the other hand, 5G features network slicing, which also has very interesting applications for energy companies, such as isolating the communication network.

LPWAN technologies bring significant advantages from the perspective of the cost of maintaining the network, as they have low energy consumption and a low implementation cost, but they may be inadequate in contexts where large amounts of data are needed or in contexts that require extremely long ranges.

It is estimated that the 5G communication technology could be widely used in Smart Grids soon, since, technically, there are no significant impediments to do so. This implementation will depend, as well as of policy and regulatory aspects, almost exclusively on negotiations between telecom operators and power companies.

Future researches will be needed when 5G technology is fully deployed worldwide, because all costs will be presented for each country or region and all behaviors of a widely used network will be properly measurable. 6G technology is also being studied and may have some impact on smart grid communications technologies in the coming years.

**Acknowledgment.** The authors gratefully acknowledge the financial support in part of CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brazil – Finance Code 001, CNPq – National Council for Scientific and Technological Development – Brazil, INERGE and FAPEMIG.

### 5.3. REFERENCES

- [1] U.S. Department of Energy, *Smart Grid System Report 2018: Report to Congress*, pp.1-93, [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/02/f59/Smart Grid System Report November 2018 1.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/02/f59/Smart_Grid_System_Report_November_2018_1.pdf), 2018.
- [2] A. B. M. S. Ali, *Smart Grids: Opportunities, Developments, and Trends*, 1st Edition, Springer Editor, 2013.
- [3] M. R. Hossain, A. M. T. Oo and A. B. M. S. Ali, Smart grid, in *Smart Grids*, pp.23-44, doi: 10.1007/978-1-4471-5210-1, 2013.
- [4] S. S. Reka, T. Dragičević, P. Siano and S. R. S. Prabakaran, Future generation 5G wireless networks for smart grid: A comprehensive review, *Energies*, vol.12, no.11, doi: 10.3390/en12112140, 2019.
- [5] F. Aalamifar and L. Lampe, Optimized WiMAX profile configuration for smart grid communications, *IEEE Trans. Smart Grid*, vol.8, no.6, pp.2723-2732, doi: 10.1109/TSG.2016.2536145, 2017.
- [6] T. D. Rajashree and R. D. Karandikar, WLAN-WiMAX scheduler-based hybrid sensor network for data aggregation in smart grid, *International Journal of Future Generation Communication and Networking*, vol.12, no.3, pp.11-24, 2019.
- [7] M. Daoud and X. Fernando, On the communication requirements for the smart grid, *Energy Power Eng.*, vol.3, no.1, pp.53-60, doi: 10.4236/epe.2011.31008, 2011.
- [8] H. Hui, Y. Ding, Q. Shi, F. Li, Y. Song and J. Yan, 5G network-based Internet of Things for demand response in smart grid: A survey on application potential, *Appl. Energy*, vol.257, 113972, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113972, 2020.
- [9] I. Jawhar, N. Mohamed and J. Al-Jaroodi, Networking architectures and protocols for smart city systems, *J. Internet Serv. Appl.*, vol.9, no.1, doi: 10.1186/s13174-018-0097-0, 2018.
- [10] J. Tao, M. Umair, M. Ali and J. Zhou, The impact of Internet of Things supported by emerging 5G in power systems: A review, *CSEE J. Power Energy Syst.*, vol.6, no.2, pp.344-352, doi: 10.17775/csee-jpes.2019.01850, 2019.
- [11] T. Sharma, A. Chehri and P. Fortier, Review of optical and wireless backhaul networks and emerging trends of next generation 5G and 6G technologies, *Trans. Emerg. Telecommun. Technol.*, vol.32, no.3, pp.1-16, doi: 10.1002/ett.4155, 2021.
- [12] Y. Liao, Y. Sheng and J. Wang, A deterministic latency name resolution framework using network partitioning for 5G-ICN integration, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, vol.15, no.5, pp.1865-1880, doi: 10.24507/ijicic.15.05.1865, 2019.
- [13] Smart Grid Powered by 5G SA-based Network Slicing, *SGCC, China Telecom and Huawei*, p.14, 2020.
- [14] S. K. Rao and R. Prasad, Impact of 5G technologies on smart city implementation, *Wirel. Pers. Commun.*, vol.100, no.1, pp.145-159, doi: 10.1007/s11277-018-5618-4, 2018.
- [15] W. Anani, A. Ouda and A. Hamou, A survey of wireless communications for IoT echo-systems, *2019 IEEE Can. Conf. Electr. Comput. Eng. (CCECE 2019)*, pp.1-6, doi: 10.1109/CCECE.2019.8861764, 2019.
- [16] M. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella and M. Zorzi, Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios, *IEEE Wirel. Commun.*, vol.23, no.5, pp.60-67, 2016.
- [17] Y. Kabalci and M. Ali, Emerging LPWAN technologies for smart environments: An outlook, *Proc. of 2019 IEEE 1st Glob. Power, Energy Commun. Conf. (GPECOM 2019)*, pp.24-29, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778626, 2019.
- [18] R. S. Sinha, Y. Wei and S. H. Hwang, A survey on LPWA technology: LoRa and NB-IoT, *ICT Express*, vol.3, no.1, pp.14-21, doi: 10.1016/j.icte.2017.03.004, 2017.

- 
- [19] W. Ayoub, A. E. Samhat, F. Nouvel, M. Mroue and J. C. Prévotet, Internet of Mobile Things: Overview of LoRaWAN, DASH7, and NB-IoT in LPWANs standards and supported mobility, *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol.21, no.2, pp.1561-1581, doi: 10.1109/COMST.2018.2877382, 2019.
- [20] E. U. Ogbodo, D. Dorrell and A. M. Abu-Mahfouz, Cognitive radio based sensor network in smart grid: Architectures, applications and communication technologies, *IEEE Access*, vol.5, pp.1908419098, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2749415, 2017.
- [21] A. Mahmood, N. Javaid and S. Razzaq, A review of wireless communications for smart grid, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol.41, pp.248-260, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.036, 2015.