



Conectividade no campo

**Mapeamento de demandas e alternativas tecnológicas
para a conectividade no campo**

Produto 1



Conectividade no campo

Mapeamento de demandas e alternativas tecnológicas para a conectividade no campo

Produto 1

8.10.51.07.01.03 (800252)

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

Ciência, Tecnologia e Inovação

Conectividade no campo

Mapeamento de demandas e alternativas tecnológicas para a conectividade no campo



Brasília-DF
Junho, 2023

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE)

Organização social supervisionada pelo Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)

Presidente

Fernando Cosme Rizzo Assunção

Diretores

Ary Mergulhão Filho

Luiz Arnaldo Pereira da Cunha Júnior

Diretor Administrativo Financeiro

Carlos Roberto Fortner

Conectividade no campo. Produto1 Mapeamento de demandas e alternativas tecnológicas para a conectividade no campo. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2023.

98 p: il.

1. Conectividade. 2. Internet das coisas (IoT). 3. Agricultura 4.0. 4. Produtividade agrícola 5. NB-IoT. 5. LTE-M 6. Comunicações. I. CGEE. II. Ministério das Comunicações

*Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
SCN, Quadra 2, Bloco A
Edifício Corporate Financial Center, salas 1102/1103
70712-900 – Brasília-DF
Telefone: (61) 3424.9600
<http://www.cgee.org.br>*

Todos os direitos reservados pelo Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Os textos contidos nesta publicação poderão ser reproduzidos, armazenados ou transmitidos desde que seja citada a fonte.

Referência bibliográfica:

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS - CGEE. Mapeamento de demandas e alternativas tecnológicas para a conectividade no campo. Brasília: 2023. 98p.

Esta publicação é parte integrante das atividades desenvolvidas no âmbito do 2º Contrato de Gestão (CGEE) – 31º Termo Aditivo/Projeto: Conectividade no Campo – 8.10.51.07.01.03/ Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI)/2022.

Conectividade no campo

Mapeamento de demandas e alternativas tecnológicas para a conectividade no campo

Supervisão

Fernando Cosme Assunção Rizzo/Luiz Arnaldo Pereira da Cunha Júnior

Coordenador

César Augusto Costa

Apoio administrativo

Larissa Martins Rocha

Consultor líder

Rodrigo Fernando Maule (responsável técnico)

Equipe técnica de entidades parceiras

Ministério das Comunicações – Secretaria das Comunicações (MCom – SeCom)

Hélio Maurício Miranda da Fonseca

Pedro Lucas da Cruz Pereira Araújo

Universidade de São Paulo – Centro de Agricultura Tropical Sustentável – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz – Grupo de Políticas Públicas (USP-STAC-Esalq-GPP)

Alberto G.O. Pereira Barreto

Pedro Alves Quilici Coutinho

Arthur Nicolaus Fendrich

Pietro Gagnolati Fernandes

Durval Dourado Neto

Sergio Paganini Martins

Marluce Scarabello

Simone B. Lima Ranieri

Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel)

Daniel Andrade Nunes

Jose Marcos Camara Brito

Frederico Trindade da Silva

Pedro Lopes de Oliveira

Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD)

Fernando Basseto

Maria Silvina Medrano

Gustavo Correa Lima

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
2 TECNOLOGIAS DE CONECTIVIDADE	14
2.1 EVOLUÇÃO DOS CELULARES E DA CONECTIVIDADE.....	14
2.2 INTERNET DAS COISAS	17
2.2.1 Soluções em IoT	19
2.2.2 NB-IoT	23
2.2.3 LTE-M	24
2.3 ARQUITETURA DAS GERAÇÕES 4G E 5G DE REDES MÓVEIS	27
2.4 OUTRAS TECNOLOGIAS PARA CONECTIVIDADE.....	29
2.5 FORNECEDORES E CADEIA PRODUTIVA	30
2.6 TRANSMISSÃO DE DADOS INTERMITENTE	30
2.6.1 Aplicações para CIoT	33
2.6.2 Aplicações para MIoT	34
2.7 IOT AGRÍCOLA.....	35
2.8 AUTOMAÇÃO NA AGRICULTURA	35
2.9 O MERCADO DE IOT NA AGRICULTURA	38
3 CONECTIVIDADE PARA O AGRONEGÓCIO E COMUNIDADES RURAIS NO BRASIL 39	
3.1 AGRICULTURA INTELIGENTE.....	42
3.2 O CAMPO CONECTADO	44
4 MAPEAMENTO DA DEMANDA POR CONECTIVIDADE: DETALHAMENTO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO MODELO – FORMAÇÃO DE CLUSTERS	46
4.1 BASES DE DADOS.....	46
4.1.1 Classificação da base de dados	49
4.2 CLASSES DE DEMANDA	49
4.2.1 Chaves de decisão	51
4.3 RESULTADOS	55
5 MAPEAMENTO DA OFERTA DE SINAL DE INTERNET: DETALHAMENTO DO BANCO DE DADOS GEOESPACIAL DE INFRAESTRUTURAS	60
5.1 MODELO ITM	60

5.2 NOVAS INFORMAÇÕES INCORPORADAS	61
6 CARACTERIZAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS E DE SUA DEMANDA POR INFRAESTRUTURA	67
6.1 BANDAS DE OPERAÇÃO NB-IOT E LTE-M	68
6.2 DESEMPENHO NB-IOT	73
6.3 DESEMPENHO LTE-M	78
6.4 ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE SOLO E CLIMA DO MODELO LONGLEY-RICE NA ATENUAÇÃO	78
6.4.1 Definição dos parâmetros.....	78
6.4.2 Análise de impacto	80
6.5 DEMANDA POR TECNOLOGIAS E SUA INFRAESTRUTURA.....	82
7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	83
LISTA DE FIGURAS	87
LISTA DE TABELAS	88
LISTA DE ABREVIACÕES	89
REFERÊNCIAS	92

1 Introdução

Desde os primórdios, os seres humanos têm buscado maneiras de se conectar uns com os outros e compartilhar informações, seja para fins relacionados à caça, à guerra, às colheitas e às transações comerciais ou para fins de entretenimento, como contar histórias e compartilhar experiências. Nos estágios iniciais, os humanos contavam apenas com sinais sonoros, visuais, gestos e linguagem corporal para transmitir suas ideias e relatar eventos.

Com o passar do tempo, formas mais elaboradas de comunicação foram desenvolvidas, como a escrita, que permitiu que os dados fossem registrados e as informações não precisassem ser transmitidas exclusivamente de forma oral para as novas gerações.

A invenção da imprensa por Johannes Gutenberg, no século XV, possibilitou a ampla disseminação da informação escrita. A imprensa é considerada um dos avanços mais significativos na história da comunicação humana, pois levou à produção em massa de livros e outros materiais impressos. Essa inovação revolucionou a transferência de conhecimento, tornando possível a circulação de ideias e informações de maneira mais rápida e abrangente do que nunca.

Desde então, o conhecimento científico avançou rapidamente. A Física evoluiu com novos conceitos na Mecânica, na Hidrostática e, especialmente, no Eletromagnetismo. Essa área de conhecimento deu um salto expressivo com as ideias do matemático e físico escocês James Maxwell, que estabeleceu os fundamentos do eletromagnetismo no final do século XIX, logo percebendo suas aplicações para a comunicação.

Durante o século XX, a evolução da tecnologia de comunicação acelerou de forma excepcional, graças a invenções como o telefone, o rádio, a televisão, o telefone celular, o *e-mail* e a internet. A internet, em particular, teve um impacto revolucionário na maneira como as pessoas se comunicam e trocam informações, especialmente em relação à velocidade e à quantidade de informações disponíveis. Com ela, surgiram novas formas de comunicação, como as redes sociais, que alteraram significativamente a maneira como as pessoas interagem e se comunicam. A disponibilidade de informações em tempo real, bem como a facilidade de acesso a informações em uma escala global, transformou a forma como as pessoas compartilham conhecimento e se conectam umas com as outras.

A conectividade pode ser entendida como a capacidade de estabelecer conexões (comunicação) entre pessoas e/ou máquinas. Esse conceito geralmente se refere à disponibilidade de infraestrutura para a conexão entre redes e equipamentos. A disponibilidade de conectividade é essencial em muitas áreas, como comunicação, informática, automação industrial, entre outras, e permite que dispositivos, sistemas e pessoas trabalhem de forma colaborativa, otimizando processos e aumentando a eficiência das operações. Atualmente, a conectividade pode ser estabelecida por meio de diferentes tecnologias, como cabos de rede, *Wi-Fi*, *Bluetooth*, 4G, 5G, entre outras.

A conectividade sem fio é uma tecnologia de comunicação que permite que dispositivos se comuniquem sem a necessidade de cabos físicos, utilizando ondas de rádio, infravermelho ou outros meios de transmissão. O *Bluetooth* é um exemplo de tecnologia de conectividade sem fio amplamente utilizada para conectar dispositivos móveis, como telefones celulares, a outros dispositivos, como alto-falantes ou fones de ouvido sem fio. A conectividade sem fio é especialmente útil em situações que requerem mobilidade ou quando o uso de cabos físicos é impraticável ou inconveniente.

Atualmente, a conectividade é amplamente acessível e se tornou uma parte essencial e indispensável de nossa sociedade. Graças a tecnologias como redes móveis, *Wi-Fi*, fibra óptica e sinais via satélite, a internet faz parte da vida cotidiana, permitindo que as pessoas se conectem em tempo real, tanto entre si quanto a máquinas, de quase qualquer lugar. Isso possibilita a criação e a distribuição democrática de conteúdo, bem como o compartilhamento de conhecimento em escala global.

O aumento da conectividade tem impactado significativamente várias áreas, incluindo economia, educação, saúde, transporte e cultura. Além disso, sensores conectados à internet podem coletar informações e disponibilizá-las a algoritmos que auxiliam na tomada de decisões. Isso é conhecido como Internet das coisas (IoT, do inglês *internet of things*), que conecta seres humanos e dispositivos eletrônicos para fornecer informações que facilitam a execução de tarefas cotidianas.

No campo agrícola, a conectividade permite que os agricultores tenham acesso em tempo real a informações sobre clima, mercado, condições das plantações e do solo e outras variáveis importantes para a produção agrícola. Isso pode apoiar a tomada de decisões mais fundamentadas, aumentando a produtividade e reduzindo os riscos. Anteriormente, os agricultores dependiam de informações obtidas por meio de jornais, revistas especializadas, televisão, consultorias, etc. com certo atraso, o que muitas vezes inviabilizava ações oportunas. Além disso, a internet pode facilitar a vida das pessoas que vivem em áreas rurais, possibilitando acesso a serviços de saúde, educação e outras necessidades básicas que normalmente estão disponíveis apenas em áreas urbanas.

Os empreendedores rurais podem ter acesso a novos mercados, possibilitando a venda de seus produtos em escala nacional ou internacional. Isso incentiva a criação de novos negócios que se baseiam em serviços de tecnologia para o agronegócio, estimulando o aumento da renda e fortalecendo a economia local por meio da geração de empregos na região.

A introdução da Agricultura 4.0 ou Agro 4.0, também conhecida como “Agricultura Inteligente”, implica uma simbiose entre máquinas, pessoas e tecnologias que aumenta a competitividade do setor. As vantagens dessa inovação incluem ganhos de produtividade, economia de insumos, desenvolvimento sustentável e atração dos jovens, que muitas vezes enxergam como única alternativa a migração para as cidades devido à carência de oportunidades no meio rural. A adoção de conceitos Agro 4.0 reduz custos operacionais e eleva o faturamento em até 25% (FIBERX, 2022).

Essa possibilidade de aumento nos ganhos, além do amplo leque de opções que abre, torna a conectividade uma pauta importante para o setor agrícola, que representa 24,8% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro (CNA; CPEA/ESALQ, 2023). Entretanto, o atual cenário da conectividade no meio rural ainda deixa as pessoas que vivem nessas localidades em desvantagem em relação aos habitantes das cidades.

Em 2020, o Comitê Gestor da Internet do Brasil relatou que 152 milhões de brasileiros possuem acesso à internet, o que representa um aumento de 7% em relação ao ano anterior (CETIC; NIC; CGI, 2021). No entanto, ainda existem áreas no país onde o acesso à internet é limitado ou inexistente. De acordo com o IBGE, 25% da população brasileira, ou 46 milhões de pessoas, não tem acesso à internet. Esse problema é mais comum em áreas rurais, onde 53,5% da população não possui conexão com a internet em comparação com 20,6% em áreas urbanas.

Essa falta de conectividade afeta também o mercado de trabalho, com trabalhadores remotos relatando problemas como instabilidade do sinal, velocidade da conexão e limitado conhecimento sobre o uso da internet no trabalho. Embora a conexão com a internet tenha melhorado em áreas rurais nos últimos anos, o Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa) e a associação ConectarAgro relatam que 73% das propriedades rurais não possuem sinal (CONNECTARAGRO, 2022). Ainda segundo levantamento do Mapa, o Brasil possui 195 milhões de hectares *off-line*.

Infelizmente, esses dados apontam para a existência de uma espécie de “deserto digital” no meio rural brasileiro, com grandes extensões territoriais desprovidas do serviço de internet. Em todo o Brasil são 13 milhões de pessoas vivendo em áreas rurais sem qualquer tipo de cobertura, segundo o Instituto Interamericano de Cooperação para a Agricultura (IICA, 2022).

Um estudo sobre conectividade no campo elaborado pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (Esalq), em 2021, sob demanda dos ministérios da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (Mapa) e das Comunicações (MCom), aponta que apenas 23% do espaço agrícola brasileiro possui algum nível de cobertura por internet (BRASIL, 2021a). Esse estudo indica que com o avanço da cobertura de conectividade nessas áreas rurais e a possibilidade de uso de modernas tecnologias o Valor Bruto da Produção (VBP) agropecuária pode aumentar em até R\$ 100 bilhões.

De acordo com o estudo, para dobrar o índice de conectividade no campo, elevando-o para cerca de 50%, seria necessário instalar 4.400 torres de transmissão em um período de dois anos. Por sua vez, para alcançar uma taxa de 80% seria necessário instalar 15.182 antenas em um prazo de quatro anos.

Para melhorar a conectividade na área rural são necessárias soluções que vão além da instalação de torres e antenas. Algumas possibilidades incluem o uso de satélites para fornecer acesso à internet em áreas remotas e a implantação de tecnologias de rede sem fio, como o 5G, que oferece uma conectividade mais rápida e eficiente.

Em 2021, o governo federal brasileiro lançou o programa *WI-FI* Brasil, que tem como objetivo distribuir acesso à internet gratuito para regiões de difícil acesso no país. A Lei n. 14.173/2021

(BRASIL, 2021b) prevê redução dos encargos para estações terrenas de internet via satélite e via cabo e/ou fibra, tornando a tecnologia mais acessível para as áreas rurais e remotas (BRASIL, 2023b).

O programa ampliou o acesso à internet via satélite para incluir famílias de alunos da educação básica, nas regiões urbana e rural, que muitas vezes não têm acesso a recursos educacionais digitais, buscando levar a conectividade a mais de quinhentos pontos espalhados pelo Brasil, beneficiando escolas, praças públicas, assentamentos rurais, Unidades Básicas de Saúde (UBS), comunidades tradicionais e telecentros comunitários. Mas o *WI-FI* Brasil ainda está longe de suprir as necessidades de conectividade nas regiões rurais e remotas, que carecem de infraestrutura para a disponibilização do serviço.

A Lei n. 9.472/1997 (BRASIL, 1997), em seu art. 1º, instituiu o Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações (Fust), que fornece instrumentos para ampliar a conectividade no campo. As receitas do Fust decorrem, principalmente, de parcela de recursos do Fundo de Fiscalização das Telecomunicações (Fistel) e de contribuição de 1% sobre a receita operacional bruta decorrente de prestação de serviços de telecomunicações nos regimes público e privado.

O Fundo tem como agentes financeiros o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e a Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), além da Caixa Econômica Federal (CEF), dos bancos de desenvolvimento, das agências de fomento e das demais instituições financeiras que podem se credenciar como agentes financeiros. Contudo, os recursos do Fundo foram contingenciados no Orçamento de 2021, embora o MCom tenha tentado reaver ao menos parte da quantia com o então Ministério da Economia.

A Portaria n. 6.098, de 1º de julho de 2022, do MCom (BRASIL, 2022a) estabelece os objetivos estratégicos do Fust para o quinquênio 2022-2027. Entre as iniciativas listadas que poderão receber os recursos alocados no Fundo estão a garantia de internet em banda larga para escolas públicas, em especial as situadas fora da zona urbana, e a expansão da cobertura dos serviços de telefonia móvel no país, com tecnologia 4G ou superior, em áreas rurais e em rodovias sem atendimento.

Com a finalidade de conhecer as regiões com essas lacunas, o MCom solicitou ao Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) que realizasse um levantamento sobre as demandas e as tecnologias disponíveis para fornecimento de serviços de internet em áreas rurais e remotas. Esse estudo, denominado *Conectividade no campo*, servirá como base para a implementação de medidas inovadoras para ampliar a conectividade nessas regiões por meio da aplicação de tecnologias de internet banda larga.

O objetivo deste estudo é complementar análises do território brasileiro que possibilitem um conhecimento mais aprofundado sobre as especificidades do meio rural e ofereçam suporte para a construção de soluções que contribuam para melhorar a conectividade nessas áreas. De forma resumida, neste estudo buscou-se uma classificação do território brasileiro que refletisse a demanda por conectividade das áreas rurais, indicasse os locais já cobertos com internet e

permitisse propor cenários para que as lacunas possam ser preenchidas de forma prioritária em função da demanda.

Para representar espacialmente a demanda foi desenvolvido um modelo que permitiu a qualificação do território numa resolução de 1 km². Para verificar a área já coberta foi utilizado um modelo que simula a oferta de sinal com base na infraestrutura de telecomunicação existente.

Para a modelagem de cenários de expansão da conectividade foram consideradas as alternativas tecnológicas disponíveis, levando em conta suas características intrínsecas e a demanda por infraestrutura para sua implementação e operacionalização. Foram também identificados os custos relativos à implementação das alternativas tecnológicas para diferentes cenários possíveis a fim de atender a demanda por conectividade no campo, incluindo a estimativa de viabilidade econômico-financeira para cada alternativa tecnológica estudada.

Paralelamente, foram apresentadas sugestões de alteração no marco regulatório e identificadas informações disponíveis sobre os instrumentos de fomento e financiamento voltados à conectividade rural.

O *Conectividade no campo* recebeu informações sobre infraestrutura de conectividade no território brasileiro de outro projeto com foco em conectividade do MCom, o *Mapa de conectividade*, também realizado pelo CGEE. Dessa forma, foi possível gerar mapas da infraestrutura disponível para fornecimento de acesso à internet no território nacional, entregando informações sobre a oferta atual de serviços (dados de 2022).

O estudo *Conectividade no campo* foi realizado em colaboração com a Entropix Engenharia, USP/Stac/Esalq, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel) e Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), além da participação de técnicos da Secretaria de Telecomunicações do MCom.

Este documento apresenta, portanto, os resultados deste estudo, bem como propostas para reduzir as lacunas existentes na conectividade do campo, a fim de atender produtores rurais e suas famílias, fornecendo-lhes acesso à internet e consequentemente aos benefícios e à melhoria da qualidade de vida que ela pode proporcionar.

Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

2 Tecnologias de conectividade

Nos últimos anos, as tecnologias de conectividade vêm transformando a maneira como as pessoas se comunicam e interagem com o mundo ao seu redor. Desde os primórdios da telefonia e da internet até a popularização do *Wi-Fi* e dos *smartphones* e a chegada do 5G e das redes de IoT, a conectividade tem se tornado cada vez mais essencial em nosso cotidiano.

A evolução dos aparelhos celulares como ferramentas móveis de conectividade tem ditado os rumos dos avanços tecnológicos, influenciando a sociedade moderna de forma significativa. Compreender as principais tecnologias de conectividade é fundamental para acompanhar as transformações em curso e se preparar para um futuro cada vez mais conectado.

2.1 Evolução dos celulares e da conectividade

Os primeiros celulares introduzidos nos anos 1980, apesar de bastante diferentes dos *walkie-talkies*, existentes e popularizados na época, eram também dispositivos de comunicação pessoal sem fio, portáteis e que utilizavam o sinal de ondas de rádio. Enquanto os *walkie-talkies* funcionam com comunicação direta de dispositivo a dispositivo, os celulares dos anos 1980, de forma inovadora, utilizavam uma rede de telefonia para permitir a comunicação de voz sem fio.

Eles eram grandes, pesados e carregavam uma antena externa proeminente. A aquisição e a manutenção dos aparelhos também eram bastante caras, o que limitava o número de usuários.

Os primeiros telefones móveis não apresentavam recursos sofisticados, como envio de mensagens de texto (SMS, do inglês *short message service*) ou acesso à internet, apenas comunicação por voz, de forma analógica, como um telefone fixo. Não havia suporte para transmissão de dados na rede móvel de primeira geração (1G).

A segunda geração (2G) de tecnologia móvel, introduzida na década de 1990, permitia a transmissão de voz digitalizada e suportava velocidades de dados de até 14,4 kbps (kilobits por segundo) com a tecnologia GPRS (*General Packet Radio Service*), de dez a vinte vezes menor que as velocidades obtidas em internet fixa discada (DSL, do inglês *Digital Subscriber Line*) da época. De certa forma, isso representou um prelúdio da conectividade à internet por dispositivos móveis.

O protocolo de transmissão de dados mais comum usado pelos telefones 2G, inclusive no Brasil, era o GSM (do inglês *Global System for Mobile Communication*). Os celulares 2G operavam nas bandas de frequência de 900 MHz e 1.800 MHz. As velocidades de transmissão de dados nas diferentes gerações de tecnologia móvel variaram significativamente desde então.

Na terceira geração (3G) de tecnologia móvel, introduzida no início dos anos 2000, os telefones celulares evoluíram para os *smartphones*, oferecendo recursos avançados como acesso à internet, *e-mail*, câmeras e aplicativos. As velocidades de dados típicas em uma rede 3G variavam de 384 kbps a 2 Mbps (megabits por segundo), dependendo da tecnologia utilizada,

como HSPA (*High-Speed Packet Access*) e EV-DO (*Evolution-Data Optimized*). O protocolo de transmissão de dados mais comum usado pelos telefones 3G era o UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*), que operava na banda de frequência de 2,1 GHz. O UMTS permitia o envio de dados numa velocidade compatível com a transmissão de vídeos em qualidade básica.

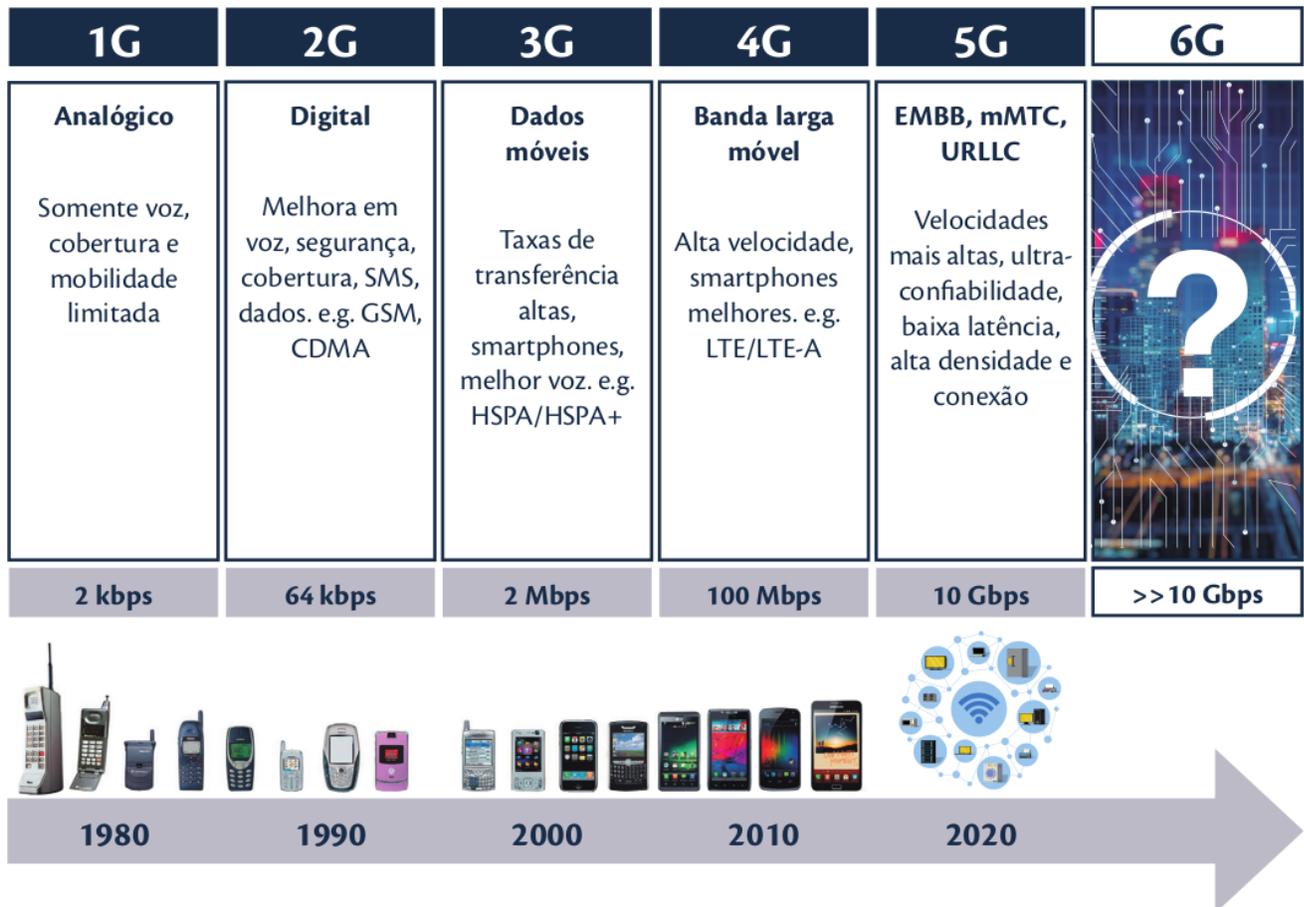
Por sua vez, a quarta geração de tecnologia móvel, chamada 4G e introduzida em meados dos anos 2010, permitia velocidades de transmissão de dados significativamente maiores e suportava tecnologias como LTE (*Long-Term Evolution*) e WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). As velocidades de transmissão de dados típicas em uma rede 4G variavam de 10 a 50 Mbps. Essas velocidades de *download*, muito mais rápidas do que as tecnologias anteriores, permitiram que os usuários transmitissem vídeos em alta definição e jogassem *on-line* com mais facilidade.

O protocolo de transmissão de dados mais comum usado pelo 4G é o versátil LTE, que evoluiu juntamente com as tecnologias disponíveis para os celulares. Os celulares 4G operam em várias bandas de frequência, incluindo 700 MHz, 800 MHz, 1.800 MHz, 2,1 GHz e 2,6 GHz. As velocidades de transmissão de dados do 4G variam de 100 Mbps a 1 Gbps, dependendo da rede e da localização. Este é o tipo de conexão móvel mais disponível no Brasil atualmente (em 2023).

A quinta geração de tecnologia móvel, introduzida em 2019, suporta velocidades de transmissão de dados muito mais rápidas do que o 4G. As velocidades de transmissão de dados típicas em uma rede 5G variam de 50 a 400 Mbps, mas podem chegar a até 10 Gbps, em teoria. O 5G também tem menor latência e maior capacidade de rede, permitindo novas aplicações e casos de uso, como carros autônomos, cidades inteligentes e realidade virtual e aumentada.

Nos últimos anos, a tecnologia 5G (quinta geração) tem sido implantada em todo o mundo. O 5G opera em várias bandas de frequência, incluindo baixas frequências (abaixo de 1 GHz), frequências médias (de 1 GHz a 6 GHz) e frequências altas (acima de 24 GHz). As velocidades de transmissão de dados do 5G variam de 100 Mbps a 10 Gbps, dependendo da rede e da localização. Na Figura 1 é mostrado um resumo da evolução da conectividade ao longo das últimas décadas e as tecnologias associadas a cada uma das gerações.

Figura 1. História da evolução dos celulares e das características da conexão ao longo das últimas décadas



Fonte: adaptada de várias fontes.

Atualmente, ainda não há um padrão definido para o 6G (sexta geração) de tecnologia móvel. No entanto, há muitas pesquisas em andamento para definir os requisitos de rede, as frequências de rádio e outras especificações técnicas para o 6G.

Algumas das possíveis tecnologias que poderiam ser implementadas no 6G incluem redes inteligentes de auto-organização, redes de comunicação de alta altitude, tecnologias de comunicação quântica, redes de drones e veículos autônomos conectados. O objetivo do 6G será oferecer velocidades ainda mais rápidas de transmissão de dados, menor latência e maior capacidade de rede, propiciando uma ampla gama de novas aplicações e serviços.

Alguns especialistas preveem que o 6G poderá oferecer velocidades de *download* de até 1 Terabit por segundo, ou mil vezes mais rápido que as velocidades de *download* do 5G. O 6G também poderá ajudar a impulsionar o desenvolvimento de novas tecnologias em áreas como saúde, transporte, energia e comunicações, permitindo o uso de dispositivos de realidade aumentada, inteligência artificial avançada e outras inovações tecnológicas.

No entanto, ainda é muito cedo para saber com certeza quais serão as características do 6G e quais aplicações e serviços serão possíveis com esta nova tecnologia. Porém, é certo que a evolução da tecnologia móvel continuará, e o 6G será mais um passo em direção a uma rede de comunicação mais rápida e inteligente.

Sabe-se ao certo que o uso do 5G pode ter um impacto significativo no desenvolvimento e no uso da IOT. Com sua velocidade de transmissão de dados muito mais rápida e menor latência, o 5G pode possibilitar a conexão de muitos dispositivos IoT, facilitando novas aplicações e casos de uso, como, por exemplo, carros autônomos, cidades inteligentes e manufatura inteligente. Os carros autônomos necessitam de uma rede confiável e de baixa latência para se comunicar com outros carros e com a infraestrutura de tráfego. Isso pode ser possível com a comunicação 5G. As cidades inteligentes podem usar sensores IoT para coletar informações sobre o tráfego, o uso de energia e outras condições, e o 5G pode permitir que esses dados sejam transmitidos rapidamente para análise e tomada de decisões.

Além disso, o 5G pode tornar a IoT mais acessível, viável, eficiente e confiável, mesmo em áreas remotas ou em países em desenvolvimento, onde a infraestrutura de comunicação é limitada. Ainda, a conexão rápida e confiável do 5G pode permitir que a IoT se expanda para áreas onde anteriormente não era possível.

2.2 Internet das Coisas

A IoT é uma rede de dispositivos conectados que podem interagir entre si para coletar e compartilhar informações. Esses dispositivos podem ser sensores, câmeras, medidores de energia, termostatos e muito mais. Com o 5G, esses dispositivos podem se comunicar instantaneamente uns com os outros e com uma central via internet, permitindo a coleta e a análise de grandes quantidades de dados em tempo real. Muitas vezes esses dados são armazenados e processados na nuvem, outras vezes em servidores ou mesmo *laptops* locais.

A IoT não recebeu um nome oficial até o final dos anos 1990, mas o conceito e as aplicações incipientes existem desde o início dos anos 1980. Sua popularidade acelerou entre 2010 e 2011, atingindo a adoção em massa pelo mercado em 2014.

Os primeiros usos da IoT na agricultura são semelhantes aos atuais: *hardware* que coleta dados em tempo real e *software* que organiza e/ou relata dados. Ambos melhoraram em precisão e acessibilidade, assim como a sanidade dos dados, a conectividade com outros dispositivos, a interoperabilidade com outros sistemas, etc.

Sensores são o ingrediente chave no sistema geral de IoT que, em geral, podem comunicar suas leituras para serviços em nuvem com agregação adicional e análise de tendências. Esses dispositivos, de forma simplificada, são medidores específicos e especializados para uma determinada função, acoplados em uma placa de circuitos que gerencia a transmissão e a aquisição de dados. Podem ser construídos comercialmente para uma determinada finalidade, ou até mesmo serem acoplados a módulos de teste, como, por exemplo, os construídos usando

plataforma Arduino. Na Figura 2 são apresentados alguns exemplos de sensores que podem ajudar a otimizar o plantio, a colheita e a distribuição dos insumos agrícolas.

Figura 2. Sensores típicos usados em IoT aplicadas ao campo



Fonte: elaborada pelo autor.

Sensores de IoT podem ser de vários tipos, desde um simples interruptor de contato ligado/desligado, passando por um detector avançado de vazamento de gás venenoso, até mesmo um mecanismo de reconhecimento facial em tempo real de última geração. Muitos sensores – como de temperatura, umidade, pH, pressão, luz, localização ou movimento – podem ser universais e usados em muitas aplicações diferentes. Outros são voltados a aplicações industriais específicas, como, por exemplo, sensor de gás cianeto de hidrogênio ou sensor de fluoroborato.

Também existem sensores embutidos em equipamentos industriais, como sensores de pressão de líquido refrigerante em equipamentos de HVAC (do inglês *Heating, Ventilating and Air Conditioning*) comerciais, acessíveis por meio de interfaces industriais padrão para diagnósticos no local ou também conectados à internet.

A crescente escassez de terras aráveis, devido a diversos fatores humanos e climáticos, aliada à demanda global cada vez maior por alimentos, torna urgente a necessidade de uma gestão agrícola produtiva e sustentável. Para lidar com essas questões, a IoT é considerada uma ferramenta poderosa devido ao seu potencial para tornar a agricultura mais baseada em dados, o que pode levar a sistemas agrícolas mais eficientes, econômicos e sustentáveis.

As soluções de agricultura de precisão que estão sendo amplamente adotadas atualmente envolvem práticas de gestão baseadas em medições espaciais, usando sinais de GPS (*Global Positioning System*). Com a ajuda da agricultura de precisão, por exemplo, os fertilizantes podem ser aplicados apenas onde são necessários, evitando desperdícios. A Agricultura Inteligente, ou Agricultura 4.0, está se desenvolvendo além dessas aplicações, melhorando o uso de dados

espaciais em tempo real. Com esses sistemas, que incluem sensores, veículos agrícolas inteligentes, drones e robôs autônomos, os agricultores podem responder rapidamente a mudanças significativas no clima, na umidade e na qualidade do ar, bem como na saúde de cada cultura ou solo no campo. A IoT facilita a documentação e a supervisão de diferentes atividades, além da rastreabilidade de produtos, por meio de sistemas de análise, visualização e gestão de dados.

Embora traga muitas vantagens, o uso da IoT na agricultura ainda apresenta desafios significativos devido ao tamanho das fazendas, ao uso frequente de veículos, à quantidade excessiva de dados e às condições altamente variáveis do campo. A transmissão de dados de sensores para a nuvem pode ser realizada de diversas formas, desde comunicações com cabos até tecnologias sem fio de várias complexidades. Embora a comunicação com fio possua benefícios importantes, como confiabilidade, privacidade e entrega de energia através dos mesmos cabos, a comunicação sem fio é a tecnologia chave na maioria das aplicações de IoT, que anteriormente não eram possíveis com sistemas com fio.

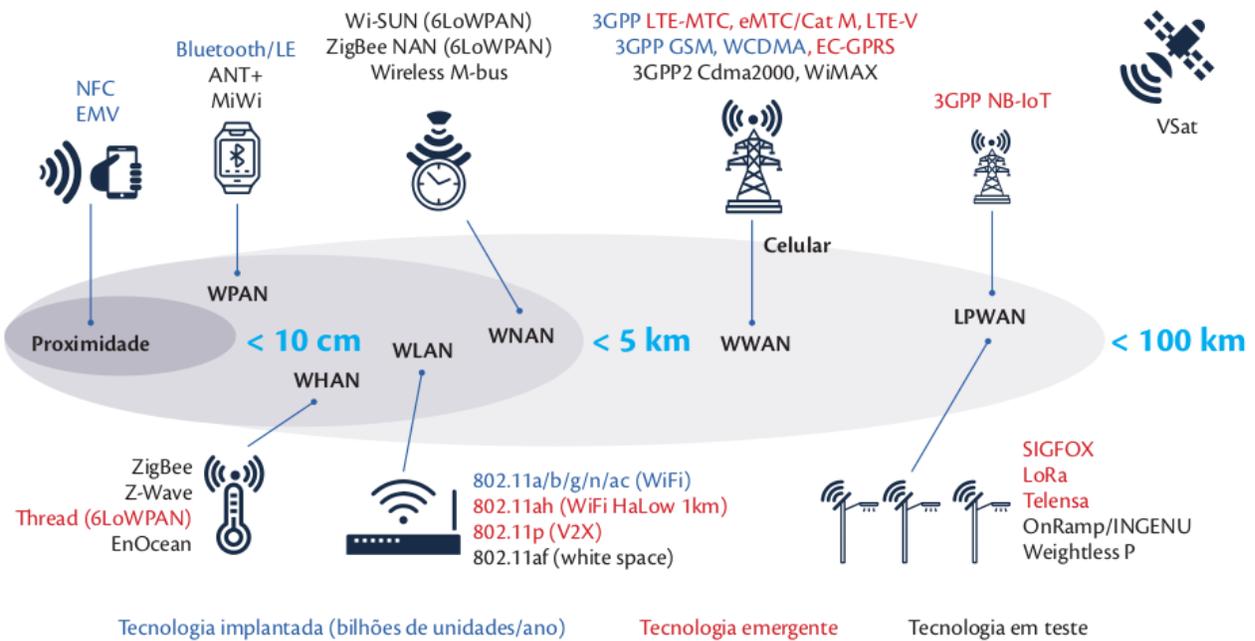
Avanços recentes na tecnologia sem fio têm mitigado ou eliminado algumas das barreiras tradicionais para sua adoção generalizada. Confiabilidade, segurança de canal, longo alcance, baixo consumo de energia, facilidade de uso e baixo custo colocam a tecnologia sem fio em patamares anteriormente considerados impossíveis. Para alcançar essas capacidades, algumas suposições sobre os requisitos finais da aplicação precisaram ser feitas, como a taxa máxima de transferência de dados, assimetria de *uplink/downlink* ou compatibilidade retroativa.

Essa é uma área de intensa pesquisa e desenvolvimento. Portanto, além de alguns rádios sem fio padrão abertos e amplamente populares, existem muitos novos rádios proprietários otimizados para várias aplicações, com mais por vir em breve. Como com sensores, não existe uma solução de rádio sem fio única para a IoT, mas muitas, cada uma com características específicas, adequadas para diferentes aplicações.

2.2.1 Soluções em IoT

Alguns exemplos de tipos de comunicação sem fio para a IoT recentemente populares são: *Wi-Fi*, *Bluetooth Low Energy* (também conhecido como *Smart*), *Zigbee* (e outras variantes *mesh* 802.15.4), celular, LPWA (variantes de rede de baixa potência e ampla área: *Ingenu*, *LoRaWAN*, *Sigfox*, *NB-LTE*, *Weightless*) e Satélites *Iridium*. A Figura 3 mostra as diferentes tecnologias, seu alcance e os protocolos de transferência de dados utilizados.

Figura 3. Diferentes tecnologias, alcances e protocolos de transferência de dados para conectividade e IoT



Fonte: adaptada de Celplan, 2021.

Dependendo do alcance do sinal e do domínio da rede, ela recebe diferentes designações. São elas:

- **NF (Near Field):** conexão de proximidade cujo alcance é inferior a 10 cm. Usado, por exemplo, em *chips* que emitem sinais contendo informações bancárias para transações financeiras (cartão de aproximação), de acesso a instalações, etc.
- **WPAN (Wireless Personal Area Network):** rede sem fio de área pessoal que abrange distâncias curtas, normalmente de até 10 metros. Exemplos incluem *Bluetooth* e *NFC*.
- **WHAN (Wireless Home Area Network):** rede sem fio de área residencial que abrange distâncias curtas, normalmente usada em casas inteligentes para conectar dispositivos e sistemas de automação residencial.
- **WNAN (Wireless Neighborhood Area Network):** rede sem fio de área de vizinhança que abrange distâncias maiores do que uma rede residencial, normalmente usada em comunidades inteligentes para conectar dispositivos e sistemas de automação urbana.
- **WLAN (Wireless Local Area Network):** rede sem fio de área local que abrange distâncias maiores do que uma rede pessoal, normalmente de até algumas dezenas a centenas de metros. Exemplos incluem *Wi-Fi* e *Zigbee*.

- **WMAN (Wireless Metropolitan Area Network):** rede sem fio de área metropolitana que abrange distâncias maiores do que uma rede local, normalmente de até alguns quilômetros. Exemplo inclui WiMAX.
- **LPWAN (Low-Power Wide Area Network):** rede sem fio de área ampla e baixa potência que permite a conexão de dispositivos de IoT em áreas remotas com baixo consumo de energia. Exemplos incluem *LoRaWAN* e *Sigfox*.
- **WWAN (Wireless Wide Area Network):** rede sem fio de área ampla que abrange uma área geográfica maior do que uma rede metropolitana, normalmente com cobertura nacional ou internacional. Exemplos incluem redes celulares como LTE e 5G, além de redes de longa distância dedicadas à IoT, como *LoRaWAN* e *Sigfox*.

NB-IoT (*Narrowband Internet of Things*) e LTE-M (*Long-Term Evolution for Machines*) são tecnologias de redes celulares de baixa potência projetadas especificamente para IoT. Essas tecnologias enquadram-se na categoria LPWAN (*Low Power Wide Area Network*), que fornece uma cobertura mais ampla do que outras tecnologias sem fio de curto alcance, como *Bluetooth* e *Wi-Fi*, enquanto ainda oferecem baixo consumo de energia para suportar dispositivos IoT com longa duração da bateria. Na Figura 4 é apresentado um quadro comparativo entre o uso e a eficiência de várias tecnologias usadas em IoT em diferentes quesitos de conectividade.

Figura 4. Comparação de aplicações a serem consideradas quando da implementação de IoT

	2G/3G GSM/LMTS CDMA*	4G LTE (CTA 1+)	LTE0M (CAT M1 e CAT M2)	NB-IoT	SIGFOX/ INGENU	LoRa
Transmissão de dados (Mbps)						
Tempo de bateria						
Mobilidade						
Atualização remota						
Voz						
Cobertura estendida						
Latência	Baixa	Baixa	Baixa-média	Média	Média	Média
Custo (rádio)	\$	\$\$\$	\$	\$	\$\$	\$\$
Tempo para implementar						
				Parte da futura 5G		Opera em faixas não licenciadas

* Embora a operação 2G esteja encerrada em alguns países, é ainda usada amplamente na Europa e outras regiões.

Fonte: adaptada de ROSENCRANSE, 2020.

NB-IoT e LTE-M são capazes de fornecer conectividade de IoT em áreas remotas e de difícil acesso, como áreas rurais, e são adequados para aplicativos que exigem transmissão de dados com baixa taxa de transferência e longo alcance. Eles também podem ser usados em áreas urbanas para aplicações de IoT em cidades inteligentes, como monitoramento ambiental e gerenciamento de tráfego.

Ambas são tecnologias de comunicação celular que atendem a diferentes requisitos de dispositivos IoT, desde a conectividade de baixa velocidade com baixo consumo de energia até a comunicação de alta velocidade com suporte a QoS (do inglês *Quality of Service*). A escolha da tecnologia adequada dependerá dos requisitos específicos do dispositivo IoT e dos objetivos do aplicativo.

Embora as tecnologias NB-IoT e LTE-M sejam baseadas em redes celulares, elas são projetadas especificamente para aplicações de IoT e têm requisitos diferentes em termos de largura de banda, latência e consumo de energia em comparação com as redes de celular tradicionais.

2.2.2 NB-IoT

O NB-IoT é uma tecnologia de comunicação celular que utiliza a largura de banda estreita em uma rede LTE para fornecer conectividade de baixa velocidade em intervalos regulares para dispositivos IoT com padrões 3GPP (3rd *Generation Partnership Project*) (3GPP, 2016). O NB-IoT usa uma largura de banda de cerca de 200 kHz e é projetado para fornecer cobertura de longo alcance e baixo consumo de energia, permitindo que dispositivos IoT com baterias de longa duração sejam conectados à rede. O NB-IoT é ideal para aplicações que permitam comunicação de baixa velocidade, como medidores inteligentes e sensores de monitoramento remoto. Embora o NB-IoT ofereça muitas vantagens em termos de eficiência energética, cobertura e escalabilidade, há também algumas limitações.

A cobertura do NB-IoT é geralmente menor em comparação com outras tecnologias de rede celular de alta potência, como 4G ou 5G, especialmente em áreas remotas ou densamente arborizadas, o que poderia limitar a utilidade do NB-IoT em alguns cenários. Embora a cobertura do NB-IoT esteja crescendo rapidamente em todo o mundo, a infraestrutura de rede ainda é limitada em algumas regiões, o que pode afetar a disponibilidade e a confiabilidade do serviço.

Como qualquer tecnologia de comunicação, o NB-IoT pode estar sujeito a vulnerabilidades de segurança, incluindo ataques cibernéticos e interceptação de dados. Portanto, é importante implementar medidas de segurança adequadas para proteger os dispositivos IoT e os dados transmitidos.

O padrão de comunicação NB-IoT tem como objetivo permitir que dispositivos IoT operem por meio de redes de operadoras, seja dentro de uma onda de portadora de comunicação GSM (*Global System for Mobile*) existente, em uma “faixa de guarda” não utilizada entre canais LTE ou de forma independente.

Um dos objetivos do NB-IoT é ampliar a extensão de cobertura além do que as tecnologias celulares existentes oferecem. Para isso, o NB-IoT oferece repetições de transmissão e diferentes configurações de alocação de largura de banda na transmissão de *uplink*. O NB-IoT pode permitir uma ampla gama de novos dispositivos e serviços.

Dispositivos e sensores especialmente projetados são os componentes básicos em sistemas NB-IoT. Esses dispositivos coletam informações de seu entorno e as transmitem para estações-base NB-IoT ou nós de transmissão. Estações-base individuais estão conectadas a um *gateway* IoT e servidores de aplicativos em nuvem IoT para monitoramento e análise de dados centralizados.

O NB-IoT emprega uma nova camada física com sinais e canais para atender aos requisitos de cobertura estendida em áreas rurais e interiores profundos, propiciando baixa complexidade de

dispositivos. A tecnologia subjacente é muito menos complexa do que a de módulos GSM/GPRS e, em geral, é suportado por todos os principais fabricantes de equipamentos, *chipsets* e módulos móveis e pode existir junto com redes móveis 2G, 3G e 4G.

A tecnologia pode ajudar a suportar números massivos de dispositivos estabelecendo redes NB-IoT passíveis de conexão com bilhões de nós. Projetado para cobertura estendida em interiores, a menor complexidade dos dispositivos oferece conectividade e comunicação de longo alcance. Além disso, não exige um sistema operacional pesado, como o Linux, ou demasiado processamento de sinal, o que a torna mais eficiente em termos de energia em comparação com outras tecnologias celulares.

2.2.3 LTE-M

A LTE-M é uma tecnologia de comunicação celular que utiliza a rede LTE para fornecer conectividade de alta velocidade para dispositivos IoT. A LTE-M usa uma largura de banda mais ampla que o NB-IoT, com taxas de transferência de dados de até 1 Mbps, e é projetada para fornecer comunicação de alta QoS, suporte a *roaming* e comunicação bidirecional, o que permite que dispositivos IoT executem funções mais avançadas, como atualizações de *firmware* e controle remoto de dispositivos. É ideal para aplicativos que exigem comunicação de alta velocidade, como sistemas de rastreamento e telemetria.

LTE (do inglês *Long-Term Evolution*) é uma tecnologia de comunicação sem fio desenvolvida inicialmente para redes 4G. Foi padronizada pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), um consórcio internacional de organizações de padronização de telecomunicações, tendo sido lançada comercialmente em 2009. Ela foi desenvolvida como uma evolução das tecnologias de rede 3G e projetada para fornecer altas velocidades de dados, largura de banda larga e baixa latência para aplicações móveis, como vídeo, jogos e navegação na web.

A tecnologia LTE permite que os usuários acessem a internet de alta velocidade com seus *smartphones*, *tablets* e outros dispositivos móveis, independentemente de seu local ou de sua operadora de rede. Além disso, é compatível com vários padrões globais, o que facilita a *roaming* internacional e a interconexão de redes em diferentes regiões do mundo.

O CAT-M1 (Categoria M1) é uma designação que se refere aos dispositivos que utilizam a tecnologia LTE-M para comunicação celular. Os dispositivos CAT-M1 possuem uma largura de banda mais ampla do que o NB-IoT, possibilitando taxas de transferência de dados mais rápidas, mas com menor consumo de energia do que dispositivos LTE convencionais. O CAT-M1 é ideal para aplicativos que exigem comunicação de velocidade moderada, mas com baixo consumo de energia, como dispositivos de saúde e bem-estar, automação de edifícios e gerenciamento de ativos.

Na Tabela 1 são apresentados alguns requisitos para serviços baseados em LTE. Atualmente, a tecnologia LTE é amplamente utilizada em todo o mundo e está sendo evoluída para a quinta

geração de tecnologias de rede móvel (5G), que oferece ainda mais velocidade, larguras de banda e capacidade de dados.

Tabela 1. Requisitos dos serviços LTE

Categoria	Requisitos
Taxa de dados (pico)	DL: 100Mbps in 20MHz (5 bps/Hz) UL: 50Mbps in 20MHz (2,5 bps/Hz)
Plano controle latência	<100ms de espera a modo transição
Plano controle capacidade	>200 usuários por célula em modo ativo em 5MHz
Plano usuário latência	<5ms para 1 usuário com 1 fluxo de dados e pacote pequeno de IP
Taxa média de transferência do usuário	DL: 3-4 vezes HSDPA por MHz UL: 2-3 vezes HSDPA por MHz
Mobilidade	Otimizada para 0-15km/h Suporte com alto desempenho em 15-120km/h Suporte pra 120-350km/h ou até 500km/h
Cobertura	Todos os alvos em células de 5km Pequena degradação para células de 5-30km Suporte para células de 30km
Flexibilidade do espectro	Suporte para bandas de 1,25-20 MHz Alocação de espectro pareado ou não-pareado

Fonte: adaptada de Saxena, 2016.

O LTE-M (de LTE-*Machine*) é uma tecnologia de comunicação sem fio de baixa potência projetada especificamente para dispositivos da IoT que exigem transmissão de dados em baixas taxas de dados. Trata-se de uma evolução do padrão LTE que oferece uma largura de banda reduzida e menor consumo de energia, tornando-o ideal para aplicações de IoT com dispositivos de baixo consumo de energia, como sensores, dispositivos de rastreamento, medidores inteligentes e outros. O LTE-M suporta uma largura de banda mais ampla, de até 1,4 MHz.

Enquanto a IoT é uma plataforma ampla e genérica para conectar vários dispositivos à internet, o LTE-M é projetado para reduzir significativamente o consumo de energia em comparação com outras tecnologias de rede sem fio, permitindo que os dispositivos IoT possam operar por mais

tempo em baterias. A IoT não tem uma abordagem específica para reduzir o consumo de energia, embora os dispositivos possam ser projetados para incorporar essa característica.

O LTE-M oferece velocidades de transferência de dados mais baixas em comparação com outras tecnologias LTE, pois é projetado para suportar dispositivos com requisitos de largura de banda mais baixos. A IoT não tem limitação de largura de banda. Esta dependerá das tecnologias de rede sem fio usadas pelos dispositivos para conectividade.

O LTE-M pode ser implantado em áreas com cobertura LTE, permitindo que os dispositivos IoT se comuniquem em áreas remotas com baixa conectividade. A IoT depende da cobertura de rede sem fio disponível em cada área.

Uma das principais diferenças entre NB-IoT e LTE-M é a largura de banda. Enquanto o NB-IoT usa uma largura de banda mais estreita, o LTE-M usa uma banda mais larga, proporcionando taxas de transferência de dados mais altas e latência mais baixa. Na Tabela 2 é apresentado o comparativo entre as duas tecnologias.

Tabela 2. Comparação entre as tecnologias NB-IoT e LTE-M

	NB-IoT	LTE-M
Largura de banda	~180 kHz 3GPP licenciada	1,4 MHz 3GPP licenciada
Taxa de transferência de dados (pico)	<100 kbps	384 kbps
Velocidade UL/DL	27,2 / 62,5 kbps	Até 1Mbps
Latência	1,5-10 s	50-100 ms
Vida útil de bateria	+10 anos (dependendo do uso)	10 anos (dependendo do uso)
Consumo de energia	Melhor em baixas taxas	Melhor em taxas médias
Custo por módulo	US\$ 5-10	US\$ 10-15
Frequências	Flexível	Dentro da banda LTE
Acesso em edificações	Excelente	Bom
Voz	Não	Sim (VoLTE)

Fonte: adaptada de Accent Systems, [2021](#).

Outra diferença é sua finalidade. O NB-IoT é projetado para suportar aplicativos que requerem baixas taxas de dados e longa vida útil da bateria, enquanto o LTE-M é direcionado a aplicativos que exigem taxas de dados mais altas e latência mais baixa.

Finalmente, o custo dos dispositivos LTE-M geralmente é mais alto do que o custo dos dispositivos NB-IoT em razão da maior complexidade da tecnologia.

2.3 Arquitetura das gerações 4G e 5G de redes móveis

No final de 2021, cerca de 55% da população mundial usava internet através de seus aparelhos de celular (4,3 bilhões de pessoas), um aumento de 300 milhões de usuários (9%) em relação a 2021 segundo relatório da GSMA Intelligence (GSMA, 2022). Esse crescimento foi quase totalmente impulsionado pelas camadas da população de mais baixa renda, que adotaram o serviço.

Especificamente na América do Norte, o mercado de telefonia celular está maduro, com uma penetração de cerca de 80% em 2021, de acordo com a GSMA (GSMA, 2021). Espera-se que o crescimento do mercado seja mais lento nos próximos anos, com a adição de cerca de 20 milhões de novos assinantes até 2025. A tecnologia 5G está sendo implantada em todo o continente, e espera-se que sua cobertura alcance mais de 90% da população até 2025, o que deve impulsionar o crescimento do mercado de dispositivos 5G e serviços relacionados.

A arquitetura do 4G (quarta geração) é de uma rede móvel que permite a comunicação de dados mais rápida e eficiente em comparação com as gerações anteriores. Essa arquitetura é composta por três partes principais: a rede central, a rede de acesso e os dispositivos de usuário final.

A rede central é composta pelo núcleo da rede (*core network*) e pelo sistema de autenticação e autorização de usuários (AAA). O núcleo da rede é o cérebro da rede, que gerencia a autenticação e a autorização de usuários, bem como o encaminhamento de tráfego entre as diferentes partes da rede. O AAA é responsável por autenticar os usuários, autorizar seus acessos e monitorar suas atividades.

A rede de acesso é composta por estações rádio base (ERBs) e nós de rede de acesso (RAN). As ERBs são responsáveis por fornecer conexão sem fio entre os dispositivos de usuário e a rede de acesso. Os nós de RAN são responsáveis por controlar e gerenciar as ERBs e por transmitir os dados entre os dispositivos de usuário e a rede central.

Os dispositivos de usuário final são os *smartphones*, os *tablets*, os *modems* e outros dispositivos que se conectam à rede 4G. Esses dispositivos utilizam as ERBs para se conectar à rede e acessar outros serviços oferecidos.

A rede 4G também inclui a tecnologia LTE (*Long Term Evolution*), que permite uma maior largura de banda e melhor eficiência espectral. O LTE é uma tecnologia de acesso sem fio que oferece uma experiência de usuário mais rápida e eficiente. A tecnologia LTE também é compatível com

a tecnologia 3G, o que significa que os usuários podem se conectar a redes 3G e 4G usando o mesmo dispositivo.

A rede 5G (quinta geração) oferece uma série de melhorias em relação às gerações anteriores, incluindo maior largura de banda, latência reduzida, maior densidade de dispositivos conectados e maior eficiência energética. Ela pode ser usada para:

- conectar máquinas e equipamentos industriais em tempo real, permitindo o monitoramento e o controle remoto de processos de produção. Isso pode aumentar a eficiência, reduzir os custos e melhorar a segurança dos trabalhadores;
- conectar sensores e dispositivos em toda a cidade, possibilitando o monitoramento e a análise de dados em tempo real. Essa ação pode refinar a gestão do tráfego, a segurança pública, a gestão de resíduos e outras funções urbanas;
- permitir a telemedicina e outras formas remotas de cuidados de saúde, proporcionando aos pacientes sua monitoração em tempo real e tratamento em casa, o que pode aperfeiçoar o acesso aos cuidados de saúde, reduzir os custos e elevar a qualidade dos serviços;
- aprimorar a experiência de entretenimento, viabilizando a transmissão de conteúdo em alta resolução e em tempo real, incluindo a transmissão de eventos esportivos, jogos *on-line* e *streaming* de filmes;
- facilitar a comunicação entre veículos autônomos e a infraestrutura rodoviária, oportunizando aos veículos a troca de informações, evitando assim a ocorrência de colisões. Isso pode melhorar a segurança e a eficiência do transporte, entre outras aplicações.

A rede central é composta pelo Núcleo da Rede (*Core Network*) e pelo sistema de autenticação e autorização de usuários (AAA, do inglês *Authentication, Authorization, and Accounting*). O núcleo da rede 5G é baseado em uma arquitetura de nuvem, conhecida também como *cloud-native*, que permite a implantação flexível de funções de rede em diferentes locais e a escalabilidade dinâmica de recursos. O sistema AAA é responsável por autenticar os usuários, autorizar seus acessos e monitorar suas atividades.

A rede de acesso é composta por estações rádio base (ERBs) e nós de rede de acesso (RAN, do inglês *Radio Access Networks*). As ERBs 5G são projetadas para serem flexíveis e escaláveis, possibilitando a implantação de antenas inteligentes para refinar a cobertura e a eficiência espectral. A rede de acesso 5G também inclui a tecnologia de múltiplas antenas (MIMO, do inglês *Multiple Input Multiple Output*) para melhorar a largura de banda e a eficiência espectral. Os nós de RAN 5G são projetados para serem inteligentes e programáveis, oportunizando a implantação de funções de rede em diferentes locais.

Os dispositivos de usuário final 5G são projetados para suportar a conectividade de alta velocidade e a baixa latência oferecidas pela rede 5G. Esses dispositivos incluem *smartphones*,

tablets, laptops, veículos autônomos e outros dispositivos que se conectam à rede 5G. A arquitetura 5G também suporta dispositivos de baixo consumo de energia e baixa largura de banda, conhecidos como dispositivos de IoT.

A arquitetura de rede 5G também inclui três tipos de serviços: serviços de eMBB (banda larga móvel aprimorada), serviços de URLLC (comunicações ultra confiáveis e de baixa latência) e serviços de mMTC (comunicações massivas de máquina). Esses serviços são projetados para atender às necessidades de diferentes aplicativos e casos de uso, como *streaming* de vídeo, comunicação de veículos autônomos e sensores IoT.

A rede 5G é projetada para suportar uma ampla variedade de aplicativos e casos de uso, oferecendo maior largura de banda, latência reduzida, maior densidade de dispositivos conectados e maior eficiência energética. A noção de nuvem nativa e a inteligência programável tornam a rede 5G flexível e escalável, o que permite a implantação de funções de rede em diferentes locais e a adaptação a diversos cenários de uso.

2.4 Outras tecnologias para conectividade

Como visto anteriormente, as tecnologias IoT são projetadas para permitir a conectividade de dispositivos que possuem recursos limitados, como baixo consumo de energia, baixa largura de banda e baixa capacidade de processamento. Algumas alternativas para tecnologias IoT incluem:

- LoRa (do inglês *Long Range*) é uma tecnologia sem fio de baixa potência que usa frequências de rádio não licenciadas para comunicação de longa distância. A arquitetura de rede é baseada em uma topologia de rede estrela, com um ou mais *gateways* que se comunicam com dispositivos finais. A banda de frequência utilizada varia de acordo com a região, mas geralmente está entre 868 e 915 MHz.
- *Sigfox* é uma tecnologia de rede de longa distância e baixa potência que usa rede de *gateways* para fornecer conectividade IoT. A arquitetura de rede é baseada em topologia de rede estrela, com um ou mais *gateways* que se comunicam com dispositivos finais. A banda de frequência utilizada varia de acordo com a região, mas geralmente está entre 868 e 915 MHz.
- *Zigbee* é uma tecnologia sem fio de baixa potência que usa a arquitetura de rede em malha para permitir a comunicação entre dispositivos finais e *gateways*. A banda de frequência utilizada varia de acordo com a região, mas geralmente está entre 868 e 915 MHz.
- *Thread* é uma tecnologia sem fio de baixa potência que usa a arquitetura de rede em malha para permitir a comunicação entre dispositivos finais e *gateways*. A banda de frequência utilizada é geralmente de 2,4 GHz.

- *Bluetooth Low Energy* (BLE) é uma tecnologia sem fio de baixa potência que usa a arquitetura ponto a ponto, para permitir a comunicação entre dispositivos finais e *gateways*. A banda de frequência utilizada é geralmente de 2,4 GHz.

Existem muitas empresas que fornecem soluções para IoT, desde fabricantes de dispositivos até fornecedores de plataformas de *software*.

2.5 Fornecedores e cadeia produtiva

A cadeia produtiva de IoT é composta por várias etapas, incluindo *design* de *hardware*, desenvolvimento de *software*, fabricação, distribuição, implantação e gerenciamento de dispositivos. Essa cadeia inclui fabricantes de *chips* e dispositivos, provedores de conectividade, fornecedores de plataforma e prestadores de serviços gerenciados.

Entre os principais fornecedores de soluções em IoT, podemos citar:

- **Fabricantes de dispositivos:** empresas que produzem sensores, medidores, atuadores e outros dispositivos conectados à internet, como a Intel, a Samsung, a Siemens e a Bosch.
- **Provedores de conectividade:** empresas que oferecem soluções de conectividade para que os dispositivos IoT possam enviar e receber dados, como a Claro, a Vivo, a TIM e a Ericsson.
- **Fornecedores de plataformas IoT:** empresas que criam plataformas e *softwares* que permitem a gestão e a análise dos dados coletados pelos dispositivos IoT, como a Microsoft, a IBM, a Amazon Web Services (AWS) e a Oracle.
- **Empresas de consultoria em IoT:** oferecem serviços de consultoria e assessoria para a implementação de soluções em IoT, como a Accenture, a Deloitte, a Capgemini e a PwC.
- **Empresas de integração de sistemas:** desenvolvem soluções personalizadas para a integração de dispositivos e sistemas de diferentes fornecedores, como a Wipro, a Tata Consultancy Services (TCS) e a Infosys.

2.6 Transmissão de dados intermitente

A transmissão intermitente de dados é uma característica comum dos dispositivos IoT. Em muitos casos, esses dispositivos precisam enviar informações para a nuvem ou para outros dispositivos, mas não podem estar constantemente conectados à rede. Em vez disso, eles transmitem dados em intervalos regulares de tempo ou quando ocorrem eventos específicos.

Existem várias razões pelas quais os dispositivos IoT podem precisar de uma transmissão de dados intermitente, como limitações de energia (baterias pequenas que precisam durar muito tempo). Além disso, alguns dispositivos IoT podem estar localizados em áreas remotas ou inacessíveis, onde a conectividade de rede é limitada. As técnicas de gerenciamento de dados e transmissão intermitente de informações incluem a compactação de dados (que reduz o tamanho das mensagens enviadas) e a agregação de dados (que combina várias mensagens em uma única transmissão). Os protocolos de comunicação mais comumente utilizados pelos dispositivos IoT incluem MQTT, CoAP e HTTP, cada um com suas vantagens e limitações em relação à transmissão de dados intermitente.

MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), CoAP (*Constrained Application Protocol*) e HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*) são três protocolos amplamente utilizados para comunicação entre dispositivos IoT e servidores na nuvem. Tanto o MQTT quanto o CoAP são projetados para suportar redes IoT com largura de banda limitada, recursos limitados de CPU e memória, e oferecem suporte à segurança. O CoAP é geralmente preferido em redes IoT de baixo consumo de energia, enquanto o MQTT é amplamente utilizado em redes IoT que precisam de alta escalabilidade. O HTTP é usado em redes IoT que precisam transmitir grandes quantidades de dados e têm acesso a uma largura de banda maior e recursos de energia mais abundantes.

Os dispositivos IoT são, em geral, projetados com componentes de baixo custo, conectividade LPWAN e escalabilidade em mente. Embora muitos dispositivos compartilhem recursos e tenham *hardwares* comuns, nem todas as aplicações de dispositivos são iguais. A escalabilidade e a prioridade da transmissão de dados definem classes de aplicações e tipos de dispositivos IoT.

CIoT (IoT Crítica, do inglês *Critical IoT*) e MIoT (IoT Massiva, do inglês *Massive IoT*) são categorias de tecnologias de comunicação de dispositivos IoT que possuem requisitos e aplicações distintas, suportando extremos opostos do espectro de casos de uso. A transmissão intermitente de dados pelos dispositivos IoT pode ser realizada tanto através do CIoT quanto do MIoT, dependendo das necessidades específicas do dispositivo e da aplicação. Ambas as tecnologias oferecem soluções para a comunicação eficiente e confiável de dados intermitentes no contexto do IoT.

MIoT refere-se à monitorização de grandes números de dispositivos e sensores para aplicações ligadas a atividades comerciais. Esses dispositivos, implantados em uma área ampla, geralmente são operados por bateria e comunicam pequenas transmissões de dados em intervalos intermitentes. As aplicações para MIoT incluem agricultura, logística de transporte e cidades inteligentes. Períodos longos de latência também não são um problema com MIoT porque as transmissões de dados não são frequentes nem contínuas. Especificamente, esses casos de uso são adequados para redes NB-IoT baseadas em celular, que suportam dispositivos ultraeficientes em energia movidos a bateria.

As aplicações de CIoT têm um conjunto diferente de requisitos em comparação com o MIoT. O volume de dispositivos é significativamente menor, e a demanda por confiabilidade é muito maior. Os casos de negócios para CIoT geralmente lidam com segurança pública, monitoramento de saúde e outras operações remotas sensíveis ao tempo.

Embora o LTE-M desempenhe um papel, o 5G será o habilitador essencial de casos de uso de CloT, como carros autônomos e cirurgia robótica, que requerem controles precisos e respostas dinâmicas. Aplicações como essas exigem cobertura densa, latência ultrabaixa e alta taxa de transferência de dados. Esses recursos são fundamentais para muitos casos de CloT e serão mais bem atendidos com conectividade 5G.

Os dispositivos CloT devem ser ter:

- ultraconfiabilidade;
- baixa latência;
- pequena área de cobertura;
- alto consumo de energia;
- transmissão constante de dados.

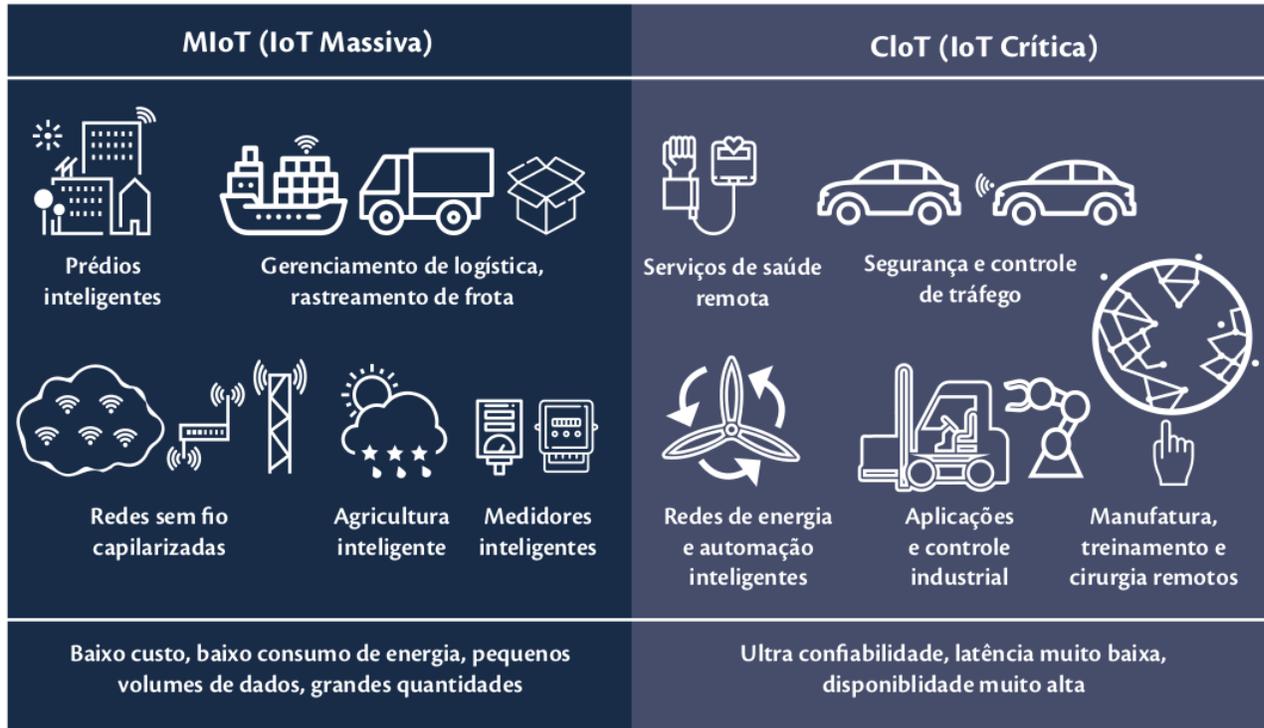
Enquanto os dispositivos MloT devem ser:

- alimentados por bateria;
- eficientes em energia;
- para pequenos volumes de dados e ampla área de cobertura.

Tanto as aplicações de IoT Massivo quanto as de IoT Crítico terão um grande papel na sociedade do futuro, especialmente à medida que as redes 5G forem implementadas e as empresas aproveitarem suas capacidades.

O IoT Massivo está voltado aos dispositivos cotidianos, usados para melhorar ações cotidianas, conectando muitos dispositivos inteligentes nas residências ou possibilitando que empresas gerenciem facilmente uma frota de veículos para monitorar eficiências e manter os custos baixos. Por sua vez, o IoT Crítico representa o potencial futuro para aplicações em grande escala. Na Figura 5 são apresentados exemplos de aplicação e as características de CloT e MloT.

Figura 5. Diferenças entre aplicações de IoT Massiva e Crítica



Fonte: adaptada de Salman, 2019.

2.6.1 Aplicações para CIoT

As aplicações para CIoT envolvem:

- baixo consumo de energia: os dispositivos devem ser capazes de operar por vários anos com baterias ou outras fontes limitadas de energia;
- alta confiabilidade: os dispositivos devem ser capazes de transmitir dados de forma confiável, sem perda de pacotes;
- baixa latência: os dispositivos devem ser capazes de transmitir dados em tempo real;
- segurança: os dados transmitidos devem ser protegidos contra interceptação e uso indevido.

E podem ser aplicadas, por exemplo, no:

- monitoramento de infraestrutura crítica, como linhas de energia, sistemas de abastecimento de água e gasodutos;
- monitoramento de segurança pública, como sensores de detecção de incêndios e câmeras de vigilância;
- monitoramento de saúde, como sensores de monitoramento de pacientes em tempo real;
- automatização de processos críticos, como automóveis autônomos e sistemas de controle de tráfego aéreo.

2.6.2 Aplicações para MIoT

As aplicações para MIoT envolvem:

- baixo custo: os dispositivos devem ser econômicos para produzir e implantar;
- baixo consumo de energia: os dispositivos devem ser capazes de operar por vários anos com baterias ou outras fontes limitadas de energia;
- alta escalabilidade: os dispositivos devem ser capazes de suportar milhões de conexões simultâneas;
- confiabilidade: os dispositivos devem ser capazes de transmitir dados de forma confiável, mesmo em áreas congestionadas.

E podem ser aplicadas, por exemplo, no:

- monitoramento ambiental, como sensores de qualidade do ar e de monitoramento de chuvas;
- gerenciamento de estoque, como sensores de rastreamento de ativos e controle;
- monitoramento de tráfego, como sensores de tráfego e de estacionamento;
- monitoramento de saúde e bem-estar, como sensores de atividade física e monitoramento de sono.

A IoT e seus dispositivos e aplicações vêm sendo desenvolvidos há alguns anos e têm avançado muito em tecnologia e implementação nos mais variados setores, tais como agricultura, saúde, indústria e casas inteligentes (*smart homes*).

Atualmente, existem muitos dispositivos conectados à internet, como sensores, atuadores e outros equipamentos inteligentes, que coletam e transmitem dados, permitindo automatização e monitoramento remoto de processos. Além disso, a evolução de tecnologias como 5G e *Edge Computing* está tornando a IoT mais rápida, confiável e acessível. A tendência é que a IoT continue crescendo e se tornando cada vez mais presente em nossas vidas, apesar dos desafios a serem superados, como segurança, integração de diferentes dispositivos e padronização.

2.7 IoT agrícola

A IoT tem sido utilizada na indústria agrícola para melhorar a eficiência e a produtividade dos cultivos. Sensores de solo e clima monitoram as condições de cultivo em tempo real e fornecem informações sobre umidade, temperatura e nutrientes para subsidiar a tomada de decisão do agricultor. Sistemas de irrigação conectados monitoram a umidade do solo e controlam automaticamente a quantidade de água aplicada aos cultivos, otimizando o uso de recursos e aumentando a produção.

A coleta de dados em larga escala permite a análise de tendências climáticas, solos e plantas, possibilitando ao agricultor tomar decisões informadas sobre cultivos e insumos. Rastreadores GPS podem ser usados para monitorar o progresso da colheita, garantir a qualidade dos produtos e otimizar a logística de transporte.

A implementação da IoT na agricultura pode levar a uma produção mais eficiente, sustentável e rentável, além de ajudar a garantir a segurança alimentar e a proteção do meio ambiente.

Com a urgência de prevenir a degradação ambiental, reduzir o desperdício e aumentar a lucratividade, os agricultores ao redor do mundo estão optando cada vez mais por soluções de gerenciamento de culturas mais eficientes, apoiadas por tecnologias de otimização e controle derivadas da Internet Industrial das Coisas (IIoT).

O conjunto de tecnologias conhecidas como “Agricultura Inteligente” envolve o uso e a aplicação de tecnologias de informação e comunicação inteligentes (IICT) equipadas com aprendizado de máquina (ML), IA, IoT, análises baseadas em nuvem, atuadores e sensores implementados para alcançar maior controle das variabilidades espaciais e temporais com auxílio de sensoriamento remoto via satélite.

2.8 Automação na agricultura

Na Agricultura Inteligente (SA, do inglês *Smart Agriculture*), o monitoramento em tempo real e contínuo do clima – como o crescimento das culturas, as variáveis físicas/químicas das plantas e outros fatores ambientais críticos – permite a otimização da produção, a redução do trabalho e a melhoria dos produtos agrícolas. Práticas como gerenciamento de irrigação, recursos, produção ou operações de fertilização são facilitadas pela integração de sistemas IoT capazes de fornecer informações sobre os múltiplos fatores das culturas. Dessa forma, enquanto a

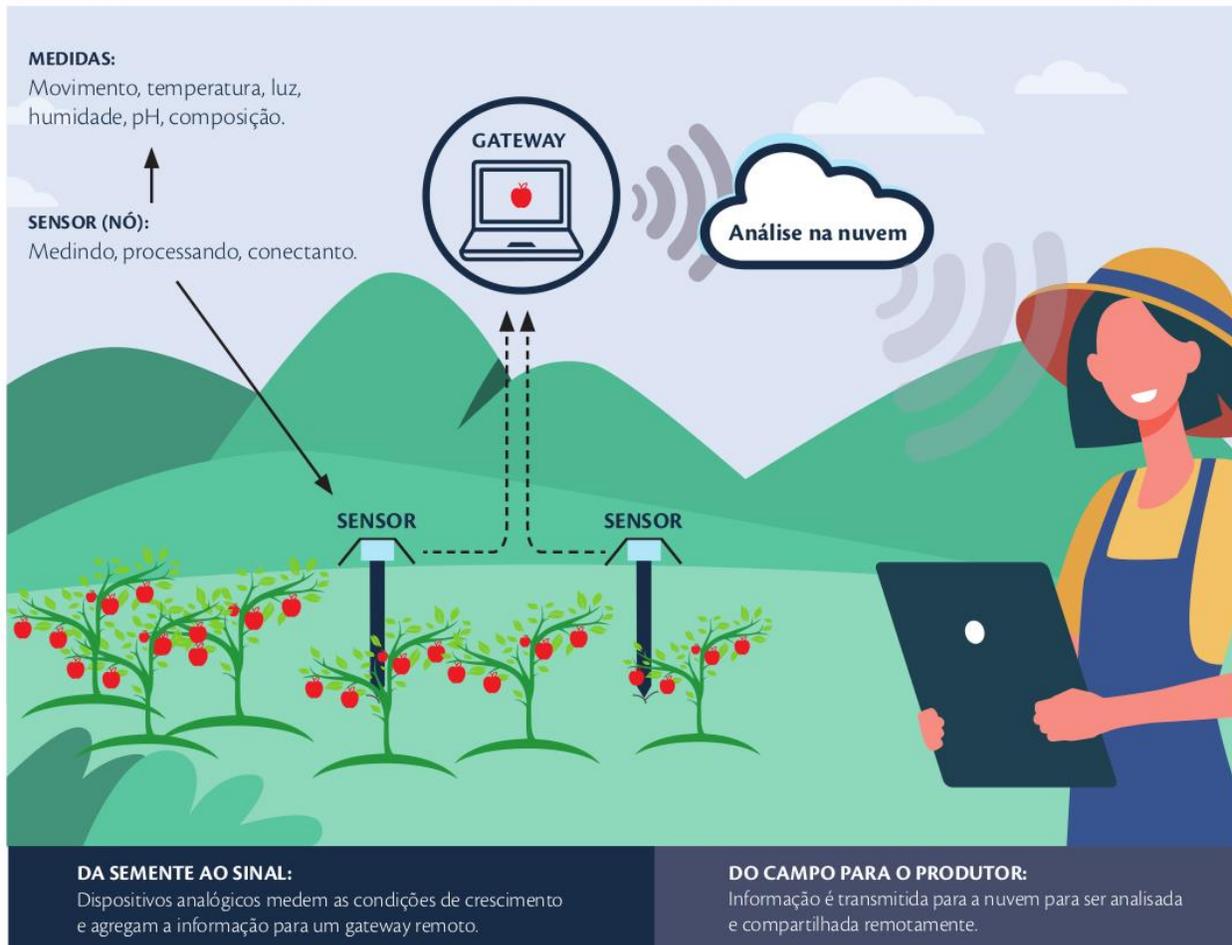
qualidade e a quantidade da produção são aumentadas, os aspectos negativos das práticas agrícolas insustentáveis e dispendiosas também são evitados por meio de atuadores e sensores interconectados avançados.

A democratização da tecnologia pode impulsionar a competitividade dos pequenos produtores, desde a agricultura de pequena escala até a jardinagem urbana. Apesar do enorme potencial da SA, a implantação de soluções de alta tecnologia que sejam menos custosas, acessíveis, confiáveis e duráveis ainda não atingiu o potencial máximo. A limitada cobertura da internet em áreas rurais, especialmente em economias emergentes, dificulta a implantação de tecnologias de SA.

É por isso que a democratização de IICT, incluindo a internet, não é uma discussão de privilégio, sendo crucial para apoiar a transformação sustentável da agricultura, com a qual pequenos agricultores e comunidades rurais também podem se beneficiar do desenvolvimento tecnológico. O IoT pode fornecer soluções para pequenos agricultores, desde o gerenciamento de recursos até a adaptabilidade ao clima, disponibilizando os benefícios das inovações trazidas pela evolução do IoT.

A Figura 6 mostra um sistema típico de baixo orçamento e alta precisão projetado para melhorar a irrigação em hortas urbanas.

Figura 6. Dispositivos medem as condições do solo e as agregam em um *gateway* remoto que as transmite à nuvem, onde são armazenadas e processadas para serem disponibilizadas ao usuário final



Fonte: adaptada de <https://911electronic.com/sustainable-transformation-of-agriculture-with-the-internet-of-things/>

Dados e informações debatidos nas seções iniciais deste estudo mostram que há déficit de oferta de serviço de conectividade nas regiões distantes dos grandes centros urbanos, em especial nas grandes áreas agrícolas. Assim como em outros setores, é desejável que a agropecuária possa ser operacionalizada mediante processos de tomada de decisão mais ágeis e baseados em inteligência proveniente de informações atualizadas em tempo real.

A gestão da cadeia de suprimentos, por exemplo, apresenta um maior valor quando é gerenciada com base em dados fornecidos em tempo real. Ao combinar os mais recentes índices de vendas e informações econômicas e sazonais – como estoque, logística e outras variáveis do lado da oferta –, é possível tomar decisões mais precisas.

A precisão é obtida por meio das ferramentas de Inteligência Ativa, que integram informações de diversas fontes e tipos, combinando dados atuais e históricos. Desse modo, são criados conjuntos dinâmicos e *insights* acionáveis com maior rapidez, além de alertas personalizados.

O mercado de tecnologia aplicada ao agronegócio apresenta um grande potencial de crescimento no Brasil. De acordo com a Associação Brasileira de Automação (GS1 Brasil), o Índice Agrotech, que mensura o grau de automação do setor agropecuário no país, teve um aumento de 12,5% entre os anos de 2019 e 2021 (GS1BRASIL, 2021).

Contudo, ainda há um longo caminho a percorrer para se alcançar uma automação plena no agronegócio brasileiro, uma vez que o índice precisa evoluir em 82 pontos para atingir a pontuação máxima de 100. Isso aponta para a necessidade de se investir cada vez mais em tecnologias avançadas e inovadoras, capazes de otimizar e aprimorar a gestão da produção agrícola e pecuária no país.

A tecnologia IoT possibilita a criação de vestíveis inteligentes (*wearables*), dispositivos conectados, máquinas automatizadas e carros autônomos. Porém, na agricultura a IoT tem impacto ainda maior. Estatísticas recentes da ONU mostram que a população mundial deve atingir 9,6 bilhões até 2050 (UN, 2022). Para alimentar essa população, a indústria agrícola precisará adotar a IoT a fim de enfrentar desafios como as mudanças climáticas e a minimização de impactos ambientais da atividade, além de atender à demanda por mais alimentos.

2.9 O mercado de IoT na agricultura

Nos próximos anos, o uso de soluções inteligentes alimentadas pela IoT aumentará nas operações agrícolas, com alguns relatórios indicando que a instalação de dispositivos IoT na indústria agrícola crescerá a uma taxa anual composta de 20%. O número de dispositivos conectados na agricultura crescerá de 13 milhões em 2014 para 225 milhões até 2024 (INSIDER, 2016).

O mercado de IoT na agricultura deverá crescer de US\$ 11,4 bilhões em 2021 para US\$ 18,6 bilhões em 2026, refletindo uma taxa de crescimento anual composta de 9,8% (METICULOUS RESEARCH, 2022). Os fatores que impulsionam esse crescimento incluem aumento da adoção de inteligência artificial (IA) e IoT pelos agricultores, maior monitoramento da pecuária e da aquicultura, maior demanda do consumidor por produtos frescos, perda de terras aráveis, crescimento populacional e suporte governamental para a agricultura de precisão, dentre outros.

Os meios de conectividade na cidade incluem tecnologias como a fibra óptica, redes de telefonia móvel 4G e 5G, *Wi-Fi*, satélite e rádio. No entanto, essas tecnologias nem sempre estão disponíveis nas regiões rurais devido a diversos fatores, como a distância entre as áreas rurais e as centrais de telecomunicações, a falta de infraestrutura adequada e a baixa densidade populacional. Como resultado, muitas vezes as regiões rurais têm acesso limitado à internet ou nenhuma conexão. Por esse motivo, fornecedores de soluções IoT, bem como proprietários de negócios, enfrentaram desafios de implementação em regiões remotas ou menos desenvolvidas.

3 Conectividade para o agronegócio e comunidades rurais no Brasil

Uma pesquisa do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) divulgada em setembro de 2022 mostra um crescimento na conectividade em áreas rurais brasileiras (IBGE, 2023). O acesso à internet em domicílios no Brasil aumentou de 84% em 2019 para 90% em 2021, com crescimento maior na área rural, passando de 57,8% para 74,7%. O celular é o principal dispositivo de acesso à internet em casa, utilizado em 99,5% dos domicílios com acesso à rede. O acesso à internet pelos idosos aumentou de 44,8% em 2019 para 57,5% em 2021, ano de referência do estudo.

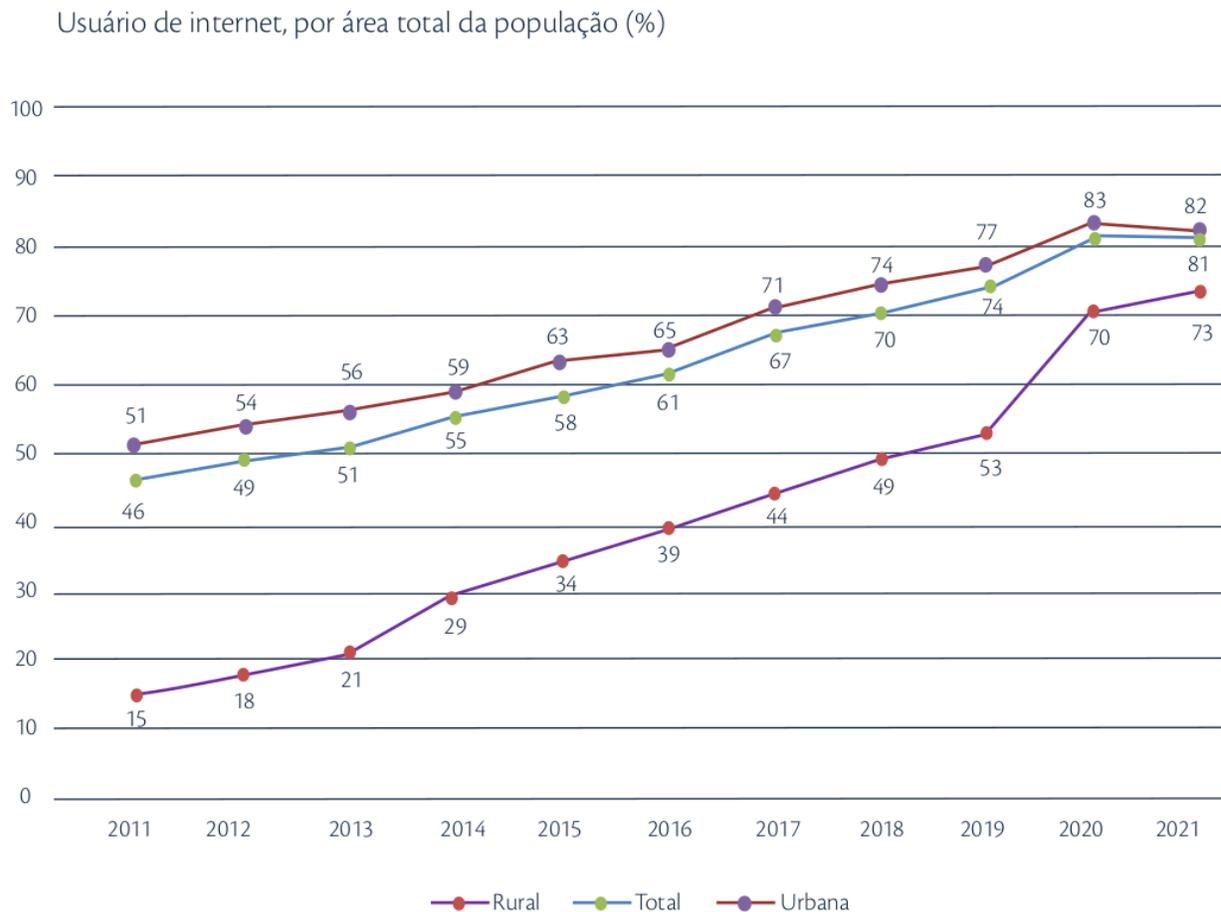
O uso da internet móvel para chamadas de voz ou vídeo superou o das mensagens de texto, voz ou imagens, tornando-se a finalidade mais frequente. A proporção de domicílios com TV caiu de 96,2% para 95,5%, e o acesso à TV por assinatura caiu de 30,3% para 27,8% no país, mas aumentou na área rural, de 16,4% para 17,8%. O percentual de domicílios com conexão à internet por banda larga móvel caiu de 81,2% para 79,2%, enquanto a banda larga fixa aumentou de 78% para 83,5%. Em 2021, 2,2% dos domicílios do país não tinham nenhuma das três formas de acesso à TV digital.

Apenas 46% da população rural brasileira (29 milhões de pessoas) tem acesso à tecnologia 3G, enquanto o 4G atende a 39% dessa população. A implementação do 5G deve ajudar a aumentar significativamente a conectividade nas áreas rurais, trazendo benefícios para agricultores e produtores.

Vale ressaltar que grande parte dos compromissos do leilão do 5G, realizado em novembro de 2021, tem relação com a ampliação da conectividade no interior do país, como expansão do 4G e do *backhaul* de fibra óptica.

De acordo com o estudo “TIC Domicílios”, de 2021, conduzido pelo Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação (Cetic.br), a porcentagem média de residências com acesso à internet cresceu de 71% para 82% ao longo desses dois anos. No entanto, ainda existem 35,5 milhões de pessoas no país que não têm acesso à internet, e o número de domicílios das classes B, C e D/E que possuem computadores diminuiu durante o mesmo período (CETIC, 2021). O aumento foi mais significativo entre os domicílios em áreas rurais, que passaram de 51% em 2019 para 71% em 2021. Por sua vez, nas residências em áreas urbanas a proporção subiu de 75% para 83%, no mesmo período. Esse histórico de crescimento é apresentado na Figura 7.

Figura 7. Crescimento do acesso à internet nos lares brasileiros no período de 2011-2021



Fonte: adaptada de CETIC, 2021.

A pesquisa também identificou que a maioria das residências, tanto em áreas urbanas (64%) quanto rurais (39%), está conectada à internet por meio de fibra óptica ou cabo. A rede móvel é a segunda opção de conexão, com 20% dos domicílios rurais e 17% dos urbanos utilizando-a. Quase todos os usuários acessam a internet por meio de aparelhos celulares, e a televisão ultrapassou os computadores como meio de acesso à internet.

No entanto, é importante ressaltar que apenas 23% do território cultivado possui cobertura de internet, seja ela 3G, 4G ou 5G. De acordo com o relatório do IBGE, a previsão para a área a ser colhida em 2023 é de 90,4 milhões de hectares, representando um crescimento de 3,1% em relação à área colhida em 2022, um aumento de quase 3 milhões de hectares.

A tecnologia 5G pode desempenhar um papel fundamental ao oferecer aos agricultores acesso a dados em tempo real, possibilitando uma gestão mais eficiente da produção e dos recursos agrícolas. Isso pode resultar em maior produtividade e eficiência no setor agrícola, além de melhor qualidade dos produtos e redução de custos.

No que diz respeito ao custo de instalação da tecnologia IoT no campo, ele varia dependendo do relevo do local, mas, em média, gira em torno de um quarto a meia saca de soja por hectare, o que equivale a aproximadamente R\$ 45 a R\$ 95.

Para abordar o problema de conectividade no campo com custos mais baixos, algumas empresas desenvolveram um sistema de conexão 4G que utiliza a faixa de frequência de 700 MHz, anteriormente utilizada pela TV analógica (que foi desligada no país). Essa frequência permite uma cobertura geográfica ampla, alcançando uma área de até 35 mil hectares com uma única antena (CONNECTARAGRO, 2022).

Além disso, estão sendo implementadas outras tecnologias e soluções, como a expansão da rede móvel por meio da instalação de torres de celular e antenas. Também existem projetos de banda larga via satélite e rádio, que possibilitam a conexão de áreas remotas sem a necessidade de infraestrutura física, como cabos de fibra óptica.

Uma iniciativa importante é a implementação de redes comunitárias, em que os moradores locais trabalham em conjunto para criar redes de internet de alta velocidade. Nesse caso, os vizinhos se organizam para uma compra conjunta, tornando o investimento mais viável. Essa abordagem é crucial, uma vez que as grandes empresas de telecomunicações muitas vezes não têm interesse em investir nas áreas rurais devido ao menor retorno financeiro.

Da mesma forma, a falta de infraestrutura de telecomunicações nas áreas rurais tem sido um obstáculo para aproveitar todo o potencial das máquinas agrícolas modernas, que incorporam recursos de conectividade e automação. Muitos desses equipamentos exigem pelo menos a disponibilidade e a estabilidade de uma conexão 4G, o que ainda não é possível na maioria das propriedades rurais brasileiras.

Fabricantes de grandes máquinas agrícolas oferecem contornar o problema de conectividade instalando torres próprias para fornecer sinal a fim de atender o produtor que adquira um número mínimo de máquinas. Porém, isso pode custar milhões de reais, ou seja, um investimento muito além das possibilidades da maioria dos produtores, os quais acabam não sendo beneficiados pela tecnologia.

Assim, para garantir que os benefícios da conectividade alcancem os habitantes das zonas rurais de forma inclusiva, é necessário investir em infraestrutura de telecomunicações que proporcione acesso à internet de alta velocidade e qualidade. Além disso, é fundamental promover a capacitação e o treinamento da população rural, de modo que possa utilizar as tecnologias de forma eficiente e segura.

É importante considerar que, assim como nas áreas urbanas, a conectividade no campo deve ser inclusiva, levando em conta as necessidades e as particularidades dos diferentes grupos sociais. É essencial garantir que todos os habitantes rurais tenham acesso à internet e possam desfrutar dos benefícios proporcionados pela conectividade.

Apesar dos avanços na conexão de internet no campo nos últimos anos, impulsionados pela colaboração entre fabricantes de máquinas agrícolas e produtores rurais, apenas 23% do espaço

agrícola brasileiro possui algum nível de cobertura de internet, de acordo com um levantamento do Ministério da Agricultura e Pecuária (Mapa).

A falta de conexão disponível prejudica a eficiência, o tempo e o dinheiro dos gestores, que não conseguem tomar decisões qualificadas e imediatas. A tecnologia atual permite ter todas as informações sobre a operação do equipamento, as condições do solo e do clima em tempo real, mas a falta de conectividade impede o aproveitamento total desse potencial, como mostrado na Figura 8.

Figura 8. Máquinas modernas permitem o monitoramento via sinal de internet



Fonte: elaborada pelo autor.

3.1 Agricultura Inteligente

A Agricultura Inteligente, por meio da aplicação de dispositivos conectados e tecnologias inovadoras, é um sistema eficaz de alta tecnologia para produzir alimentos de forma mais sustentável. Sua base principal é a IoT, que permite a integração de diversos dispositivos e a coleta de dados em tempo real, reduzindo a necessidade de trabalho físico dos agricultores e promovendo maior produtividade, uso eficiente da água e otimização dos insumos.

Uma das vantagens da Agricultura Inteligente é a capacidade de integrar dados provenientes de diferentes fontes e sistemas, o que proporciona uma visão mais completa e detalhada da lavoura e do sistema de produção como um todo. Essa integração de dados ajuda a identificar padrões, tendências e também a detectar problemas e oportunidades de melhoria.

Além disso, a Agricultura Inteligente possibilita o uso de técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina para analisar e interpretar grandes volumes de dados de forma automatizada. Essa análise automatizada auxilia na identificação de padrões e *insights* que seriam difíceis de ser detectados manualmente.

Na Agricultura Inteligente, os *dataloggers* desempenham um papel importante, registrando dados ambientais e armazenando-os em sistemas de aquisição de dados. Eles são úteis para monitorar o ambiente em que as culturas estão crescendo e controlar as condições de armazenamento de produtos agrícolas.

Os *softwares* de gestão agrícola são ferramentas essenciais para o gerenciamento das operações diárias em uma fazenda. Eles permitem a organização de informações, o controle do estoque de insumos, a programação de plantio, o rastreamento de safras, a gestão de funcionários e o monitoramento do desempenho financeiro.

As imagens de satélite também desempenham um papel importante na Agricultura Inteligente, sendo especialmente úteis para a análise de grandes áreas de terra e a detecção de mudanças ao longo do tempo. Com essas imagens é possível identificar áreas que requerem mais atenção, como regiões de seca ou excesso de umidade, além de detectar áreas com presença de plantas daninhas ou doenças.

Essas imagens podem também ser usadas para a previsão de safras e o planejamento de cultivos, facultando ao produtor a tomada de decisões informadas sobre quando plantar, irrigar e colher. Além disso, podem ser usadas para monitorar a expansão urbana e as mudanças no uso do solo, que é importante para a gestão sustentável do meio ambiente e para evitar conflitos relacionados ao uso da terra.

Sensores em rede podem automatizar processos de campo e o gerenciamento de culturas, fornecendo informações dinâmicas, relevantes e em tempo real para os agricultores. Umidade, condições do solo, ameaças de pragas e muito mais podem ser identificadas, e medidas preventivas, tomadas. Isso reduz o trabalho manual e o tempo de reação, dando ao agricultor um conhecimento aprimorado para tomar decisões estratégicas. Os sensores podem ser calibrados para monitorar e interagir com sistemas de automação para ajustar os níveis de temperatura e umidade e, dessa forma, otimizar as condições de armazenamento, fazendo com que as colheitas durem mais tempo.

Os sensores também podem detectar pragas e doenças nas plantas, permitindo que os agricultores tomem medidas preventivas e corretivas para garantir a saúde das plantas e a produtividade das colheitas. Além disso, podem ser usados para monitorar a umidade do solo,

possibilitando que os agricultores saibam quando é hora de irrigar as plantas, economizando água e reduzindo os custos de produção.

A tecnologia IoT também está disponível para o monitoramento e o gerenciamento da pecuária. Etiquetas ou coleiras habilitadas para IoT podem ajudar os proprietários a manter a saúde do rebanho. Esta é outra instância de automação que alivia tarefas manuais ou repetitivas.

O *Big Data* é uma tecnologia que permite coletar, armazenar, processar e analisar grandes quantidades de dados em tempo real. Quando aplicado à agricultura, o *Big Data* pode ajudar os produtores a entender melhor suas plantações e a tomar decisões mais informadas.

Ao coletar e analisar informações sobre condições climáticas, tipos de solo, uso de fertilizantes e pesticidas e outros fatores, o *Big Data* pode ajudar a identificar padrões e tendências que seriam difíceis de se perceber de outra forma. Isso pode levar a uma produção mais eficiente, com menos desperdício de recursos e menor impacto ambiental. Além disso, o Big Data também pode ser usado para prever e prevenir adversidades, como a propagação de doenças nas plantações.

Já faz muito tempo desde que os sensores foram introduzidos nas operações agrícolas. Mas a dificuldades com a abordagem tradicional de utilização da tecnologia de sensor era a não obtenção de dados dos sensores em tempo real. Os sensores costumavam registrar os dados em sua memória e, posteriormente, eles poderiam ser transmitidos e utilizados.

Com a introdução da IoT Industrial na Agricultura, sensores muito mais avançados estão sendo utilizados, agora estão na nuvem via rede celular/satélite, o que permite conhecer os dados em tempo real, tornando a tomada de decisão mais efetiva.

Por sua vez, as aplicações da IoT na indústria agrícola ajudam os agricultores a monitorar os níveis de água nos reservatórios em tempo real, tornando o processo de irrigação mais eficiente. O avanço da tecnologia IoT nas operações agrícolas trouxe o uso de sensores em cada etapa do processo de cultivo, como quanto tempo e recursos uma semente leva para se tornar um vegetal completamente desenvolvido.

A IoT na Agricultura surgiu como uma segunda onda da revolução verde. Os benefícios que os agricultores estão obtendo ao adotar a IoT são duplos: ajudou os agricultores a reduzir seus custos e a aumentar o rendimento ao mesmo tempo, melhorando a tomada de decisões com a utilização de dados precisos.

3.2 O campo conectado

As transformações digitais e ambientais precisam ser incentivadas para aumentar a produtividade do agronegócio brasileiro, gerando empregos e abrindo um enorme espaço para inovação e empreendedorismo. Uma solução chamada campo conectado permite gerar, cruzar

e analisar dados por meio de aprendizado de máquina, inteligência artificial e análise em tempo real, auxiliando na tomada de decisões.

A agricultura de precisão impulsiona o crescimento mencionado anteriormente, além de ser uma prática em alta demanda, especialmente diante das mudanças nos padrões climáticos e da diminuição de recursos, que aumentam a urgência em otimizar a produção de culturas. Por meio do uso de dispositivos IoT, como sensoriamento remoto, orientação, monitoramento de rendimento, mapeamento de campo, entre outros, a agricultura de precisão torna-se possível.

A aplicação da IoT na agricultura possibilita a análise de dados agrícolas em larga escala. Ela permite analisar tendências climáticas, solos e plantas, auxiliando na tomada de decisões informadas sobre cultivos e insumos. Esses dados também podem ser utilizados para criar modelos preditivos que preveem o crescimento do cultivo e o rendimento da colheita. No entanto, a implementação da IoT na agricultura enfrenta desafios relacionados à cobertura limitada de rede e à segurança de dados, uma vez que as informações coletadas podem incluir dados sensíveis, como localização de cultivos e condições de solo.

A conectividade também pode contribuir para melhorar a educação nas comunidades rurais, proporcionando aos estudantes acesso a recursos educacionais *on-line* e programas de educação a distância. Isso pode aumentar o nível de escolaridade e o conhecimento das comunidades rurais, criando oportunidades de emprego mais amplas e salários melhores. Além disso, a conectividade permite que as comunidades rurais tenham acesso a serviços básicos, como cuidados de saúde, segurança e serviços bancários *on-line* sem que os produtores rurais precisem percorrer longas distâncias até a cidade. Isso contribui para melhorar a qualidade de vida e reduzir o custo de vida no meio rural.

Além disso, a conectividade no campo possibilita o uso de sistemas de agricultura de precisão, que combinam dados de diferentes fontes para oferecer uma visão holística das operações agrícolas. Isso inclui o mapeamento detalhado do campo, análise de produtividade e rendimento de culturas, além de previsões de clima e análise de mercado. Com essas informações, os engenheiros agrônomos podem tomar decisões estratégicas, como a seleção de culturas mais adequadas para determinada região, planejamento de safras e estratégias de marketing, tudo isso visando maximizar os resultados econômicos para os agricultores.

É fundamental ressaltar que cada região do Brasil possui demandas e características específicas em termos de conectividade no campo. É importante que os engenheiros agrônomos conheçam profundamente as necessidades locais, como a cobertura de rede, os tipos de culturas predominantes, as condições climáticas, a infraestrutura existente e até mesmo as preferências dos agricultores. Com esse conhecimento é possível otimizar as soluções de conectividade para atender às demandas específicas de cada região, garantindo que os benefícios sejam alcançados de maneira mais eficiente e econômica.

Portanto, para que esses benefícios sejam alcançados é necessário superar desafios técnicos e garantir a segurança dos dados. É crucial conhecer as demandas específicas de conectividade de cada região do país a fim de encontrar soluções otimizadas para cada caso.

4 Mapeamento da demanda por conectividade: detalhamento das variáveis utilizadas no modelo – formação de *clusters*

Conforme visto nos capítulos anteriores, a demanda por conectividade no setor agrícola é crescente, impulsionada pela necessidade de acesso a informações em tempo real e soluções tecnológicas para aprimorar a eficiência e a produtividade dos cultivos. A formação de *clusters* agrícolas tem se mostrado uma estratégia promissora para impulsionar a inovação e a competitividade do agronegócio por meio da integração de produtores rurais, empresas, instituições de pesquisa e entidades governamentais.

Para mapear a demanda por conectividade em *clusters* agrícolas é necessário considerar uma série de variáveis que influenciam a adoção de tecnologias e a busca por soluções de conectividade.

4.1 Bases de dados

Neste estudo, a metodologia de classificação da demanda por conectividade rural utilizou as seguintes variáveis primárias: mapa de uso do solo, localização de terras indígenas (homologadas e regularizadas), unidades de conservação (proteção integral), densidade fundiária, densidade populacional, média do valor de produção, localização de frigoríficos, silos, usinas e pontos de irrigação, localização das escolas em zonas rurais e localização de rodovias. Essas variáveis foram selecionadas utilizando diferentes bases de dados georreferenciadas.

O mapa de cobertura e uso da terra no Brasil foi produzido pelo Projeto Brasileiro de Mapeamento Anual de Uso e Cobertura do Solo (Mapbiomas) (SOUZA *et al.*, 2020), que se tornou uma referência para o Brasil. O Mapbiomas produz mapas anuais de cobertura e uso da terra tomando por base a classificação, *pixel a pixel*, de imagens de satélites Landsat, de forma totalmente automatizada e integrada ao Google Earth Engine.

Foi utilizado o mapa de 2020 da Coleção 7 do Mapbiomas. A partir da base de dados da Fundação Nacional do Índio (Funai) foram selecionadas as Terras Indígenas (TI) classificadas como homologadas e regularizadas. Informações das Unidades de Conservação de Proteção Integral (UCPI) foram obtidas da base de dados do Ministério do Meio Ambiente (MMA). A densidade fundiária foi calculada com base na malha fundiária (SPAROVEK *et al.*, 2019), quantificando o número de propriedades em um *pixel* de 1 km².

A densidade populacional, por sua vez, foi extraída da base de dados do WorldPop (WORLDPOP, 2020), e os dados selecionados foram computados utilizando o método *top-down* (de cima para baixo) sem restrições.

O valor de produção dos estabelecimentos e o número de estabelecimentos agropecuários por município do Censo Agropecuário 2017 foram utilizados para computar a média do valor de

produção. Os dados de usinas de açúcar e etanol foram obtidos do mapeamento realizado pela União Nacional da Bioenergia (Udop).

A localização dos principais silos de grãos do Brasil foi gerada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) com base nos dados disponíveis no Banco de Informações e Mapas de Transportes do Plano Nacional de Logística dos Transportes (BIT-PNLT) – Ministério dos Transportes.

As informações georreferenciadas dos frigoríficos utilizadas foram da base de dados do Trase (TRASE, 2022). Para este estudo foram consideradas as localizações dos frigoríficos classificados como “confirmado” ou “provável”, o que indica que os frigoríficos selecionados aparecem no Guia de Trânsito Animal (GTA). O levantamento da localização dos pivôs centrais no Brasil produzido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) foi utilizado para definir os pontos de irrigação.

A localização das escolas em zonas rurais foi retirada do projeto *Crowdsourcing for Digital Connectivity in Brazil* (C2DB), cujos dados foram fornecidos pelo Ministério das Comunicações (Mcom). Por fim, as rodovias federais e as estaduais foram obtidas por meio da base de dados do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (Dnit).

A Tabela 3 sumariza as informações sobre cada uma das bases de dados. Todos os dados descritos anteriormente foram convertidos para o formato *raster* com 1 km² de resolução espacial. Além disso, para os dados de silos, frigoríficos e usinas criaram-se *buffers* de 1 km de raio ao redor dessas infraestruturas para que fosse possível identificá-las também na resolução de 1 km². De forma semelhante, *buffers* com raio de 500 m foram criados ao redor das rodovias e *buffers* com raio de 1 km foram gerados nas fronteiras das Unidades de Conservação e Terras Indígenas.

Os valores mínimos, máximos e médios da densidade populacional, da densidade fundiária e o valor médio da produção agropecuária por estabelecimento estão descritos na Tabela 4.

Tabela 3. Base de dados consideradas para definir a demanda por conectividade rural

Tipo	Detalhamento	Ano	Fonte	Link
Mapa de uso e cobertura	Coleção 7	2020	Mapbiomas (SOUZA <i>et al.</i> , 2020)	https://storage.googleapis.com/mapbiomas-public/brasil/collection-7/lcl/coverage/brasil_coverage_2020.tif
Terras Indígenas	Homologadas ou regularizadas	2019	Funai	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3fa8cc38-79b4-4aa1-8179-bba315baea4b
Unidades de Conservação	Proteção integral	2019	MMA	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/9407d38f-84d2-48ea-97dd-ee152c493043
Densidade fundiária		2019	(SPAROVEK <i>et al.</i> , 2019)	-
Densidade populacional		2020	(WORLDPOP; BONDARENKO; MAKSYM, 2020)	https://hub.worldpop.org/geodata/summary?id=39835
Média do valor de produção		2017	Censo Agropecuário 2017	https://sidra.ibge.gov.br/tabela/6897
Frigoríficos	Confirmado ou provável	2017	(TRASE, 2022)	https://supplychains.trase.earth/logistics-map
Silos		2009	Embrapa/BIT-PNLT	https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/redes-geograficas/15793-logistica-dos-transportes.html?=&t=acesso-ao-produto
Usinas		2022	Udop	https://www.udop.com.br/mapas
Pontos de irrigação	Pivôs centrais	2019	ANA	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/3fa8cc38-79b4-4aa1-8179-bba315baea4b
Escolas	Zonas rurais	2021	C2DB	Dados fornecidos pelo Mcom
Rodovias	Estaduais e federais	2016	Dnit	https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/ff37f924-e88d-4ee4-82e7-14a3e5efe0fd

Fundação Nacional do Índio (Funai); Ministério do Meio Ambiente (MMA); Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa); União Nacional da Bioenergia (Udop); Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA); Ministério das Comunicações (Mcom); Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (Dnit).

Fonte: elaboração do autor.

Tabela 4. Valores mínimo, máximo e média das variáveis numéricas usadas para calcular a demanda por conectividade no meio rural

Base de dados	Valor mínimo	Valor máximo	Média
Densidade populacional (habitantes/km ²)	0	52.648	10,6
Densidade demográfica (propriedades/km ²)	1	171	3,9
Valor Bruto da Produção Agropecuária (mil reais/estabelecimento)	0	27.410	186,128

Fonte: elaboração do autor.

4.1.1 Classificação da base de dados

Os valores de densidade fundiária, densidade populacional e renda média foram categorizados da seguinte forma: valores abaixo do percentil 33 foram classificados como baixa, entre os percentis 33 e 66, média, e acima de 66 em alta.

4.2 Classes de demanda

Utilizando os dados descritos nos itens anteriores, foram definidas sete classes de demanda por conectividade no meio rural a fim de caracterizar tanto a intensidade da demanda quanto o tipo de tecnologia necessária para supri-la. A demanda por comunicação está diretamente ligada à densidade populacional do local e exige a oferta de sinal de banda larga móvel, enquanto a demanda por informatização reflete um cenário com poucas pessoas, porém com atividades produtivas que demandam serviço de IoT para conectar sensores, máquinas e equipamentos.

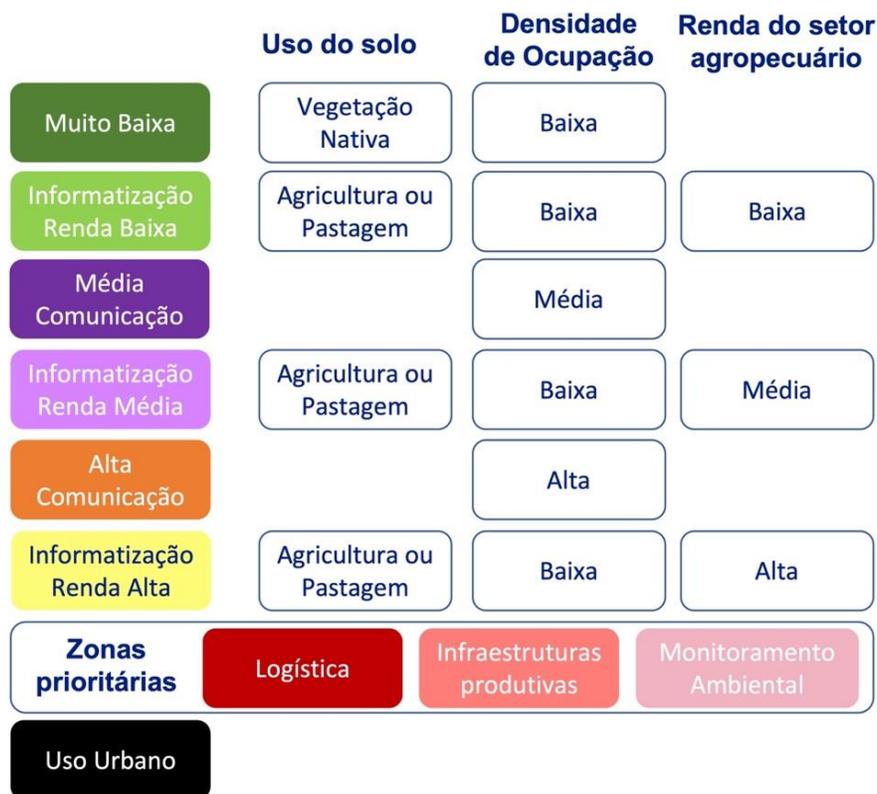
A demanda por comunicação foi classificada em alta e média de acordo com a densidade populacional, e a demanda por informatização foi subdividida em renda baixa, renda média e renda alta com base no valor médio da produção agropecuária no município. Esta variável indica o nível de produtividade e a rentabilidade dos estabelecimentos rurais, o que reflete diretamente no nível de mecanização e tecnificação do produtor, revelando se este terá mais ou menos facilidade em absorver a oferta de conectividade.

Além disso, foram definidas zonas prioritárias, onde a oferta de conectividade é essencial e deve ser priorizada, são elas: rodovias federais e estaduais, infraestruturas produtivas (silos, pivôs de irrigação, frigoríficos e usinas de etanol) e fronteiras de Unidades de Conservação de Proteção Integral (UCPI) e Terras Indígenas (TI) homologadas. Nas rodovias e nas fronteiras de UCPIs e TIs a demanda é por comunicação, enquanto nas infraestruturas produtivas a demanda é por informatização dos processos.

A definição das classes de demanda está descrita nos itens a seguir, e sistematizada e apresentada na Figura 9.

- **muito baixa:** áreas de vegetação nativa com densidade de ocupação baixa;
- **informatização – renda baixa:** áreas de produção agropecuária com densidade de ocupação baixa e renda baixa;
- **média – comunicação:** áreas com densidade de ocupação média;
- **informatização – renda média:** áreas de produção agropecuária com densidade de ocupação baixa e renda média;
- **alta – comunicação:** áreas com densidade de ocupação alta;
- **informatização – renda alta:** áreas de produção agropecuária com densidade de ocupação baixa e renda alta.
- **Zonas prioritárias:**
 - logística:** rodovias federais e estaduais (comunicação);
 - infraestrutura produtiva:** silos, frigoríficos, usinas e pivôs de irrigação (informatização);
 - áreas de monitoramento ambiental:** fronteiras de UCPIs e TIs homologadas (comunicação).
- **Uso urbano:** zonas urbanas.

Figura 9 Representação esquemática das classes de demanda



Fonte: elaboração do autor.

4.2.1 Chaves de decisão

Considerando as descrições anteriores, foi definida uma matriz de decisão que agrega todas as combinações possíveis entre as classes de cada variável de entrada (densidade populacional, densidade fundiária, uso do solo e renda da produção agropecuária) e define uma classe de demanda para cada combinação. A matriz de decisão pode ser consultada na Tabela 5.

Tabela 5. Matriz de decisão para classificação da demanda

Densidade populacional	Densidade fundiária	Uso do solo	Renda	Classe de demanda
Baixa	Alta	Vegetação nativa	Alta	Muito baixa
Baixa	Alta	Vegetação nativa	Média	Muito baixa
Baixa	Alta	Vegetação nativa	Baixa	Muito baixa
Baixa	Média	Vegetação nativa	Alta	Muito baixa
Baixa	Média	Vegetação nativa	Média	Muito baixa
Baixa	Média	Vegetação nativa	Baixa	Muito baixa
Baixa	Baixa	Vegetação nativa	Alta	Muito baixa
Baixa	Baixa	Vegetação nativa	Média	Muito baixa
Baixa	Baixa	Vegetação nativa	Baixa	Muito baixa
Baixa	Alta	Agricultura	Baixa	Informatização – renda baixa
Baixa	Alta	Pastagem	Baixa	Informatização – renda baixa
Baixa	Média	Agricultura	Baixa	Informatização – renda baixa
Baixa	Média	Pastagem	Baixa	Informatização – renda baixa
Baixa	Baixa	Agricultura	Baixa	Informatização – renda baixa
Baixa	Baixa	Pastagem	Baixa	Informatização – renda baixa
Média	Média	Agricultura	Alta	Média – comunicação
Média	Média	Agricultura	Média	Média – comunicação
Média	Média	Agricultura	Baixa	Média – comunicação
Média	Média	Pastagem	Alta	Média – comunicação
Média	Média	Pastagem	Média	Média – comunicação
Média	Média	Pastagem	Baixa	Média – comunicação
Média	Baixa	Agricultura	Alta	Média – comunicação
Média	Baixa	Agricultura	Média	Média – comunicação
Média	Baixa	Agricultura	Baixa	Média – comunicação
Média	Média	Vegetação nativa	Alta	Média – comunicação
Média	Média	Vegetação nativa	Média	Média – comunicação

Densidade populacional	Densidade fundiária	Uso do solo	Renda	Classe de demanda
Média	Média	Vegetação nativa	Baixa	Média - comunicação
Média	Baixa	Pastagem	Alta	Média - comunicação
Média	Baixa	Pastagem	Média	Média - comunicação
Média	Baixa	Pastagem	Baixa	Média - comunicação
Média	Baixa	Vegetação nativa	Alta	Média - comunicação
Média	Baixa	Vegetação nativa	Média	Média - comunicação
Média	Baixa	Vegetação nativa	Baixa	Média – comunicação
Baixa	Alta	Agricultura	Média	Informatização – renda média
Baixa	Alta	Pastagem	Média	Informatização – renda média
Baixa	Média	Agricultura	Média	Informatização – renda média
Baixa	Média	Pastagem	Média	Informatização – renda média
Baixa	Baixa	Agricultura	Média	Informatização – renda média
Baixa	Baixa	Pastagem	Média	Informatização – renda média
Alta	Alta	Agricultura	Alta	Alta – comunicação
Alta	Alta	Agricultura	Média	Alta – comunicação
Alta	Alta	Agricultura	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Alta	Pastagem	Alta	Alta – comunicação
Alta	Alta	Pastagem	Média	Alta – comunicação
Alta	Alta	Pastagem	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Média	Agricultura	Alta	Alta – comunicação
Alta	Média	Agricultura	Média	Alta – comunicação
Alta	Média	Agricultura	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Média	Pastagem	Alta	Alta – comunicação
Alta	Média	Pastagem	Média	Alta – comunicação
Alta	Média	Pastagem	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Alta	Vegetação nativa	Alta	Alta – comunicação

Densidade populacional	Densidade fundiária	Uso do solo	Renda	Classe de demanda
Alta	Alta	Vegetação nativa	Média	Alta – comunicação
Alta	Alta	Vegetação nativa	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Agricultura	Alta	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Agricultura	Média	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Agricultura	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Média	Vegetação nativa	Alta	Alta – comunicação
Alta	Média	Vegetação nativa	Média	Alta – comunicação
Alta	Média	Vegetação nativa	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Pastagem	Alta	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Pastagem	Média	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Pastagem	Baixa	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Vegetação nativa	Alta	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Vegetação nativa	Média	Alta – comunicação
Alta	Baixa	Vegetação nativa	Baixa	Alta – comunicação
Média	Alta	Agricultura	Alta	Alta – comunicação
Média	Alta	Agricultura	Média	Alta – comunicação
Média	Alta	Agricultura	Baixa	Alta – comunicação
Média	Alta	Pastagem	Alta	Alta – comunicação
Média	Alta	Pastagem	Média	Alta – comunicação
Média	Alta	Pastagem	Baixa	Alta – comunicação
Média	Alta	Vegetação nativa	Alta	Alta – comunicação
Média	Alta	Vegetação nativa	Média	Alta – comunicação
Média	Alta	Vegetação nativa	Baixa	Alta – comunicação
Baixa	Alta	Agricultura	Alta	Informatização – renda alta
Baixa	Alta	Pastagem	Alta	Informatização – renda alta
Baixa	Média	Agricultura	Alta	Informatização – renda alta

Densidade populacional	Densidade fundiária	Uso do solo	Renda	Classe de demanda
Baixa	Média	Pastagem	Alta	Informatização – renda alta
Baixa	Baixa	Agricultura	Alta	Informatização – renda alta
Baixa	Baixa	Pastagem	Alta	Informatização – renda alta
Alta	Alta	Urbano	Alta	Urbano
Alta	Alta	Urbano	Média	Urbano
Alta	Alta	Urbano	Baixa	Urbano
Alta	Média	Urbano	Alta	Urbano
Alta	Média	Urbano	Média	Urbano
Alta	Média	Urbano	Baixa	Urbano
Alta	Baixa	Urbano	Alta	Urbano
Alta	Baixa	Urbano	Média	Urbano
Alta	Baixa	Urbano	Baixa	Urbano
Baixa	Alta	Urbano	Alta	Urbano
Baixa	Alta	Urbano	Média	Urbano
Baixa	Alta	Urbano	Baixa	Urbano
Baixa	Média	Urbano	Alta	Urbano
Baixa	Média	Urbano	Média	Urbano
Baixa	Média	Urbano	Baixa	Urbano
Baixa	Baixa	Urbano	Alta	Urbano
Baixa	Baixa	Urbano	Média	Urbano
Baixa	Baixa	Urbano	Baixa	Urbano

Fonte: elaboração do autor.

4.3 Resultados

As classes de demanda derivadas das combinações entre as variáveis de entrada descritas no item anterior resultam no mapa que pode ser visto na Figura 10. Como pode ser observado, as

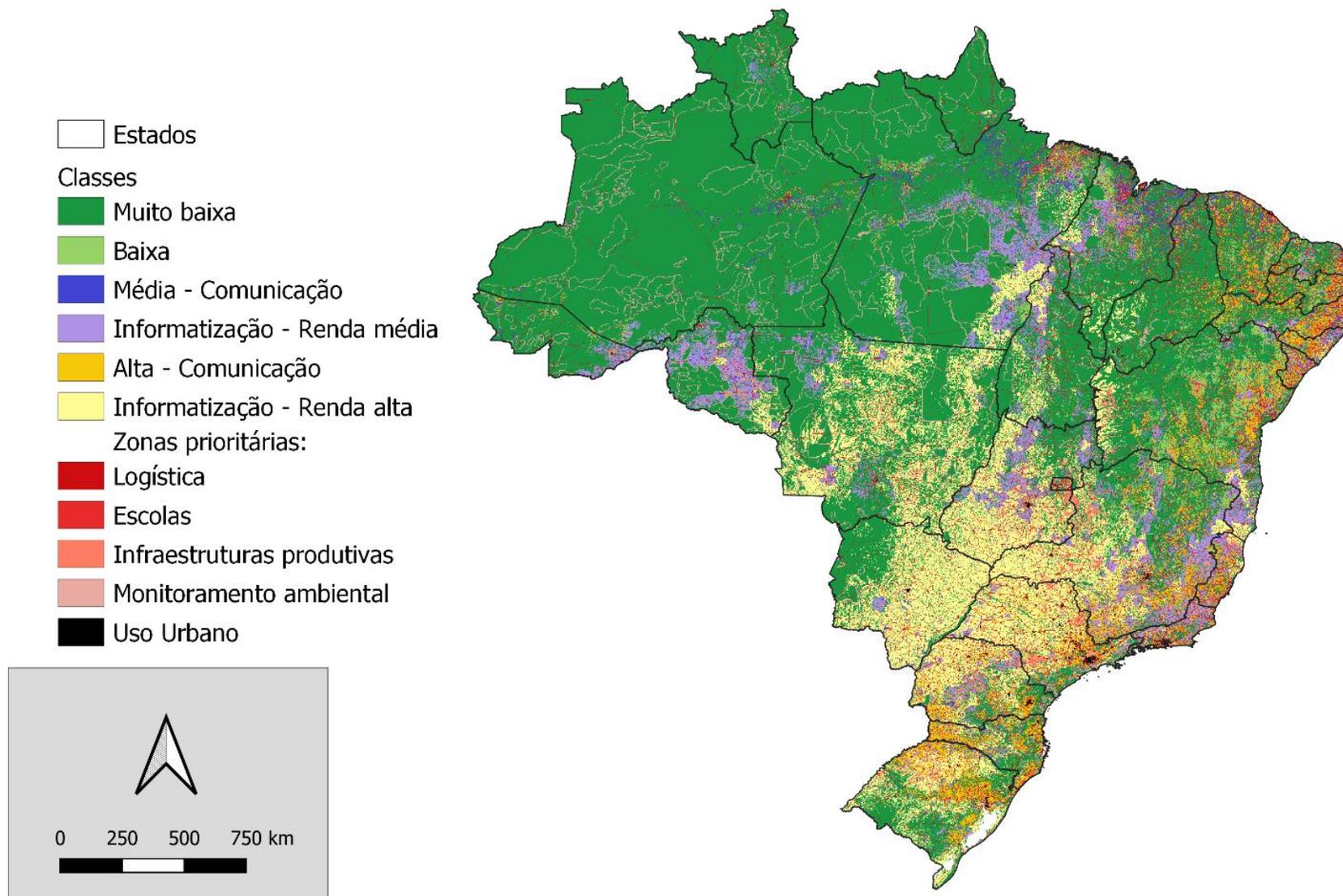
zonas de alta demanda por comunicação ficaram majoritariamente concentradas ao redor das áreas urbanas, principalmente nos estados das regiões Sul, Sudeste e Nordeste, onde a densidade populacional é maior que 100 habitantes/km².

Na Região Centro-Oeste, em grande parte do Estado de São Paulo, sul de Minas Gerais e norte do Paraná existe uma demanda por informatização – renda alta caracterizada por áreas de agricultura ou pecuária com menos de 5 habitantes/km², localizadas em municípios cujo valor médio da produção agropecuária é alto.

Às margens dessas áreas de demanda por informatização – renda alta estão algumas áreas de demanda por informatização – renda média, com características semelhantes às últimas, porém em municípios onde o valor médio de produção da agropecuária é menor. A classe de demanda por informatização – renda baixa predomina na região da caatinga, caracterizada por pequenas propriedades rurais com valor médio de produção baixo e baixa densidade populacional.

Por fim, a classe de demanda muito baixa acompanha a cobertura de vegetação nativa do país, exceto por algumas regiões onde a presença de povos originários representa uma demanda média por comunicação. Os valores exatos das áreas de cada classe de demanda por estado podem ser vistos na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Figura 10. Classes de demanda por conectividade sobre o território do Brasil



Fonte: elaboração do autor.

Tabela 6. Áreas de cada classe de demanda por estado (em unidades de mil quilômetros quadrados – km²)

UF	Logística	Infraestrutura produtiva	Monitoramento ambiental	Escolas	Informatização	Comunicação	Informatização	Comunicação	Baixa	Muito baixa	Zonas urbanas	Total geral
					Renda alta	Alta	Renda média	Média				
AC	4,79	0,01	8,15	1,13	0,00	2,51	11,74	3,97	3,70	127,92	0,06	163,97
AL	2,96	0,28	0,45	3,16	1,74	7,60	2,43	2,60	3,91	2,58	0,12	27,82
AM	8,44	0,07	69,23	7,39	0,00	5,89	8,97	16,92	6,44	1435,04	0,23	1558,63
AP	4,42	0,01	5,10	1,27	0,74	0,39	0,71	1,29	0,29	127,47	0,06	141,73
BA	29,03	8,53	7,83	18,58	32,95	49,72	26,70	20,06	94,30	275,96	0,91	564,57
CE	11,91	0,59	0,92	10,29	0,00	28,84	0,54	15,76	8,60	70,89	0,46	148,80
DF	1,28	0,52	0,61	0,31	0,60	0,55	0,00	0,45	0,00	1,03	0,37	5,72
ES	5,81	1,11	1,51	3,82	4,34	10,52	10,19	1,99	0,78	5,72	0,24	46,03
GO	25,77	14,66	2,83	1,75	147,33	6,32	45,57	5,37	0,54	88,91	1,10	340,13
MA	11,67	0,59	6,35	22,35	16,25	12,13	24,57	28,38	21,63	184,92	0,30	329,15
MG	36,66	24,57	9,54	14,44	136,35	59,00	84,15	14,65	28,55	176,56	1,85	586,32
MS	18,85	1,76	4,56	0,75	194,89	2,94	3,33	5,11	0,00	124,02	0,46	356,66
MT	33,62	5,92	28,41	2,07	267,44	5,91	35,53	9,41	0,00	513,82	0,67	902,80

UF	Logística	Infraestrutura produtiva	Monitoramento ambiental	Escolas	Informatização	Comunicação	Informatização	Comunicação	Baixa	Muito baixa	Zonas urbanas	Total geral
					Renda alta	Alta	Renda média	Média				
PA	16,12	0,32	38,89	19,55	51,15	17,51	109,60	42,95	23,54	924,59	0,91	1245,13
PB	5,34	0,33	0,24	6,35	0,29	10,56	1,03	3,39	8,27	20,49	0,14	56,43
PE	7,59	0,32	2,70	9,49	1,12	21,93	3,49	7,00	9,22	34,81	0,35	98,03
PI	13,11	0,34	4,11	7,18	8,09	12,87	1,14	10,50	8,48	185,23	0,61	251,65
PR	19,02	1,95	5,06	3,58	67,89	33,94	19,41	6,13	0,38	40,28	1,49	199,13
RJ	5,31	0,07	4,93	3,78	0,67	7,06	10,51	2,65	0,39	7,08	1,10	43,55
RN	4,98	0,34	0,18	4,62	0,83	5,72	4,21	2,63	5,71	23,36	0,20	52,78
RO	7,63	0,17	15,01	1,17	14,24	5,08	64,62	5,06	0,01	124,16	0,20	237,35
RR	3,67	0,14	11,93	1,22	0,37	0,35	4,92	1,82	1,51	197,38	0,08	223,39
RS	16,48	8,36	3,03	6,66	73,62	45,12	10,62	3,53	0,07	98,99	1,62	268,10
SC	8,98	0,59	3,07	3,40	11,24	25,65	6,61	1,93	0,04	32,67	1,06	95,22
SE	3,34	0,09	0,35	2,91	0,09	4,17	2,28	1,31	5,40	1,90	0,09	21,92
SP	23,14	12,74	8,96	4,12	115,69	30,98	8,05	7,11	0,06	32,06	4,66	247,56
TO	15,94	1,02	6,85	2,23	38,08	2,16	27,16	3,37	2,87	177,39	0,31	277,39
Total	345,86	85,39	250,79	163,57	1185,98	415,39	528,08	225,34	234,68	5035,21	19,64	8489,92

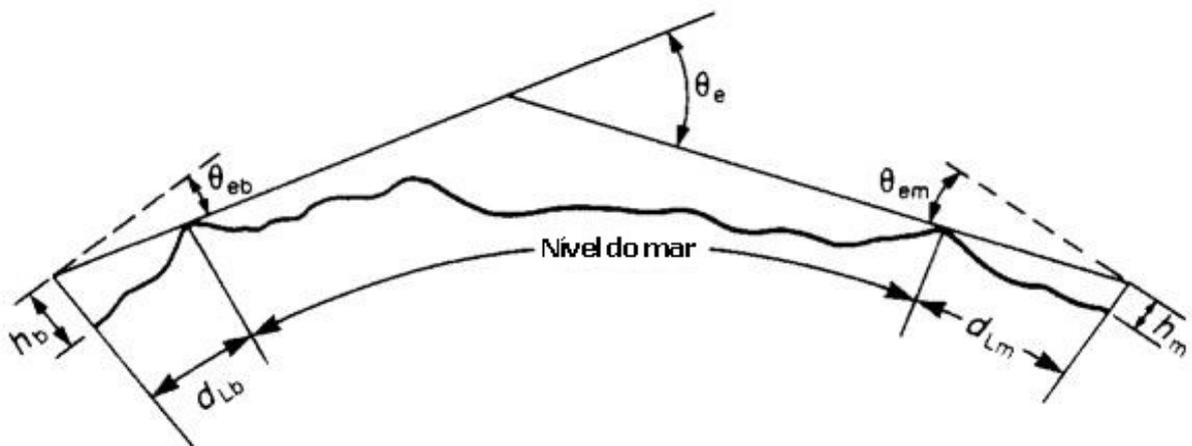
Fonte: elaboração do autor.

5 Mapeamento da oferta de sinal de internet: detalhamento do Banco de Dados Geoespacial de Infraestruturas

5.1 Modelo ITM

Para a quantificação da oferta de sinal optou-se pela utilização do *Irregular Terrain Model* (ITM). Sua formulação é conhecida também como Longley-Rice e inclui uma interpretação da influência do terreno na propagação de ondas eletromagnéticas mais realista do que modelos que assumem apenas um transmissor e um receptor em espaço livre, onde não existem obstáculos entre eles. O modelo ITM executa um cálculo bastante detalhado, que incorpora tanto a teoria eletromagnética quanto análises estatísticas que levam em consideração as irregularidades do terreno, a refratividade da superfície e a influência do clima no trajeto dos raios entre antenas (PARSONS, 2000). Na Figura 11 apresenta algumas das grandezas consideradas no cálculo.

Figura 11. Decomposição de um trajeto hipotético entre transmissor e receptor pelo modelo ITM



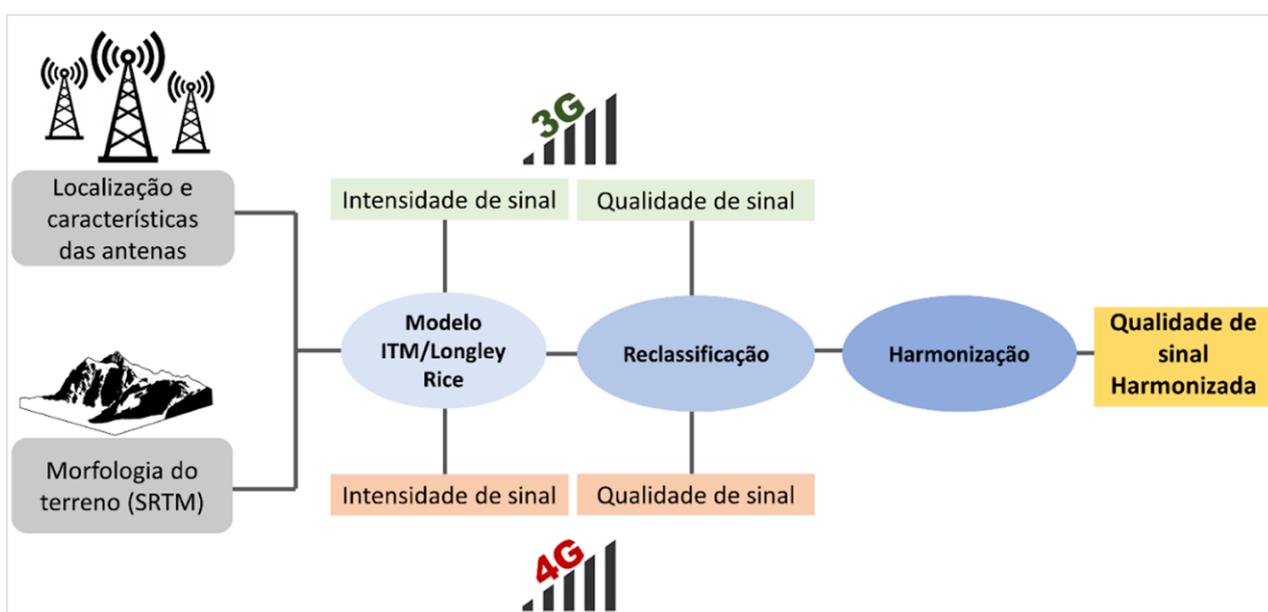
Fonte: adaptado de PARSONS, 2000.

Além da maior acurácia na representação do fenômeno físico da propagação das ondas eletromagnéticas, a faixa de aplicação do modelo ITM varia de 20 a 20.000 MHz, sendo mais segura para a utilização das frequências acima de 2.000 MHz. Neste estudo, a base de dados de altimetria do terreno nos cálculos do modelo ITM é baseada no modelo digital de elevação da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM).

A metodologia de aplicação do ITM utiliza a localização e a descrição dos pontos com sinal disponível atualmente. O principal dado de entrada é a localização dos *sites* no território e suas características de funcionamento, tais como: frequência, altura da torre, potência, ângulo de meia potência, azimute e *downtilt* da antena. No Brasil, os dados referentes aos *sites* são públicos e disponibilizados pela Agência Nacional de

Telecomunicações (Anatel) em formato vetorial (*shapefile*). A metodologia aplicada para dimensionamento de oferta de sinal no território é uma combinação de processamento de alta *performance* de dados e aplicação do modelo ITM para cálculo de área de cobertura (nível de sinal) e qualidade do sinal de cada *site*. Dessa forma, de acordo com seu nível, a qualidade do sinal é apresentada como um gradiente: quanto mais próximo da antena (maior nível de sinal), melhor a qualidade, que decai à medida que a distância aumenta (menor nível de sinal). A categorização é feita entre as classes de sinal: sem sinal, baixo, médio, alto e muito alto para as tecnologias 3G e 4G. A representação do processo é mostrada na Figura 12:

Figura 12. Processo de cálculo da disponibilidade de conexão



Fonte: elaboração do autor.

5.2 Novas informações incorporadas

Além das variáveis utilizadas para o cálculo do modelo ITM e descritas anteriormente, há um novo banco de dados decorrente do projeto Mapa de Conectividade, também executado pelo CGEE, sob demanda do MCom.

O banco de dados consiste em 25 tabelas, espaciais e tabulares, com informações necessárias para a caracterização territorial do Brasil nos níveis de estado, município, distrito e setor censitário. Parte das tabelas possui informações relativas à infraestrutura de saúde e educação, como o distrito de localização de Unidades Básicas de Saúde (UBS) e a localização de escolas. O Índice de Desenvolvimento Humano também compõe a categoria de informações externas incluídas no banco de dados. Quatro das 25 tabelas contêm informações de metadados necessárias para o georreferenciamento dos valores das demais tabelas.

As demais tabelas tratam de informações sobre a conectividade. Uma delas contém uma informação previamente utilizada no projeto – a localização e as características das estações licenciadas pela Anatel –, que permite o desenvolvimento da modelagem de oferta de serviço. Ademais, o banco de dados contém um *ranking* de operadoras fornecedoras de serviços de comunicação no Brasil vinculado a um determinado mês de cálculo. Uma novidade trazida por este banco de dados é o cálculo de um Índice de Conectividade (IC) nos níveis de município e setor censitário. O IC é derivado a partir de cinco variáveis:

- i. o número de pontos de *WI-FI*;
- ii. a presença de *backbones*;
- iii. a velocidade média das conexões;
- iv. a taxa de cobertura móvel; e
- v. a taxa de cobertura de serviço móvel.

O último dos fatores mencionados, a taxa de cobertura, também é providenciado no banco de dados para as tecnologias de 4G e 5G. Uma inspeção visual sugere que esses valores advêm de simulação a partir do dado previamente mencionado de antenas licenciadas, e a cobertura de 4G fornecida apresenta uma grande similaridade com o dado utilizado no cálculo da oferta deste trabalho (Figura 13).

Além desses dados, o banco contém também duas tabelas ao nível municipal sobre o número de acessos via banda larga fixa e telefonia móvel.

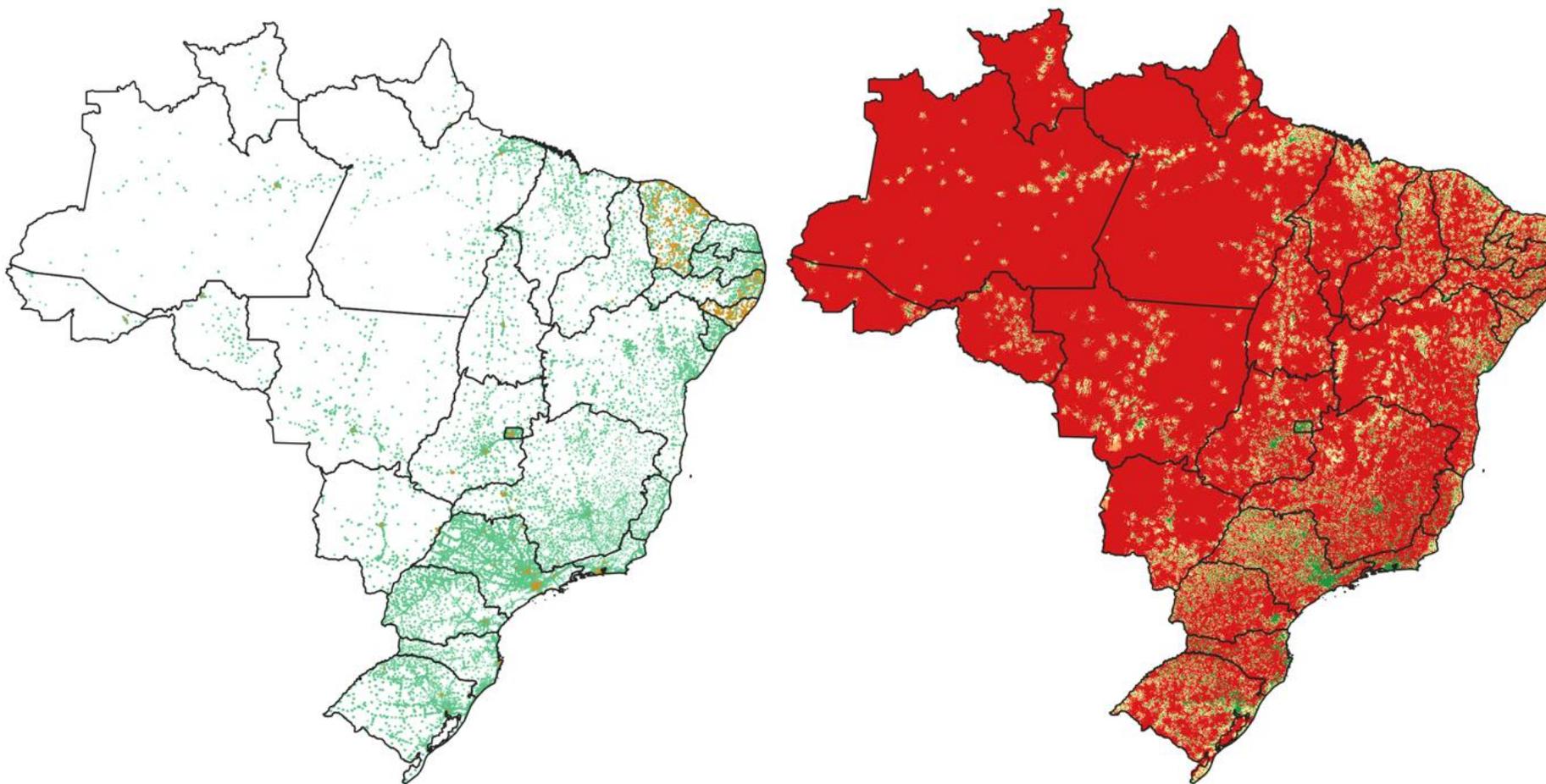
Dentre todas as informações fornecidas, três são particularmente relevantes para este projeto. As duas primeiras são os dados nomeados como *download* e *upload* na tabela ao nível de setor censitário e se referem a uma média da velocidade de *download* e *upload* em kbps dos últimos seis meses com base em dados de *crowdsourcing*. Ambas as quantidades serão incorporadas na etapa de caracterização de demanda com o intuito de melhorar a definição de locais com maior necessidade ou com excesso de serviços (Figura 14).

A terceira informação relevante é o traçado das linhas de *backbones* ao longo do território nacional (Figura 15). Esse dado espacialmente explícito é particularmente relevante para a etapa propositiva do projeto, em que a malha de antenas licenciadas será expandida de maneira otimizada para melhor atender as diferentes demandas existentes. Em (BRASIL, 2021a), a ausência dessa informação foi contornada utilizando-se uma *proxy*: novas antenas apenas seriam possíveis em uma distância máxima de 50 km da rede existente. Esse pressuposto, bastante simplista, teve importantes impactos nas simulações.

Os traçados das linhas de *backbones* são, em sua maioria, compostos por linhas retas ao longo do território. Isso significa que esse dado é apenas uma referência da localização real gerada a partir de seus pontos de início e término, não representando fielmente o que é encontrado em campo. Apesar dessa limitação, essa informação deve

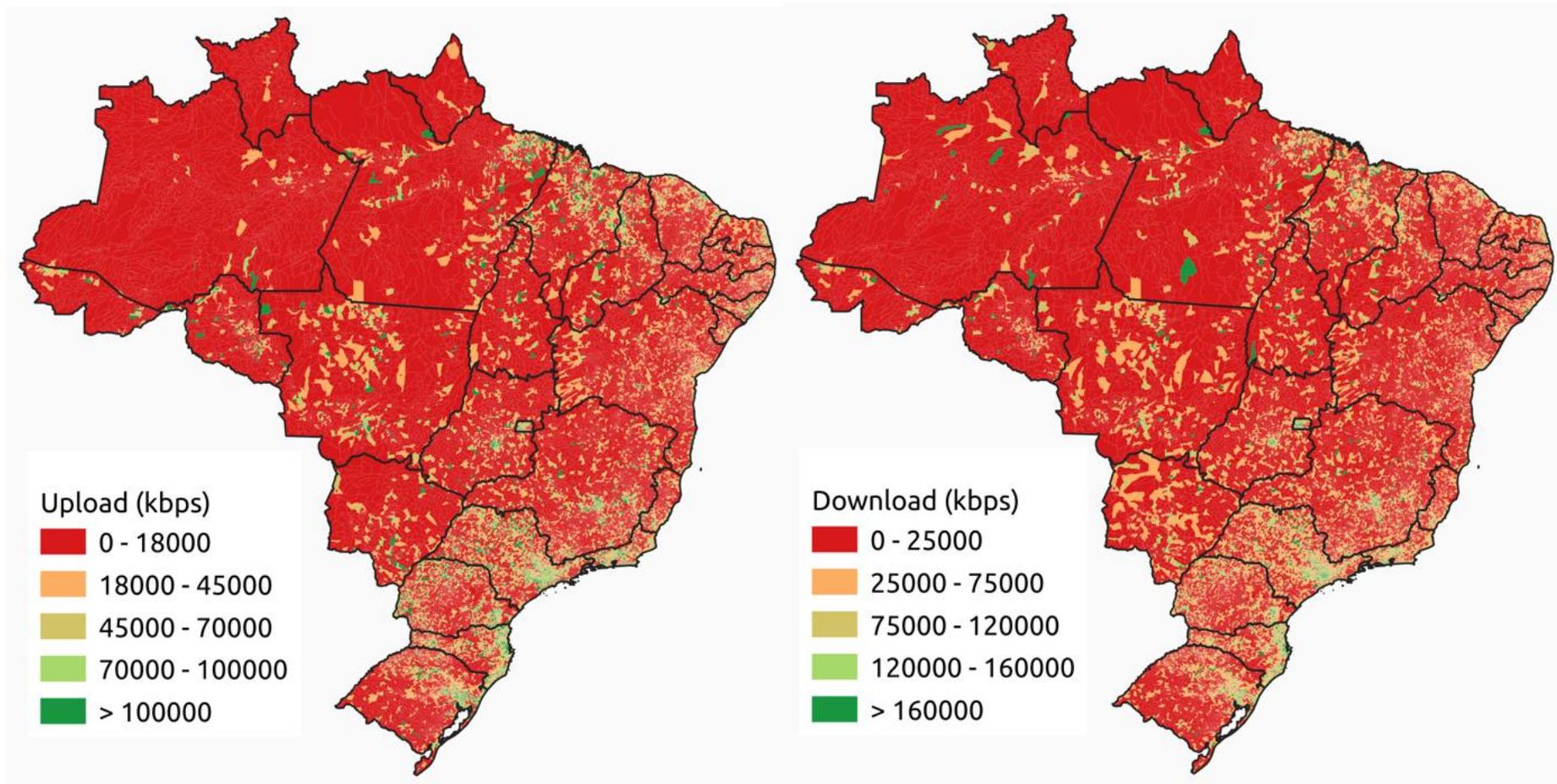
substituir o pressuposto dos 50 km mencionado anteriormente. A distância aos *backbones* existentes é uma medida mais precisa para dizer se a instalação de uma nova antena é factível ou não em termos técnicos e financeiros.

Figura 13. Coberturas de 4G e 5G fornecidas pelo CGEE (esquerda – verde e laranja, respectivamente) e superfície de sinal calculada pelo ITM (direita, gradiente de vermelho, sem sinal, à verde, sinal alto)



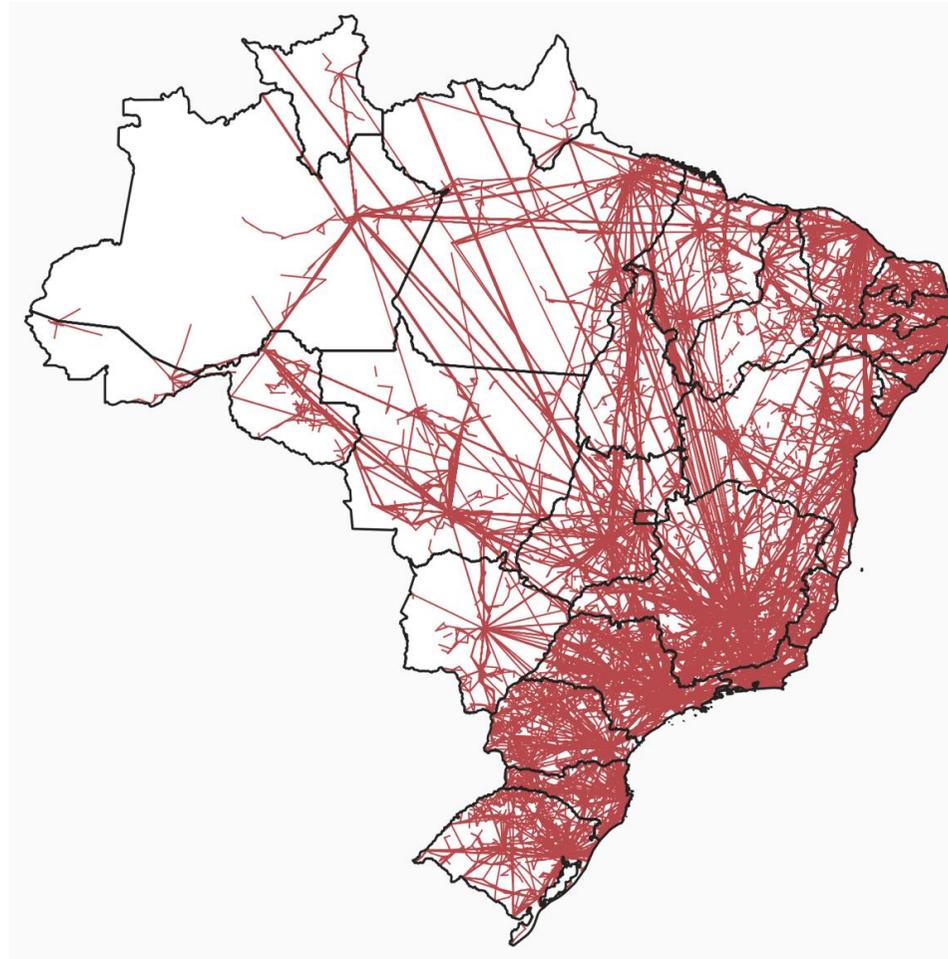
Fonte: elaboração do autor.

Figura 14. Velocidade média de *upload* (esquerda) e *download* (direita), em kbps, por setor censitário no Brasil



Fonte: elaboração do autor.

Figura 15. Traçado aproximado dos *backbones* no território brasileiro



Fonte: elaboração do autor.

6 Caracterização das alternativas tecnológicas e de sua demanda por infraestrutura

Nesta etapa foi trabalhado o detalhamento técnico das características das alternativas tecnológicas do 3GPP, bem como foi qualificada a demanda por infraestrutura para sua operacionalidade/implementação.

O *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) reúne sete organizações de desenvolvimento de padrões de telecomunicações (Arib, Atis, CCSA, ETSI, TSDSI, TTA, TTC), conhecidas como “parceiros organizacionais”, proporcionando aos seus membros um ambiente estável para produzir os relatórios e as especificações que definem as tecnologias 3GPP. As especificações 3GPP cobrem as tecnologias de telecomunicações celulares, incluindo acesso por rádio, rede principal e recursos de serviço, que fornecem uma descrição completa do sistema para telecomunicações móveis. As especificações 3GPP também fornecem informações para acesso sem rádio à rede principal e para interoperabilidade com redes não 3GPP (3GPP, 2022). Esses relatórios e especificações visam padronizar as tecnologias de telecomunicações no mundo.

Novas tecnologias têm sido cada vez mais utilizadas na agropecuária para melhorar sua eficiência, produtividade e sustentabilidade. Dentre as novas tecnologias, IoT tem desempenhado um papel fundamental na melhoria da conectividade no campo. Por meio de dispositivos IoT é possível realizar o monitoramento da produção agrícola, analisar o desenvolvimento de culturas, coletar informações sobre umidade, luz solar, chuva e solo, realizar o rastreamento da pecuária (incluindo saúde animal, ciclos de parto e localização), gerir o pastoreio/alimentação, entre outros (SEIXAS; CONTINI, 2017). Para conectar esses dispositivos IoTs foram projetadas redes de comunicação sem fio com grande alcance e com baixo consumo de energia (*Low Power Wide Area Networks* – LPWAN). *Narrowband-IoT* (NB-IoT) e *Long Term Evolution for Machines* (LTE-M) são duas tecnologias LPWAN disponíveis no Brasil e que estão se popularizando entre empresas de vários setores, em especial do agronegócio. O NB-IoT é projetado para dispositivos que exigem baixa largura de banda e baixo consumo de energia. É adequado para dispositivos que transmitem dados em intervalos regulares ou esporádicos.

O NB-IoT usa uma largura de banda estreita, o que o torna eficiente em termos de energia e oferece cobertura de longo alcance, atendendo aplicações como monitoramento de produção agrícola e pecuária. Por sua vez, o LTE-M é projetado para dispositivos que exigem uma conexão de média velocidade, baixa latência, mobilidade e baixo consumo de energia (BERGMAN *et al.*, 2017). O LTE-M é adequado para dispositivos que exigem comunicação constante e transmissão de dados em tempo real, como aqueles empregados no rastreamento de frota e maquinário agrícola.

6.1 Bandas de operação NB-IoT e LTE-M

As faixas de frequência definidas para todas as categorias de terminais *Long Term Evolution* (LTE) são definidas pelo *Third Generation Partnership Project* (3GPP) em (ETSI, 2022a) e mostradas na Tabela 7. As categorias CAT NB1 e CAT NB2 são referentes aos terminais *Narrow Band Internet of Things* (NB-IoT), enquanto as categorias CAT M1 e CAT M2 são referentes aos terminais *LTE Machine* (LTE-M).

Tabela 7. E-UTRA operating bands

E-UTRA operating band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit FUL low – FUL high			Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive FDL low – FDL high			Duplex mode
	1	1920 MHz	–	1980 MHz	2110 MHz	–	
2	1850 MHz	–	1910 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	–	1785 MHz	1805 MHz	–	1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	–	1755 MHz	2110 MHz	–	2155 MHz	FDD
5	824 MHz	–	849 MHz	869 MHz	–	894MHz	FDD
6	830 MHz	–	840 MHz	875 MHz	–	885 MHz	FDD
7	2500 MHz	–	2570 MHz	2620 MHz	–	2690 MHz	FDD
8	880 MHz	–	915 MHz	925 MHz	–	960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	–	1784.9 MHz	1844.9 MHz	–	1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	–	1770 MHz	2110 MHz	–	2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	–	1447.9 MHz	1475.9 MHz	–	1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz	–	716 MHz	729 MHz	–	746 MHz	FDD
13	777 MHz	–	787 MHz	746 MHz	–	756 MHz	FDD
14	788 MHz	–	798 MHz	758 MHz	–	768 MHz	FDD
15	Reserved			Reserved			FDD
16	Reserved			Reserved			FDD
17	704 MHz	–	716 MHz	734 MHz	–	746 MHz	FDD
18	815 MHz	–	830 MHz	860 MHz	–	875 MHz	FDD
19	830 MHz	–	845 MHz	875 MHz	–	890 MHz	FDD
20	832 MHz	–	862 MHz	791 MHz	–	821 MHz	FDD
21	1447.9 MHz	–	1462.9 MHz	1495.9 MHz	–	1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	–	3490 MHz	3510 MHz	–	3590 MHz	FDD
23	2000 MHz	–	2020 MHz	2180 MHz	–	2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz	–	1660.5 MHz	1525 MHz	–	1559 MHz	FDD
25	1850 MHz	–	1915 MHz	1930 MHz	–	1995 MHz	FDD
26	814 MHz	–	849 MHz	859 MHz	–	894 MHz	FDD
27	807 MHz	–	824 MHz	852 MHz	–	869 MHz	FDD
28	703 MHz	–	748 MHz	758 MHz	–	803 MHz	FDD

E-UTRA operating band	Uplink (UL) operating band			Downlink (DL) operating band			Duplex mode
	BS receive		UE transmit	BS transmit UE		receive	
	FUL low – FUL high			FDL low – FDL high			
29	N/A		717 MHz	–	728 MHz		FDD2
30	2305 MHz	–	2315 MHz	2350 MHz	–	2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz	–	457.5 MHz	462.5 MHz	–	467.5 MHz	FDD
32		N/A		1452 MHz	–	1496 MHz	FDD2
33	1900 MHz	–	1920 MHz	1900 MHz	–	1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	–	2025 MHz	2010 MHz	–	2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	–	1910 MHz	1850 MHz	–	1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	–	1990 MHz	1930 MHz	–	1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	–	1930 MHz	1910 MHz	–	1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	–	2620 MHz	2570 MHz	–	2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	–	1920 MHz	1880 MHz	–	1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	–	2400 MHz	2300 MHz	–	2400 MHz	TDD
41	2496 MHz		2690 MHz	2496 MHz		2690 MHz	TDD
42	3400 MHz	–	3600 MHz	3400 MHz	–	3600 MHz	TDD
43	3600 MHz	–	3800 MHz	3600 MHz	–	3800 MHz	TDD
44	703 MHz	–	803 MHz	703 MHz	–	803 MHz	TDD
45	1447 MHz	–	1467 MHz	1447 MHz	–	1467 MHz	TDD
46	5150 MHz	–	5925 MHz	5150 MHz	–	5925 MHz	TDD8
47	5855 MHz	–	5925 MHz	5855 MHz	–	5925 MHz	TDD11
48	3550 MHz	–	3700 MHz	3550 MHz	–	3700 MHz	TDD
49	3550 MHz	–	3700 MHz	3550 MHz	–	3700 MHz	TDD16
50	1432 MHz	-	1517 MHz	1432 MHz	-	1517 MHz	TDD13
51	1427 MHz	-	1432 MHz	1427 MHz	-	1432 MHz	TDD13
52	3300 MHz	-	3400 MHz	3300 MHz	-	3400 MHz	TDD
53	2483.5 MHz	-	2495 MHz	2483.5 MHz	-	2495 MHz	TDD
...							
64	<i>Reserved</i>						
65	1920 MHz	–	2010 MHz	2110 MHz	–	2200 MHz	FDD
66	1710 MHz	–	1780 MHz	2110 MHz	–	2200 MHz	FDD4
67		N/A		738 MHz	–	758 MHz	FDD2
68	698 MHz	–	728 MHz	753 MHz	–	783 MHz	FDD
69	N/A		2570 MHz	–	2620 MHz		FDD2
70	1695 MHz	–	1710 MHz	1995 MHz	–	2020 MHz	FDD10
71	663 MHz	–	698 MHz	617 MHz	–	652 MHz	FDD
72	451 MHz	–	456 MHz	461 MHz	–	466 MHz	FDD

E-UTRA operating band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit			Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive			Duplex mode
	FUL low – FUL high			FDL low – FDL high			
73	450 MHz	–	455 MHz	460 MHz	–	465 MHz	FDD
74	1427 MHz	–	1470 MHz	1475 MHz	–	1518 MHz	FDD
75		N/A		1432 MHz	–	1517 MHz	FDD2
76		N/A		1427 MHz	–	1432 MHz	FDD2
85	698 MHz	–	716 MHz	728 MHz	–	746 MHz	FDD
87	410 MHz	–	415 MHz	420 MHz	–	425 MHz	FDD
88	412 MHz	–	417 MHz	422 MHz	–	427 MHz	FDD
103	787 MHz	–	788 MHz	757 MHz	–	758 MHz	FDD

Fonte: ETSI, 2022a.

A faixa de operação de 450 MHz adotada no Brasil corresponde às frequências de 451 MHz a 458 MHz para *Uplink* (UL) e 461 MHz a 468 MHz para *Downlink* (DL), referentes às bandas 31, 72 e 73 da Tabela 7. Em (ETSI, 2022a), define-se, *quid agis*:

1. **UE category M1 and M2** is designed to operate in the E-UTRA operating bands 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 27, 28, **31**, 66, 71, **72**, **73**, 74, 85, 87 and 88 in both half duplex FDD mode and full-duplex FDD mode, and in bands 39, 40, 41, 42, 43 and 48 in TDD mode.
2. **Category NB1 and NB2** are designed to operate in the E-UTRA operating bands 1, 2, 3, 4, 5, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 24, 25, 26, 28, **31**, 41, 42, 43, 48, 65, 66, 70, 71, **72**, **73**, 74, 85, 87, 88, and 103.
3. **Category NB1 and NB2** are designed to operate in the NR operating bands n1, n2, n3, n5, n7, n8, n12, n14, n18, n20, n25, n26, n28, n41, n65, n66, n70, n71, n74, n90.

Dessa forma, podemos concluir pelos itens 1 e 2 descritos anteriormente que tanto LTE-M quanto NB-IoT operam na faixa de 450 MHz.

Vale notar, de acordo com o item 3, que o NB-IoT também pode operar em faixas de espectro definidas para *5G New Radio* (5G NR), sendo estas definidas pelos padrões (ETSI, 2022b) e (ETSI, 2022c). A Tabela 8 descreve as *frequency ranges* (FRs) definidas pelo 3GPP para operação 5G NR, enquanto a Tabela 9 e a Tabela 10 apresentam suas respectivas faixas de operação.

Tabela 8. 3GPP 5G NR *frequency ranges*

<i>Frequency range designation</i>	<i>Corresponding frequency range</i>
FR1	410 MHz – 7125 MHz
FR2	24250 MHz – 52600 MHz

Fonte: ETSI, 2022c

Tabela 9. FR1 5G NR *operating bands*

<i>NR operating band</i>	<i>Uplink (UL) operating band</i> BS receive / UE transmit	<i>Downlink (DL) operating band</i> BS transmit / UE receive	<i>Duplex mode</i>
	<i>FUL low – FUL high</i>	<i>FDL low – FDL high</i>	
n1	1920 MHz – 1980 MHz	2110 MHz – 2170 MHz	FDD
n2	1850 MHz – 1910 MHz	1930 MHz – 1990 MHz	FDD
n3	1710 MHz – 1785 MHz	1805 MHz – 1880 MHz	FDD
n5	824 MHz – 849 MHz	869 MHz – 894 MHz	FDD
n7	2500 MHz – 2570 MHz	2620 MHz – 2690 MHz	FDD
n8	880 MHz – 915 MHz	925 MHz – 960 MHz	FDD
n12	699 MHz – 716 MHz	729 MHz – 746 MHz	FDD
n13	777 MHz – 787 MHz	746 MHz – 756 MHz	FDD
n14	788 MHz – 798 MHz	758 MHz – 768 MHz	FDD
n18	815 MHz – 830 MHz	860 MHz – 875 MHz	FDD
n20	832 MHz – 862 MHz	791 MHz – 821 MHz	FDD
n24	1626.5 MHz – 1660.5 MHz	1525 MHz – 1559 MHz	FDD
n25	1850 MHz – 1915 MHz	1930 MHz – 1995 MHz	FDD
n26	814 MHz – 849 MHz	859 MHz – 894 MHz	FDD
n28	703 MHz – 748 MHz	758 MHz – 803 MHz	FDD
n29	N/A	717 MHz – 728 MHz	SDL
n30	2305 MHz – 2315 MHz	2350 MHz – 2360 MHz	FDD
n34	2010 MHz – 2025 MHz	2010 MHz – 2025 MHz	TDD
n38	2570 MHz – 2620 MHz	2570 MHz – 2620 MHz	TDD
n39	1880 MHz – 1920 MHz	1880 MHz – 1920 MHz	TDD
n40	2300 MHz – 2400 MHz	2300 MHz – 2400 MHz	TDD
n41	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
n46	5150 MHz – 5925 MHz	5150 MHz – 5925 MHz	TDD

NR operating band	Uplink (UL) operating band BS receive / UE transmit	Downlink (DL) operating band BS transmit / UE receive	Duplex mode
	FUL low – FUL high	FDL low – FDL high	
n47	5855 MHz – 5925 MHz	5855 MHz – 5925 MHz	TDD
n48	3550 MHz – 3700 MHz	3550 MHz – 3700 MHz	TDD
n50	1432 MHz – 1517 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	TDD
n51	1427 MHz – 1432 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	TDD
n53	2483.5 MHz – 2495 MHz	2483.5 MHz – 2495 MHz	TDD
n65	1920 MHz – 2010 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n66	1710 MHz – 1780 MHz	2110 MHz – 2200 MHz	FDD
n67	N/A	738 MHz – 758 MHz	SDL
n70	1695 MHz – 1710 MHz	1995 MHz – 2020 MHz	FDD
n71	663 MHz – 698 MHz	617 MHz – 652 MHz	FDD
n74	1427 MHz – 1470 MHz	1475 MHz – 1518 MHz	FDD
n75	N/A	1432 MHz – 1517 MHz	SDL
n76	N/A	1427 MHz – 1432 MHz	SDL
n77	3300 MHz – 4200 MHz	3300 MHz – 4200 MHz	TDD
n78	3300 MHz – 3800 MHz	3300 MHz – 3800 MHz	TDD
n79	4400 MHz – 5000 MHz	4400 MHz – 5000 MHz	TDD
n80	1710 MHz – 1785 MHz	N/A	SUL
n81	880 MHz – 915 MHz	N/A	SUL
n82	832 MHz – 862 MHz	N/A	SUL
n83	703 MHz – 748 MHz	N/A	SUL
n84	1920 MHz – 1980 MHz	N/A	SUL
n85	698 MHz – 716 MHz	728 MHz – 746 MHz	FDD
n86	1710 MHz – 1780 MHz	N/A	SUL
n89	824 MHz – 849 MHz	N/A	SUL
n90	2496 MHz – 2690 MHz	2496 MHz – 2690 MHz	TDD
n91	832 MHz – 862 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	FDD
n92	832 MHz – 862 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	FDD
n93	880 MHz – 915 MHz	1427 MHz – 1432 MHz	FDD
n94	880 MHz – 915 MHz	1432 MHz – 1517 MHz	FDD
n95	2010 MHz – 2025 MHz	N/A	SUL
n96	5925 MHz – 7125 MHz	5925 MHz – 7125 MHz	TDD

NR operating band	Uplink (UL) operating band BS receive / UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit / UE receive		Duplex mode
	FUL low – FUL high		FDL low – FDL high		
n97	2300 MHz – 2400 MHz		N/A		SUL
n98	1880 MHz – 1920 MHz		N/A		SUL
n99	1626.5 MHz – 1660.5 MHz		N/A		SUL
n100	874.4 MHz – 880 MHz		919.4 MHz – 925 MHz		FDD
n101	1900 MHz – 1910 MHz		1900 MHz – 1910 MHz		TDD
n102	5925 MHz – 6425 MHz		5925 MHz – 6425 MHz		TDD
n104	6425 MHz – 7125 MHz		6425 MHz – 7125 MHz		TDD

Fonte: ETSI, 2022b.

Tabela 10. FR2 5G NR operating bands

Banda de operação	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit			Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive			Duplex mode
	FUL low – FUL high			FDL low – FDL high			
n257	26500 MHz	–	29500 MHz	26500 MHz	–	29500 MHz	TDD
n258	24250 MHz	–	27500 MHz	24250MHz	–	27500 MHz	TDD
n259	39500 MHz	–	43500 MHz	39500MHz	–	43500 MHz	TDD
n260	37000 MHz	–	40000 MHz	37000MHz	–	40000 MHz	TDD
n261	27500 MHz	–	28350 MHz	27500MHz	–	28350 MHz	TDD
n262	47200 MHz	–	48200 MHz	47200MHz	–	48200 MHz	TDD

Fonte: ETSI, 2022c.

6.2 Desempenho NB-IoT

NB-IoT é uma tecnologia baseada no sistema LTE desenvolvida para aplicações de IoT, tendo sido introduzida pelo 3GPP no *Release 13*. Essa tecnologia, apesar de não apresentar altas taxas de transmissão devido a sua aplicação, possui grande capacidade em termos de terminais conectados por célula (aproximadamente 50 mil) e células com área de cobertura de até 15 quilômetros (HEINS, 2022; NOKIA, 2016).

Os padrões 3GPP para NB-IoT estabelecem diferentes técnicas para que o sistema apresente as características necessárias para as aplicações de IoT, como as já

mencionadas: grande área de cobertura, elevada capacidade de terminais conectados por células e grande duração da bateria dos terminais.

Dentre as técnicas padronizadas para melhoria da área de cobertura de uma célula, destaca-se a repetição das mensagens enviadas, tanto no DL quanto no UL, propiciando o aumento da probabilidade de decodificação de mensagens, mesmo em condições de *Signal to Noise Ratio* (SNR) baixas, garantindo uma expansão da área de cobertura se comparado a um sistema LTE tradicional. Entretanto, o uso de repetições provoca latência. Sendo assim, existe uma relação de compromisso entre a área de cobertura da célula, a taxa de transmissão e a latência do sistema.

Em (BASU *et al.*, 2019) é apresentado um estudo experimental de desempenho que relaciona as três grandezas mencionadas. A Tabela 11 descreve as latências máximas e mínimas do NB-IoT de acordo com o número de repetições. Neste caso, considera-se o uso de configuração *single tone* no UL, referente a uma *Resource Unit* (RU) e um *Resource Block* (RB) alocado para DL.

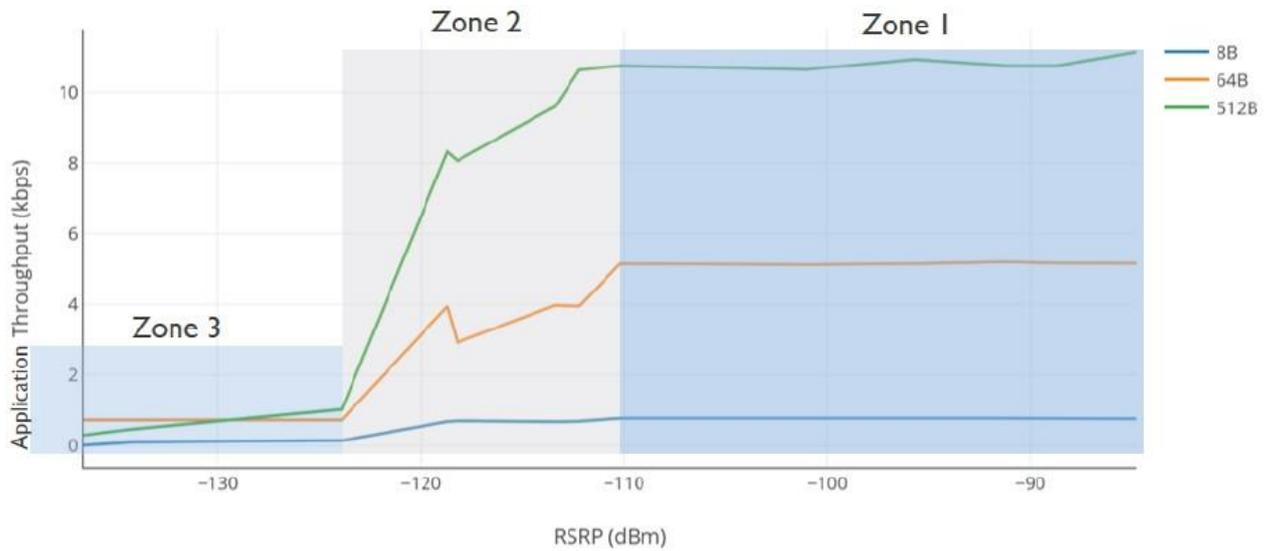
Tabela 11. Latência mínima e máxima NB-IoT para *downlink* e *uplink*

Sentido de transmissão	Latência mínima (1 RU + 0 REP)	Latência máxima (10 RUs + 2048 REPs)
<i>Downlink</i>	20 ms	22.788 ms
<i>Uplink</i>	21 ms	14.404 ms

Fonte: elaboração do autor.

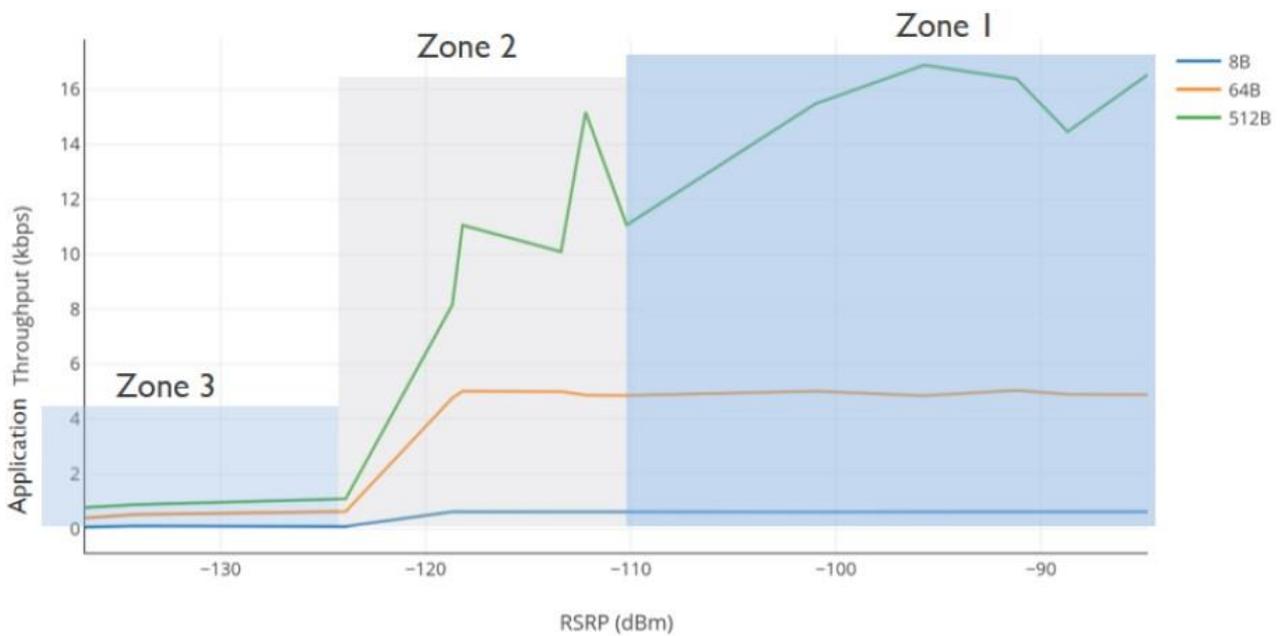
Percebe-se que as taxas de transmissão do sistema NB-IoT sofrem influência do nível de sinal recebido e, conseqüentemente, da posição do terminal em relação à rádio base. A Figura 16 e a Figura 17 mostram a taxa de transmissão de UL e DL respectivamente para pacotes enviados com tamanhos de 8, 64 e 512 *bytes* em relação ao *Reference Symbols Received Power* (RSRP).

Figura 16. Variação da taxa de dados em relação à intensidade de sinal recebida para *uplink*



Fonte: Basu *et al.*, 2019.

Figura 17. Variação da taxa de dados em relação à intensidade de sinal recebida para *downlink*



Fonte: Basu *et al.*, 2019.

Portanto, para a criação de uma *layer* no mapa de cobertura referente à tecnologia NB-*IoT* recomendam-se os níveis descritos na Tabela 11.

Tabela 11. Estimativa de taxa de transmissão NB-IoT

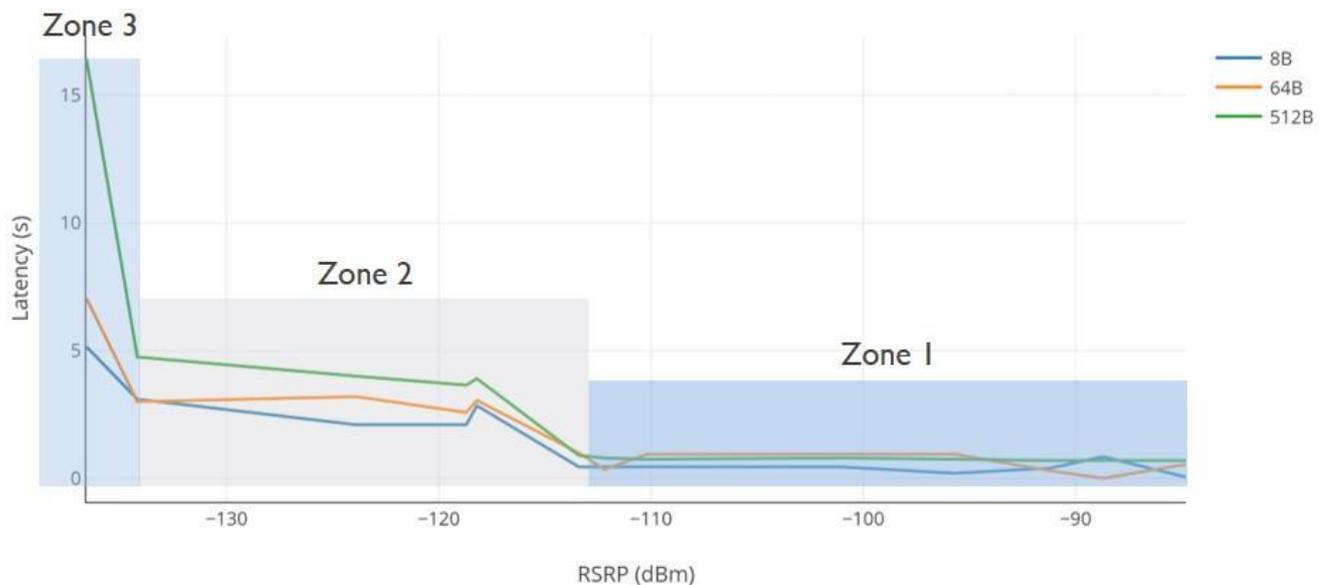
Zona	Intensidade de sinal	Taxa de transmissão
Zona 1	<-125 dBm	Baixa
Zona 2	entre -125 dBm e -110 dBm	Média
Zona 3	>-110 dBm	Alta

Fonte: elaboração do autor.

Por sua vez, em relação à latência, a **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e a

Figura 19 mostram a variação da latência de UL e DL respectivamente para pacotes enviados com tamanhos de 8, 64 e 512 *bytes* em relação ao RSRP.

Figura18. Variação da latência em relação à intensidade de sinal recebida para *uplink*



Fonte: Basu *et al.*, 2019.

Figura 19. Variação da latência em relação à intensidade de sinal recebida para *downlink*



Fonte: Basu *et al.*, 2019.

Portanto, para a criação de uma *layer* referente à latência da tecnologia NB-IoT, recomendam-se os níveis descritos na Tabela 12.

Tabela 12. Estimativa de latência NB-IoT

Zona	Intensidade de sinal	Latência
Zona 1	<-135 dBm	Alta
Zona 2	entre -135 dBm e -115 dBm	Média
Zona 3	>-115 dBm	Baixa

Fonte: elaboração do autor.

6.3 Desempenho LTE-M

O LTE-M é uma tecnologia baseada em sistemas LTE também introduzida pelo 3GPP na *Release 13* para aplicações de IoT, suportando taxas de transmissão relativamente mais elevadas (384 Kbps no DL e até 1 Mbps no UL) e latências mais baixas (50 a 100 ms) se comparada à tecnologia NB-IoT (KHALIFEH *et al.*, 2019). Vale também notar que o LTE-M suporta a aplicação *Voice Over LTE* (VoLTE) e mobilidade (*handover*), características não suportadas pelo NB-IoT. No estudo apresentado em (BERGMAN *et al.*, 2017), suportado por empresas como Ericsson, Sierra Wireless, Nokia, AT&T, Verizon, NTT Docomo, dentre outras, é possível se concluir que o LTE-M tem o mesmo desempenho que o NB-IoT em relação à cobertura.

O LTE-M emprega a mesma técnica de repetição de mensagens para melhoria de cobertura, trazendo impacto na latência do sistema. Dessa forma, também é possível se usar como referência a estimativa de latência em relação ao nível de sinal apresentada para o NB-IoT.

6.4 Estudo da influência dos parâmetros de solo e clima do modelo Longley-Rice na atenuação

O modelo de propagação Longley-Rice é válido para frequências de 20MHz a 20GHz, considerando-se diferentes ambientes e alturas das antenas transmissoras e receptoras (TORRES DO AMARAL, 2012). Os diferentes ambientes suportados pelo modelo são caracterizados por parâmetros dependentes do tipo do solo e do clima: permissividade média do solo, condutividade do solo e refratividade da superfície, sendo a última também conhecida como refratividade de rádio.

6.4.1 Definição dos parâmetros

Permissividade do solo: é referente à permissividade elétrica da superfície terrestre. Representa a característica que um material tem de se opor à passagem de corrente elétrica (ITU-R, 2017). Valores padrão são apresentados na Tabela 13.

Condutividade do solo: é referente à condutividade elétrica da superfície terrestre. Representa a característica que um material tem de conduzir corrente elétrica (ITU-R, 2017). Valores padrão são apresentados na Tabela 14.

Refratividade da superfície: representa o índice de refração da atmosfera terrestre. Seus valores dependem de fatores como pressão atmosférica, temperatura e umidade do solo (BEAN; HORN, 1959) . Valores padrão são apresentados na Tabela 15.

Tabela 13. Valores padrão de permissividade do solo

Tipo de solo	Permissividade (F/m)
Pobre	04
Médio	15
Bom	25
Úmido (água doce)	81
Úmido (água do mar)	81

Fonte: Torres do Amaral, 2012.

Tabela 14. Valores padrão de condutividade do solo

Tipo de solo	Condutividade (S/m)
Pobre	0,001
Médio	0,005
Bom	0,020
Úmido (água doce)	0,010
Úmido (água do mar)	5,000

Fonte: Torres do Amaral, 2012.

Tabela 15. Valores padrão de refratividade da superfície

Clima	Refratividade da superfície (N-unidades)
Deserto	280
Continental temperado	301
Continental sub-tropical	320
Marítimo temperado	320
Marítimo temperado sobre o mar	350
Equatorial	360
Marítimo sub-tropical	370

Fonte: Torres do Amaral, 2012.

6.4.2 Análise de impacto

As ondas eletromagnéticas têm vários mecanismos de propagação, dependentes principalmente da frequência de operação do sistema. De especial interesse neste estudo é o mecanismo de propagação denominado de ondas terrestres, compostas por ondas superficiais e espaciais. As ondas superficiais são aquelas que se propagam com o auxílio do solo, sendo predominantes em frequências menores do que 100 MHz. As ondas espaciais são aquelas que se propagam na atmosfera terrestre, sendo predominantes para frequências superiores a 100 MHz (ABREU; KOHNO, 2001).

Os parâmetros de permissividade e condutividade do solo têm grande influência na propagação de ondas terrestres (ITU-R, 1992). Como os sistemas celulares operam em frequências superiores a 100 MHz, em que o mecanismo de propagação predominante é o de ondas espaciais, pode-se considerar que os valores desses parâmetros não terão impacto significativo no resultado do modelo Longley-Rice quando empregado para predição de cobertura de sistemas celulares.

Como mencionado, a refratividade da superfície depende de fatores como pressão atmosférica, temperatura e umidade do solo, sendo essas características determinadas pelo tipo de clima, como descrito na

Segundo (IKEGAMI *et al.*, 1968), a variação do índice de refração na atmosfera terrestre causa variação do ângulo de incidência da onda eletromagnética na antena receptora, levando a perdas adicionais na intensidade do sinal recebido. Esse fenômeno é especialmente observado em frequências elevadas (dezenas de GHz) e em sistemas com antenas de alto ganho. Segundo (BEAN; THAYER, 1959), a análise da refratividade da superfície é relevante para sistemas ponto a ponto de longa distância.

Portanto, como as faixas de frequência consideradas no projeto não estão na casa das dezenas de GHz, as antenas das rádios bases e do móvel não têm um ganho elevado e um sistema celular tem características de ser ponto-multiponto, conclui-se que o referido parâmetro não terá influência significativa no resultado do modelo Longley-Rice quando empregado para predição de cobertura de sistemas celulares.

Em (AVEZ *et al.*, 2012) é apresentado um estudo para determinação dos melhores valores para os parâmetros descritos baseado em medidas reais com o objetivo de otimizar o modelo Longley-Rice e tornar os resultados de predição mais precisos. Para tal, o estudo empregou um enlace *Digital Video Broadcasting-Terrestrial* (DVB-T) baseado em sistemas *White Space Devices* (WSDs) (ponto-multiponto), operando na frequência central de 626 MHz (faixa relevante para sistemas celulares), polarização vertical, altura de antena transmissora de 90 m e altura de antena receptora de 2 m, além de parâmetros complementares.

Com isso, foram feitas análises tanto da influência individual quanto da influência global dos parâmetros no resultado final de atenuação que estes provocam, empregando-se três tipos diferentes de clima: *maritime temperate over land*, *maritime temperate over sea* e *continental temperate*. A Tabela 16 apresenta os valores de atenuação com a variação individual dos parâmetros de solo e clima apresentados. Por exemplo, a segunda coluna indica o valor mínimo, médio e máximo de atenuação de acordo com a variação do parâmetro de permissividade do solo, mantendo os demais parâmetros fixos.

Tabela 16. Valores de atenuação com a variação individual dos parâmetros de solo e clima

Atenuação	Permissividade	Condutividade	Refratividade
Atenuação mínima (dB)	13,7367	13,7424	13,7397
Atenuação média (dB)	13,7420	13,7429	13,7410
Atenuação máxima (dB)	13,7466	13,7437	13,7427

Fonte: AVEZ *et al.*, 2012.

A Tabela 17 apresenta os valores de atenuação global mínima, média e máxima com base nas diferentes combinações dos três parâmetros. Percebe-se que o valor máximo é apenas 0,014 dB maior que o valor mínimo, o que indica uma variação muito pequena se comparada com o valor total de *Path Loss* encontrado no estudo, que é de 102,1936 dB.

Tabela 17. Valor de atenuação global com a variação dos parâmetros de solo e clima

Atenuação	Permissividade / condutividade / refratividade
Atenuação mínima (dB)	13.7333
Atenuação média (dB)	13.7405
Atenuação máxima (dB)	13.7473

Fonte: AVEZ *et al.*, 2012.

Consequentemente é possível concluir que, como já esperado, os parâmetros referentes às características do solo e do clima têm influência negligenciável no resultado de predição do modelo Longley-Rice quando empregado para projetos de sistemas ponto-multiponto de pequena área de cobertura por célula, operando nas faixas de frequência relevantes para o projeto de Conectividade no Campo.

6.5 Demanda por tecnologias e sua infraestrutura

Pelo exposto, percebe-se que será necessária a instalação de novos *sites* e sua infraestrutura correlata que suportem a tecnologia LTE *Advanced Pro Release 13*, garantindo assim acesso de boa qualidade à internet banda larga e aos serviços de IoT. Vale ressaltar que esses novos *sites* propostos devem estar conectados a outros *sites* existentes ou diretamente a um *backhaul* de rede via fibras ópticas ou enlaces de micro-ondas através de redes de transporte baseadas nessas tecnologias.

Também é válido ressaltar que existem outras tecnologias como LoRAWAN (HAXHIBEQIRI *et al.*, 2018) e SigFox (SIGFOX, 2023), que têm características semelhantes às tecnologias propostas no escopo deste projeto no que tange aos serviços para IoT. Entretanto, as citadas tecnologias têm suas próprias infraestruturas, independentes da infraestrutura das redes celulares, além de não suportar o serviço de acesso em banda larga. Por isso, considera-se que as tecnologias LoWAN e SigFox não atendem à totalidade do escopo deste projeto, sendo então desconsideradas.

7. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A propagação da Covid-19, declarada pandemia pela Organização Mundial de Saúde em 2020, destacou a necessidade de reduzir a disparidade digital em suas diferentes formas. Uma fronteira crucial a ser superada é a separação entre a conectividade nas áreas urbanas e rurais, especialmente considerando a importância da atividade agroindustrial no Brasil, responsável por cerca de 25% do PIB nacional.

Com base nos valores médios de investimento deste estudo e nos indicadores de produtividade média da soja no Brasil (cerca de cinquenta sacas por hectare), um aumento de produtividade de apenas 1% no primeiro ano já seria suficiente para recuperar o investimento mais conservador de R\$ 40 por hectare conectado com a tecnologia 4G (LTE).

Existem várias ações que podem facilitar a expansão dessa infraestrutura, desde medidas regulatórias que criam um ambiente favorável para o investimento privado até a disponibilização de instrumentos de fomento e financiamento para superar as barreiras enfrentadas por empreendimentos dessa natureza.

Nesse sentido, o Brasil tem desempenhado um papel de liderança importante, contribuindo para a padronização da frequência de 450 MHz no 3GPP para serviços móveis pessoais, além de desenvolver soluções LTE na faixa de 250 MHz para uso em serviços privados limitados. Ambas as faixas são adequadas para fornecer conectividade em vastas extensões territoriais. Além disso, em um país de dimensões continentais como o Brasil, poderíamos aproveitar os espaços chamados de *white spaces* na faixa de 600 MHz, que ainda não estão destinados no país, mas já contam com um ecossistema de equipamentos desenvolvido.

Quanto ao fomento e financiamento de projetos de conectividade, existem vários instrumentos disponíveis para ampliar a conectividade no campo, seja para estimular a oferta de infraestrutura, seja para viabilizar a demanda por soluções de Agricultura 4.0. O Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações (Fust) desempenha um papel fundamental no lado da oferta, incluindo a possível melhoria no processo de arrecadação e uso por meio de mecanismos como "*pay or play*".

Os mecanismos "*pay or play*" visam estimular o cumprimento de obrigações ou metas por parte dos beneficiários de determinado programa ou fundo, oferecendo a opção de fazer um pagamento em dinheiro como alternativa ao cumprimento das exigências. Esses mecanismos são frequentemente utilizados em contextos de fomento e financiamento, como é o caso do Fust.

Neste contexto, o mecanismo "*pay or play*" propõe que as empresas de telecomunicações tenham a opção de realizar um pagamento em dinheiro em vez de cumprir as obrigações de investimento e ampliação da infraestrutura de telecomunicações em áreas rurais. Esses pagamentos podem ser usados para financiar projetos de expansão da conectividade nestas regiões.

A ideia é oferecer uma flexibilidade às empresas, permitindo que elas escolham a opção que considerem mais vantajosa. Se a empresa optar pelo pagamento em dinheiro, esse valor é direcionado para financiar projetos e iniciativas que visam suprir as demandas de conectividade nas áreas rurais. Dessa forma, mesmo que as empresas não cumpram integralmente as obrigações de investimento, ainda é possível impulsionar a expansão da conectividade por meio dos recursos obtidos por meio dos pagamentos realizados.

Isso é uma forma de equilibrar os interesses das empresas, que podem preferir a flexibilidade financeira, com a necessidade de garantir a expansão da infraestrutura de telecomunicações em áreas rurais, que muitas vezes enfrentam desafios adicionais para o acesso à conectividade. Ao oferecer essa opção, busca-se incentivar a participação das empresas na promoção da conectividade e no cumprimento das metas estabelecidas, mesmo que em formato alternativo.

Além disso, é fundamental destacar como essas melhorias podem impactar positivamente a qualidade de vida das populações locais e produtividade rural. Estudos mostram que a conectividade nas áreas rurais traz benefícios significativos para as comunidades. De acordo com o Banco Mundial, em países como Estados Unidos e Canadá, a ampliação da conectividade na área rural resultou em um aumento de 6% a 10% na produtividade agrícola.

Relatórios e estudos de organizações como a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) e a União Internacional de Telecomunicações (ITU) fornecem informações sobre experiências e resultados alcançados em diferentes países em relação à conectividade rural, IoT e 5G.

Como exemplo, podemos citar as experiências em países como Holanda e Austrália que demonstraram os benefícios da IoT na agricultura. Na Holanda, o uso de sensores e tecnologias IoT resultou em uma redução de 40% no consumo de água e energia em fazendas leiteiras, aumentando a eficiência e a sustentabilidade. Na Coreia do Sul, onde o 5G já está amplamente disponível, os agricultores utilizam drones e sensores conectados para monitorar as plantações, otimizando o uso de agroquímicos e aumentando a produtividade em até 20%.

Na Alemanha, o uso de tecnologias digitais na agricultura resultou em um aumento médio de 30% na produtividade, graças à capacidade de monitorar e controlar com maior precisão fatores como irrigação, aplicação de fertilizantes e saúde dos animais.

O Brasil pode se beneficiar dessas experiências bem-sucedidas ao promover a expansão da conectividade no campo. A conectividade rural também pode melhorar a qualidade de vida das comunidades, permitindo a oferta de serviços de telemedicina, reduzindo o tempo de deslocamento para consultas médicas e melhorando o acesso aos cuidados de saúde. Além disso, facilita o acesso à informação e à educação.

Agricultura moderna está em uma corrida contra o tempo. Os agricultores precisam cultivar mais produtos em solos deteriorados, com disponibilidade de terras em declínio e flutuações climáticas crescentes. A agricultura habilitada pela Internet das Coisas (IoT)

permite que os agricultores monitorem seus produtos e as condições em tempo real. Eles obtêm insights rapidamente, conseguem prever problemas antes que ocorram e tomam decisões informadas sobre como evitá-los. Além disso, as soluções de IoT na agricultura introduzem automação, como irrigação baseada na demanda, fertilização e colheita com robôs.

À medida que chegamos a 9 bilhões de pessoas no planeta, e 70% delas vivendo em áreas urbanas, é necessário otimizar a produção de alimentos através de cadeias capazes de alimentar tal população de forma sustentável, perene e mantendo a produtividade das áreas.

Muitas soluções de IoT agrícola são focadas na otimização do uso de recursos – água, energia, terra. A agricultura de precisão com o uso de IoT baseia-se nos dados coletados por diversos sensores no campo, o que ajuda os agricultores a alocar recursos com precisão suficiente para cada planta, individualmente.

Sistemas baseados em IoT para a agricultura de precisão não apenas ajudam os produtores a economizar água e energia, tornando a agricultura mais sustentável, mas também reduzem significativamente o uso de pesticidas e fertilizantes. Essa abordagem permite obter um produto final mais limpo e orgânico em comparação com os métodos agrícolas tradicionais.

Um dos benefícios do uso de IoT na agricultura é o aumento da agilidade dos processos. Graças a sistemas de monitoramento e previsão em tempo real, os agricultores podem responder rapidamente a qualquer mudança significativa no clima, umidade, qualidade do ar, bem como na saúde de cada cultura ou solo no campo. Em condições de mudanças extremas no clima, essas novas capacidades ajudam os profissionais da agricultura a salvar as colheitas.

A agricultura orientada por dados ajuda a produzir mais e melhores produtos. Usando sensores de solo e culturas, monitoramento aéreo por drones e mapeamento das fazendas, os agricultores entendem melhor as dependências detalhadas entre as condições e a qualidade das culturas. Usando sistemas conectados, eles podem recriar as melhores condições e aumentar o valor nutricional dos produtos.

Para tanto, é necessário ampliar o acesso à conectividade nas áreas rurais para garantir que os produtores, grandes e pequenos, possam usufruir destas tecnologias e estendê-las à suas famílias e comunidades.

Este estudo delimitou as necessidades de conectividade nas áreas rurais e áreas afastadas dos grandes centros urbanos em classes de demanda que ajudarão a traçar políticas de expansão do serviço de internet no território brasileiro.

Segundo as estimativas da Embrapa da produtividade brasileira (Embrapa, 2023), um aumento de apenas 1% na produtividade rural – R\$ 40,00 por hectares – seria o suficiente para cobrir os custos de tal expansão. Em outros países, como Alemanha, Coreia e Japão, tais coberturas percentuais e disponibilização do serviço de internet em áreas rurais e implementação de dispositivos IoT, trouxeram um ganho de 20-30%, quando considerados economia de insumos e aumento de produtividade.

Esses fatores mostram o avanço significativo na cobertura de comunicação e informatização no território brasileiro, representando que as recomendações deste estudo, são um importante investimento no desenvolvimento e na conectividade das áreas rurais do país.

Lista de figuras

Figura 1. História da evolução dos celulares e das características da conexão ao longo das últimas décadas.....	16
Figura 2. Sensores típicos usados em IoT aplicadas ao campo	18
Figura 3. Diferentes tecnologias, alcances e protocolos de transferência de dados para conectividade e IoT.....	20
Figura 4. Comparação de aplicações a serem consideradas quando da implementação de IoT.....	22
Figura 5. Diferenças entre aplicações de IoT Massiva e Crítica	33
Figura 6. Dispositivos medem as condições do solo e as agregam em um <i>gateway</i> remoto que as transmite à nuvem, onde são armazenadas e processadas para serem disponibilizadas ao usuário final.....	37
Figura 7. Crescimento do acesso à internet nos lares brasileiros no período de 2011-2021	40
Figura 8. Máquinas modernas permitem o monitoramento via sinal de internet	42
Figura 9 Representação esquemática das classes de demanda	51
Figura 10. Classes de demanda por conectividade sobre o território do Brasil	57
Figura 11. Decomposição de um trajeto hipotético entre transmissor e receptor pelo modelo ITM.....	60
Figura 12. Processo de cálculo da disponibilidade de conexão	61
Figura 13. Coberturas de 4G e 5G fornecidas pelo CGEE (esquerda – verde e laranja, respectivamente) e superfície de sinal calculada pelo ITM (direita, gradiente de vermelho, sem sinal, à verde, sinal alto).....	64
Figura 14. Velocidade média de <i>upload</i> (esquerda) e <i>download</i> (direita), em kbps, por setor censitário no Brasil	65
Figura 15. Traçado aproximado dos <i>backbones</i> no território brasileiro	66
Figura 16. Variação da taxa de dados em relação à intensidade de sinal recebida para <i>uplink</i>	75
Figura 17. Variação da taxa de dados em relação à intensidade de sinal recebida para <i>downlink</i>	75

Lista de tabelas

Tabela 1. Requisitos dos serviços LTE.....	25
Tabela 2. Comparação entre as tecnologias NB-IoT e LTE-M.....	26
Tabela 3. Base de dados consideradas para definir a demanda por conectividade rural.....	48
Tabela 4. Valores mínimo, máximo e média das variáveis numéricas usadas para calcular a demanda por conectividade no meio rural.....	49
Tabela 5. Matriz de decisão para classificação da demanda.....	52
Tabela 6. Áreas de cada classe de demanda por estado (em unidades de mil quilômetros quadrados – km ²).....	58
Tabela 7. E-UTRA <i>operating bands</i>	68
Tabela 8. 3GPP 5G NR <i>frequency ranges</i>	71
Tabela 9. FR1 5G NR <i>operating bands</i>	71
Tabela 10. FR2 5G NR <i>operating bands</i>	73
Tabela 11. Estimativa de taxa de transmissão NB-IoT.....	76
Tabela 12. Estimativa de latência NB-IoT.....	77
Tabela 13. Valores padrão de permissividade do solo.....	79
Tabela 14. Valores padrão de condutividade do solo.....	79
Tabela 15. Valores padrão de refatividade da superfície.....	79
Tabela 16. Valores de atenuação com a variação individual dos parâmetros de solo e clima.....	81
Tabela 17. Valor de atenuação global com a variação dos parâmetros de solo e clima.....	81

Lista de abreviações

3GPP	Third Generation Partnership Project
5G NR	5G New Radio
AAA	Authentication, authorization, and accounting
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AWS	Amazon Web Services
BLE	Bluetooth Low Energy
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
C2DB	Crowdsourcing for Digital Connectivity in Brazil
Cetic.br	Centro Regional de Estudos para o Desenvolvimento da Sociedade da Informação
CGEE	Centro de Gestão e Estudos Estratégicos
CoAP	Constrained Application Protocol
CPQD	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações
DL	Downlink
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte
DSL	Digital Subscriber Line
DVB-T	Digital Video Broadcasting-Terrestrial
eMBB	Enhanced Mobile Broadband
ERBs	Estações rádio base
ESALQ/USP	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
EV-DO	Evolution-Data Optimized
Finep	Financiadora de Estudos e Projetos
FISTEL	Fundo de Fiscalização das Telecomunicações
FR	Frequency Range
Funtec	Fundo de Desenvolvimento Técnico-Científico
Fust	Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações
Gbps	Gigabits por segundo
GPRS	General Packet Radio Service

GSM	Global System for Mobile Communication
GTA	Guia de Trânsito Animal
HSPA	High-Speed Packet Access
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
IA	Artificial Intelligence
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IICT	Intelligent Information and Communication Technology
IIoT	Industrial IoT
Inatel	Instituto Nacional de Telecomunicações
IoT	Internet das Coisas, do inglês Internet of Things
IMT	International Mobile Telecommunications
ISP	Internet Service Provider
ITM	Irregular Terrain Model
kbps	Kilobits por segundo
LoRa	Long Range
LTE	Long-Term Evolution
LTE-M	LTE Machine
Mbps	Megabits por segundo
MAPA	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MCom	Ministério das Comunicações
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MIMO	Multiple Input Multiple Output
ML	Machine Learning
mMTC	Massive Machine Type Communication
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
NB-IoT	Narrow Band IoT
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Networks
RB	Resource Block

RSRP	Reference Symbols Received Power
RU	Resource Unit
SLP	Serviço Limitado Privado
SMS	Short Message Service
SNR	Signal to Noise Ratio
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
TSC	Tata Consultancy Services
UBS	Unidades Básicas de Saúde
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
URLLC	Ultra-Reliable Low-Latency Communication
VBP	Valor Bruto da Produção
VoLTE	Voice Over LTE
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WDS	White Space Device

Referências

- 3GPP. **Introducing 3GPP**. 2022. Disponível em: <https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp>
- 3GPP. **Standardization of NB-IOT completed**. Sophia Antipolis: Jun 21, 2016. Disponível em: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/nb-iot-complete>
- 3GPP. **TS 36.101 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception release 17, 2022**.
- 3GPP. **TS 38.101-1 NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone release 17, 2022**.
- 3GPP. **TS 38.101-2 NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone release 17, 2022**.
- ABREU, G.; KOHNO, R. Adaptively sampled near-field smart array antenna for indoor wireless communications. *IEICE transactions on communications*, v. 84, n. 7, 2001, p. 1743-1759. Disponível em: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6770520>
- ACCENT SYSTEMS. **Differences between NB-IOT and LTE-M**. 2021. Disponível em: <https://accent-systems.com/differences-nb-iot-lte-m/>
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES – ANATEL. **Ato n. 6539, de 18 de outubro de 2019**. 2019. Disponível em: https://sei.anatel.gov.br/sei/publicacoes/controlador_publicacoes.php?acao=publicacao_visualizar&id_documento=5442720&id_orgao_publicacao=0
- AVEZ, P.; VAN WESEMAEL, P.; BOURDOUX, A.; CHIUMENTO, A.; POLLIN, S.; MOEYAERT, V.). Tuning the Longley-Rice propagation model for improved TV white space detection. *In: IEEE Symposium on Communications and Vehicular Technology in the Benelux (SCVT)*, 19., Eindhoven, Netherlands, 2012. **Trabalho apresentado...** Eindhoven, Netherlands, 2012. p. 1-6. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/SCVT.2012.6399400>
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Consulta CFI; credenciamento FINAME**. Catálogo de produtos. 2022d. Disponível em: https://ws.bndes.gov.br/cfi_catalogo/
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Funttel BNDES – Fundo para o desenvolvimento tecnológico das telecomunicações – Crédito inovação direto**. 2023d. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/funttel>
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **Inovagro**. 2023b. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/inovagro>
- BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES. **PRODECOOP- Programa de desenvolvimento cooperativo para agregação de**

valor à produção agropecuária. 2023c. Disponível em:
<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/prodecoop>

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES.
Relação dos bens, máquinas e equipamentos habilitados para financiamento pelo Programa “Máquinas 4.0”. 2022e. Disponível em:
<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/ad63a405-b0db-410e-a6a0-b08b1142163b/M%C3%81QUINAS+4.0.pdf?MOD=AJPERES&CVID=n-usCKr>

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES.
Relação dos serviços habilitados para financiamento pelo Programa “Serviços 4.0”. 2022c. Disponível em:
<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/8534be8b-3795-4d6e-b340-68dcb515da85/SERVI%C3%87OS+4.0.pdf?MOD=AJPERES&CVID=n-utfTr>

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES.
Produto BNDES FINEM. Glossário de itens financiáveis. 12 p. 2022b. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/52603e4e-407a-4cc4-8122-e0d4419e59fd/BNDES-Finem-itens-financiaveis.pdf?MOD=AJPERES&CVID=IGVAvR6>

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES.
Programa BNDES Finame Funttel. 2022a. Disponível em:
<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/finame-funttel#>

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL – BNDES.
Relação de itens passíveis de financiamento da FUNTTEL. 2023a. Disponível em:
<https://www.bndes.gov.br/wps/wcm/connect/site/38675558-b8fa-41a6-a81f-37a9df636196/FUNTTEL.pdf?MOD=AJPERES&CVID=opxbSPD>

BASU, S.S.; SULTANIA, A.K.; FAMAEEY, J.; HOEBEKE, J. Experimental performance evaluation of NB-IoT. *In: INTERNATIONAL Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Barcelona, Spain 21-23 oct. 2019. Trabalho apresentado...* Barcelona, Spain: p.1-6. 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/WiMOB.2019.8923221>

BEAN, B.; HORN, J. Radio-refractive-index climate near the ground. **Journal of Research of the National Bureau of Standards-D. Radio Propagation**, v.63D, n.3, nov.-dec. 1959. p.259–271. Disponível em:
https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/63D/jresv63Dn3p259_A1b.pdf

BEAN, B.; THAYER, G. Models of the atmospheric radio refractive index. **Proceedings of the IRE**, v. 47, n. 5, p. 740–755. 1959. Disponível em:
<https://doi.org/10.1109/JRPROC.1959.287242>

BERGMAN, J.; BITRAN, Y.; BEALE, M.; CANNON, M.; HOLDEN, R.; CHAN, Y.S.; TOLEDANO, R.; LE BRAS, R.; WAKAYAMA, T.; RATASUK, R.; OKUBO, N.; PARK, K.; AKIMOTO, Y.; SIREGAR, T.H.; LEE, S. **Coverage analysis for LTE-M Category-M1.** White Paper. jan. 2017. Disponível em: <https://altair.sony-semicon.com/wp-content/uploads/2017/02/Coverage-Analysis-of-LTE-CAT-M1-White-Paper.pdf>

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. **Cenários e perspectivas da conectividade para o agro.** Brasília: MAPA/AECS, 2021a.

Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/conectividade-rural/livro>

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia – MCT. **Portaria MCT nº 950, de 12 de dezembro de 2006.** Caracteriza bens ou produtos com tecnologia desenvolvida no País, para efeito do disposto na Lei nº 8.248, de 23.10.91 e no Decreto nº 5.906, de 26.09.2006. 2006. Disponível em: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/lei-de-tics/arquivos_lei_tics/portaria-950.pdf/@@download/file

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI. **Portaria MCTI nº 4.514, de 02 de março de 2021.** Dispõe sobre as condições dos investimentos em atividades de pesquisa, desenvolvimento e inovação decorrentes de tecnologias desenvolvidas no País para efeitos do atendimento ao Decreto nº 10.356, de 20.05.2020. 2021c. Disponível em: https://antigo.mctic.gov.br/mctic/opencms/legislacao/portarias/Portaria_MCTI_n_4514_de_02032021.html

BRASIL. Ministério das Comunicações - MCOM. **Caderno de projetos do Conselho Gestor do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações – CG-FUST.** 2023a. Disponível em: https://www.gov.br/mcom/pt-br/arquivos/fust/CadernodeProjetosCGFUST2023verso_final_aprovada.pdf. Acesso em: fev.2023.

BRASIL. Ministério das Comunicações - MCOM. **Programa Wi-Fi Brasil.** 2023b. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/programas-projetos-acoes-obras-e-atividades/wi-fi-brasil>

BRASIL. Ministério das Comunicações - MCOM. **Portaria MCOM nº 6.098, de 01 de julho de 2022.** Estabelece os objetivos estratégicos para o quinquênio 2022-2027 do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações. 2022a. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-mcom-n-6.098-de-1-de-julho-de-2022-413374283>

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 9.547, de 30 de outubro de 2018.** Dispõe o Programa Brasil Mais Produtivo. 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2015-2018/2018/Decreto/D9547.htm#:~:text=DECRETO%20N%C2%BA%209.547%2C%20DE%2030%20DE%20OUTUBRO%20DE%202018&text=Institui%20o%20Programa%20Brasil%20Mais,que%20lhe%20confere%20o%20art.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 11.004, de 21 de março de 2022.** Dispõe sobre a Regulamenta a Lei nº 9.998, de 17 de agosto de 2000, que institui o Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações. 2022b. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?jornal=515&pagina=2&data=22/03/2022>

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997.** Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9472.htm

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 9.998, de 17 de agosto de 2000**. Institui o Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações. 2000. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9998.htm

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 14.173, de 15 de junho de 2021**. Altera a Medida Provisória nº 2.228-1, de 6 de setembro de 2001, para modificar valores da Contribuição para o Desenvolvimento da Indústria Cinematográfica Nacional, a Lei nº 5.070, de 7 de julho de 1966, para modificar valores da Taxa de Fiscalização de Instalação, a Lei nº 11.652, de 7 de abril de 2008, para modificar valores da Contribuição para o Fomento da Radiodifusão Pública, e as Leis nºs 9.998, de 17 de agosto de 2000, 9.472, de 16 de julho de 1997, 13.649, de 11 de abril de 2018, 4.117, de 27 de agosto de 1962, e 12.485, de 12 de setembro de 2011; e revoga dispositivo da Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009. 2021b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2021/Lei/L14173.htm

BUCCO, Rafael. Anatel e Aneel esperam chegar a acordo sobre postes este ano. **Tele síntese**, mar. 2023. Disponível em: <https://www.telesintese.com.br/anatel-e-aneel-esperam-chegar-a-acordo-sobre-postes-este-ano/>. Acesso em: mar. 2023

BUCCO, Rafael. Presidente da Anatel reconhece que saldo do FUST não retornará. **Tele síntese**, mai. 2021. Disponível em: <https://www.telesintese.com.br/presidente-da-anatel-reconhece-que-saldo-do-fust-nao-retornara/>

CELPLAN. A tecnologia sem fio evoluiu significativamente ao longo dos anos e essa evolução pode ser classificada, pela tecnologia base utilizada, em várias gerações. 2021. Disponível em: <https://celplan.com.br/tecnologias/>

CENTRO REGIONAL DE ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA SOCIEDADE DA INFORMAÇÃO – CETIC. **Pesquisa TIC Domicílios 2021**; Resumo executivo. Disponível em: https://cetic.br/media/docs/publicacoes/2/20221121125804/resumo_executivo_tic_domicilios_2021.pdf

CENTRO REGIONAL DE ESTUDOS PARA O DESENVOLVIMENTO DA SOCIEDADE DA INFORMAÇÃO – CETIC; Núcleo de Informação e Coordenação do Ponto BR – NIC; Comitê Gestor da Internet no Brasil - CGI. **Pesquisa sobre o uso das tecnologias de informação e comunicação nos domicílios brasileiros – TIC Domicílios 2021**; lançamento dos resultados. Disponível em: https://cetic.br/media/analises/tic_domicilios_2021_coletiva_imprensa.pdf

CONNECTARAGRO. Falta de conectividade no campo: como tornar o agro mais conectado? **Blog ConectarAgro**, jul. 2022. Disponível em: <https://blog.conectaragro.com.br/falta-de-conectividade-no-campo-como-tornar-o-agro-mais-conectado/>

CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL – CNA; Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada – CEPEA/ESALQ. Após alcançar patamar recorde em 2021, PIB do agronegócio recua 4,22% em 2022. **PIB DO AGRONEGOCIO**, mar. 2023. 20 p. Disponível em: <https://www.cepea.esalq.usp.br/upload/kceditor/files/PIB-DO-AGRONEGOCIO-2022.17MAR2023.pdf>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Homepage**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/>. Acesso em: mar. 2023.

ETSI. **Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 Release 17)**. 2022a. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/17.06.00_60/ts_136101v170600p.pdf

ETSI. **User Equipment (UE) radio transmission and reception**. Part 1: Range 1 Standalone (3GPP TS 38.101-1 Release 17). 2022b. Disponível em:

https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/13810101/17.05.00_60/ts_13810101v170500p.pdf

ETSI. **User Equipment (UE) radio transmission and reception**. Part 2: Range 2 Standalone (3GPP TS 38.101-2 Release 17). 2022c. Disponível em:

<https://mail.google.com/mail/u/0/#inbox/WhctKKXwxsVcHtjCXTJDwRHdDKcbNhQJzdVKtqrRtTqwZLwsRnHWITBwWtrgjQQJdCxjgWI>

FIBERX. Falta de conectividade na área rural atinge 73% dos produtores. **Portal do Agronegócio**: out. 2022. Disponível em:

<https://www.portaldoagronegocio.com.br/tecnologia/conectividade-e-digital/noticias/falta-de-conectividade-na-area-rural-atinge-73-dos-produtores>

FUNDO DE UNIVERSALIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES – FUST. **Caderno de projetos do Conselho Gestor do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações – CG-FUST**. 2023. Disponível em:

https://www.gov.br/mcom/pt-br/arquivos/fust/CadernodeProjetosCGFUST2023verso_final_aprovada.pdf

FUNDO DE UNIVERSALIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES – FUST. **Programas do Conselho Gestor do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações – CG-FUST**. 2022c. Disponível em:

https://www.gov.br/mcom/pt-br/arquivos/fust/2022-09_fust_programas.pdf

FUNDO DE UNIVERSALIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES – FUST. Conselho Gestor – CG. **Resolução CG-FUST n. 2, de 8 de agosto de 2022**. Disciplina a aplicação de recursos do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações - Fust. 2022a. Disponível em: <https://www.gov.br/mcom/pt-br/arquivos/fust/resolucao-cg-fust-no-2-de-8-de-agosto-de-2022-consolidada.pdf>

FUNDO DE UNIVERSALIZAÇÃO DOS SERVIÇOS DE TELECOMUNICAÇÕES – FUST. Conselho Gestor – CG. **Resolução CG-FUST n. 3, de 29 de dezembro de 2022**. Altera a Resolução CG-Fust nº 2, de 8 de agosto de 2022, que disciplina a aplicação de recursos do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações - Fust. 2022b. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-cg-fust-n-3-de-29-de-dezembro-de-2022-458161263>

GASKEL, Adi. Research explores the economic benefits of remote work during covid-19. **Forbes**, 2022. <https://www.forbes.com/sites/adigaskell/2022/02/15/research-explores-the-economic-benefits-of-remote-work-during-covid/?sh=3b202a5376cc>

GS1BRASIL. **Índice Agrotech**. Mensura a adoção de tecnologias e a evolução da digitalização do agronegócio brasileiro. Nov, 2021. Disponível em: <https://www.gs1br.org/indices-e-pesquisas/indices/indice-gs1-agro>

GSMA. **The state of mobile internet connectivity 2021**. London: 2021. Disponível em: <https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2021/09/The-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2021.pdf>

GSMA. **The state of mobile internet connectivity 2022**. London: 2022. Disponível em: https://www.gsma.com/r/wp-content/uploads/2022/12/The-State-of-Mobile-Internet-Connectivity-Report-2022.pdf?utm_source=website&utm_medium=download-button&utm_campaign=somic22

HAXHIBEQIRI, J.; DE POORTER, E.; MOERMAN, I.; HOEBEKE, J. A Survey of LoRaWAN for IoT: From Technology to Application. **SENSORS**, v.18, n.11, p. 3995, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/s18113995>

HEINS, K. **NB-IoT use cases and devices**: design guide. Springer Nature: 2021.

INSIDER. **Here's how the Internet of Things will explode by 2020**. Insider Intelligence: apr. 2016. Disponível em: <https://www.businessinsider.com/iot-ecosystem-internet-of-things-forecasts-and-business-opportunities-2016-4-28>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Internet já é acessível em 90,0% dos domicílios do país em 2021**. set. 2022. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-noticias/2012-agencia-de-noticias/noticias/34954-internet-ja-e-acessivel-em-90-0-dos-domicilios-do-pais-em-2021>

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Levantamento sistemático da produção agrícola**. Estatística da produção agrícola, IBGE: abr. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9201-levantamento-sistematico-da-producao-agricola.html?=&t=resultados>

INSTITUTO INTERAMERICANO DE COOPERAÇÃO PARA A AGRICULTURA - IICA. **A conectividade rural plena é estratégica para o desenvolvimento da América Latina e do Caribe, advertem especialistas durante apresentação de pesquisa do IICA e seus parceiros**. São José: 2022. Disponível em: <https://www.iica.int/pt/prensa/noticias/conectividade-rural-plena-e-estrategica-para-o-desenvolvimento-da-america-latina-e>

IKEGAMI, F.; AKIYAMA, T.; AOYAGI, S.; YOSHIDA, H. Variation of radio refraction in the lower atmosphere. **IEEE Transactions on Antennas and Propagation**, v. 16, n. 2, p. 194–200. 1968. <https://doi.org/10.1109/TAP.1968.1139133>

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - ITU-R. **Electrical characteristics of the surface of the earth** (Recommendation ITU-R P.527-4). 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/rec/R-REC-P.527/en>

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION – ITU. **Global connectivity report 2022**. 2022. Disponível em: <https://www.itu.int/hub/publication/d-ind-global-01-2022/>. Acesso em: mar. 2023

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION - ITU-R. **Ground-wave propagation curves for frequencies between 10 kHz AND 30 MHz** (Recommendation ITU-R P.368-7). 1992. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.368-7-199203-S!!PDF-E.pdf

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION – ITU. **The last-mile internet connectivity solutions guide; sustainable connectivity options for unconnected sites.** Geneve: 2020. 160p. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pub/itu-d/opb/tnd/D-TND-01-2020-PDF-E.pdf. Acesso em: mar. 2023

KHALIFEH, A.; ALDAHDOUH, K.A.; DARABKH, K.A.; AL-SIT, W. A Survey of 5G emerging wireless technologies featuring lorawan, Sigfox, NB-IoT and LTE-M. 2019 International Conference on Wireless Communications Signal Processing and Networking (WiSPNET), Chennai, India, 21-23 mar. 2019. **Trabalho apresentado...** Chennai, India, 2019 p. 561–566.

METICULOUS RESEARCH. **Agriculture equipment market by type (tractors, harvesting equipment, irrigation & crop processing equipment, spraying & handling equipment), mode of operation (manual, automatic), application (land development, harvesting)** - global forecast to 2029. Out. 2022. Disponível em: <https://www.meticulousresearch.com/product/agriculture-equipment-market-5374>

MILANEZ, A.Y.; MANCUSO, R.V.; MAIA, G.B. da S.; GUIMARÃES, D.D.; ALVES, C.E.A.; MADEIRA, R.F. Conectividade rural: situação atual e alternativas para superação da principal barreira à agricultura 4.0 no Brasil. **BNDES set.** v.26, n.52, p.7-43, set. 2020. Disponível em: https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/20180/1/PR_Conectividade%20rural_BD.pdf

NOKIA. **LTE evolution for IoT connectivity.** White Paper, 2016. Disponível em: https://halberdbastion.com/sites/default/files/2017-06/Nokia_LTE_Evolution_for_IoT_Connectivity_White_Paper.pdf

PARSONS, J.D. **The mobile radio propagation channel** (2nd ed). J. Wiley. 2000.

ROSENCRANSE, Linda. Narrowband IoT (NB-IoT). **WhatIs.com.** apr. 2020. Disponível em: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/narrowband-IoT-NB-IoT>

SALMAN, A. Alqahtani. Performance evaluation of a priority-based resource allocation scheme for multiclass services in IoT. **International Journal of Communication Systems:** 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/dac.4151>

SAXENA, Vidit *et al.* Reducing the modem complexity and achieving deep coverage in LTE for machine-type communications. *In: IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM).* Washington, DC, USA, 2016. **Trabalho apresentado...** 2016. p. 1-7.

SEIXAS, M.A.; CONTINI, E. **Internet das coisas (IoT):** Inovação para o agronegócio. 2017. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1094005/1/Internetdascoisas1.pdf>

SIGFOX. **Sigfox OG technology by Unabiz.** 2023. Disponível em: <https://www.sigfox.com/>

SMITH, A.A. **Radio frequency principles and applications**-the generation, propagation and reception of signals and noise radio frequency principles and applications-the generation, propagation and reception of signals and noise. Wiley-IEEE Press: 1998. 240p.

SOUZA, C.M. *et al.* Reconstructing three decades of land use and land cover changes in Brazilian biomes with landsat archive and earth engine. **Remote Sensing**. v. 12, n. 17, p. 27-35. 2020. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Eduardo-Rosa-9/publication/343851866_Reconstructing_Three_Decades_of_Land_Use_and_Land_Cover_Changes_in_Brazilian_Biomes_with_Landsat_Archive_and_Earth_Engine/links/5f44efbf299bf13404f1caa8/Reconstructing-Three-Decades-of-Land-Use-and-Land-Cover-Changes-in-Brazilian-Biomes-with-Landsat-Archive-and-Earth-Engine.pdf

SPAROVEK, G. *et al.* Who owns Brazilian lands? **Land Use Policy**, n.87, 2019. p.104062. Disponível em: https://www.oeco.org.br/wp-content/uploads/2019/07/Who-owns-Brazilian-lands_Artigo_Land-Use-Policy.pdf

TELETIME. **Trópico e Furukawa atingem interoperabilidade de soluções LTE em 250 MHz**. mar. 2023. Disponível em: <https://teletime.com.br/08/03/2023/tropico-e-furukawa-atingem-interoperabilidade-de-solucoes-lte-em-250-mhz/>

TORRES DO AMARAL, C. **Uma Análise do modelo de propagação longley-rice sob a perspectiva de ambientes urbanos localizados em área de clima tropical**. 2012. Tese (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-95QJL2/1/disserta__o_cristiano_torres_do_amaral.pdf

TRANSPARENT SUPPLY CHAINS FOR SUSTAINABLE ECONOMIES – TRASE. **Homepage**. 2022. Disponível em: <https://trase.earth/>

UNITED NATIONS - UN. **World Population Prospects 2022**. ONU: 2022. Disponível em: <https://population.un.org/wpp/Download/Standard/MostUsed/>

WORLDPOP. School of Geography and Environmental Science, University of Southampton; Department of Geography and Geosciences, University of Louisville; Departement de Geographie, Université de Namur and Center for International Earth Science Information Network (CIESIN), Columbia University. **Global High Resolution Population Denominators Project** - Funded by The Bill and Melinda Gates Foundation (OPP1134076). 2020. Disponível em: <https://hub.worldpop.org/ajax/pdf/summary?id=39835>