



**INSTITUTO FEDERAL DO AMAZONAS  
CAMPUS MANAUS DISTRITO INDUSTRIAL  
TECNOLOGIA EM SISTEMAS DE TELECOMUNICAÇÕES**

Rômolo de Sá Oliveira

**ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DA REDE DE TELEFONIA MÓVEL  
CELULAR 5G NA CIDADE DE MANAUS-AM: ESTUDO DE CASO**

MANAUS – AM

2025

**Rômolo de Sá Oliveira**

**ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DA REDE DE TELEFONIA MÓVEL  
CELULAR 5G NA CIDADE DE MANAUS-AM: ESTUDO DE CASO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas - Campus Manaus Distrito Industrial (IFAM-CMDI), como requisito para obtenção do diploma do Curso Superior de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações.

Orientador: Prof. MSc Carlos Fontinelle

MANAUS – AM

2025

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

O48a	<p>Oliveira, Rômolo de Sá. Análise da implantação da rede de telefonia móvel celular 5G na Cidade de Manaus-AM: estudo de caso / Rômolo de Sá Oliveira. — Manaus, 2025. 72f.: il. color.</p> <p>Monografia (Graduação) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas, <i>Campus</i> Manaus Distrito Industrial, Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, 2025. Orientador: Prof. Carlos Gomes Fontinelle, Me.</p> <p>1. Telecomunicações. 2. 5G. 3. Inclusão digital. I. Fontinelle, Carlos Gomes. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas. III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.382</p>
------	--

Elaborada por Oziane Romualdo de Souza (CRB11/ nº 734).



## ANEXO 7

### ATA DE DEFESA PÚBLICA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 29 dias do mês de ABRIL de 2025, às 15:45h, o(a) discente RÔMULO DE SA OLIVEIRA apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para avaliação da Banca Examinadora constituída pelos seguintes integrantes: CARLOS GOMES FONTINELLE (docente-orientador), ALYSSON DE JESUS DOS SANTOS (Membro 1) e ALEXANDRE LOPES MARTINIANO (Membro 2). A sessão pública de defesa foi aberta pelo presidente da banca, que apresentou a Banca Examinadora e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC, que tem como título ANÁLISE DE IMPLANTAÇÃO DE 5G EM MANAUS. Na sequência, o discente teve até 30 minutos para a comunicação oral de seu trabalho. Cada integrante da banca examinadora fez suas arguições após a defesa do mesmo. Ouvidas as explicações do discente, a banca examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou e decidiu pela APROVAÇÃO com média final 9,6 (NOVE VIRGULA SEIS) do referido trabalho.

Foi dada ciência ao discente que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o dia 05 / 05 / 2025, com as devidas alterações sugeridas pela banca. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 16:30, sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo discente.

Prof.(a) Orientador(a)/Presidente: Carlos Gomes Fontinelle  
Prof.(a) Avaliador 1: Alysson de Jesus dos Santos  
Prof.(a) Avaliador 2: Alexandre Lopes Martiniano  
Discente: Rômulo de Sa Oliveira

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus que sem Ele nada seria possível.

Posteriormente, agradeço à minha mãe, Regina de Sá oliveira, que me ensinou o valor das conquistas por mérito próprio, pela criação, amor incondicional, trabalho, dedicação e honestidade. Serei eternamente grato a ela.

À minha esposa, Samara Santos de Andrade, por me ajudar diretamente, me apoiar nos momentos mais difíceis, compreender a importância dessa conquista e aceitar a minha ausência quando era necessário.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas (IFAM) que ofereceu uma valorosa oportunidade para o meu ingresso num curso superior.

À empresa Claro S.A. pelo fornecimento do conhecimento prático das pesquisas desenvolvidas para enriquecer o resultado obtido no resultado final do trabalho.

Ao meu Orientador, Prof. Me. Carlos Gomes Fontinelle, pelo empenho, paciência e credibilidade. Muito obrigado por tudo.

Ao Coordenador do Curso de Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações, Prof. Me. Carlos Gomes Fontinelle, pela paciência, atenção e acima de tudo pelo empenho na gestão de deste curso do IFAM-CMDI.

Aos demais professores, pela paciência e compreensão na hora do aprendizado.

Aos demais familiares e amigos que torceram e acreditaram na conclusão deste curso.

## RESUMO

A evolução das tecnologias de telecomunicações tem provocado profundas transformações na sociedade contemporânea, especialmente com a chegada da quinta geração de redes móveis, conhecida como 5G. Esta tecnologia promete maior velocidade de conexão, menor latência e capacidade de conectar um número significativamente maior de dispositivos simultaneamente, viabilizando o avanço de soluções como Internet das Coisas (IoT), cidades inteligentes, automação industrial e conectividade em tempo real. No entanto, a implantação do 5G em regiões com características geográficas e socioeconômicas específicas, como a cidade de Manaus-AM, apresenta desafios técnicos, logísticos e sociais que merecem investigação científica. Este trabalho tem como objetivo analisar os principais fatores que influenciam a implantação da rede de telefonia móvel 5G em Manaus, considerando sua infraestrutura tecnológica atual, os entraves logísticos da região amazônica, o impacto socioeconômico da tecnologia e as perspectivas para o desenvolvimento da Indústria 4.0 no Polo Industrial de Manaus (PIM). A pesquisa adotou a metodologia do estudo de caso, com abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentada em revisão bibliográfica, análise documental e coleta de dados secundários provenientes de fontes como ANATEL, IBGE, ITU e relatórios de operadoras de telecomunicações. Os resultados indicam que, apesar dos avanços já observados em termos de cobertura e disponibilidade de espectro, persistem limitações relacionadas à infraestrutura de fibra óptica, à densidade de antenas e à desigualdade de acesso em áreas periféricas e ribeirinhas. Além disso, a integração do 5G ao parque industrial local ainda requer investimentos significativos em modernização e capacitação técnica. Conclui-se que, para que os benefícios do 5G sejam amplamente alcançados em Manaus, é fundamental o alinhamento entre políticas públicas, ações das operadoras e esforços de inclusão digital. O estudo contribui para a compreensão dos desafios regionais da implementação do 5G no Brasil e fornece subsídios para estratégias de desenvolvimento tecnológico mais equitativas e sustentáveis.

**Palavras-chave:** 5G. Telecomunicações. Manaus-AM. Inclusão digital. Indústria 4.0.

## ABSTRACT

The evolution of telecommunications technologies has brought significant transformations to contemporary society, particularly with the advent of fifth-generation mobile networks, known as 5G. This technology promises higher connection speeds, lower latency, and the ability to connect a significantly larger number of devices simultaneously, enabling advancements in solutions such as the Internet of Things (IoT), smart cities, industrial automation, and real-time connectivity. However, the deployment of 5G in regions with specific geographic and socio-economic characteristics, such as the city of Manaus-AM, presents technical, logistical, and social challenges that warrant scientific investigation. This study aims to analyze the main factors influencing the implementation of the 5G mobile network in Manaus, considering its current technological infrastructure, the logistical obstacles posed by the Amazon region, the socio-economic impact of the technology, and the prospects for the development of Industry 4.0 within the Manaus Industrial Hub (PIM). The research adopts a case study methodology with a qualitative and quantitative approach, based on bibliographic review, document analysis, and secondary data collection from sources such as ANATEL, IBGE, ITU, and telecommunications operator reports. The results indicate that, despite recent progress in terms of coverage and spectrum availability, there are still limitations related to fiber optic infrastructure, antenna density, and unequal access in peripheral and riverside areas. Furthermore, the integration of 5G into the local industrial sector still requires substantial investments in modernization and technical training. The study concludes that achieving the full benefits of 5G in Manaus requires coordinated efforts between public policies, operator strategies, and digital inclusion initiatives. This research contributes to the understanding of regional challenges in the deployment of 5G in Brazil and provides insights for more equitable and sustainable technological development strategies.

**Keywords:** 5G. Telecommunications. Manaus-AM. Digital inclusion. Industry 4.0.

## LISTAS DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Sistemas da Telefonia Móvel Celular .....	21
Figura 2 – Rede de Dados na tecnologia 4G. ....	29
Figura 3 – Topologias 2G, 3G e 4G .....	31
Figura 4 – Arquitetura da tecnologia 5G <i>Stand Alone</i> .....	36
Figura 5 – Pilares Técnicos da tecnologia 5G. ....	36
Figura 6 – Sistema MIMO 2x2.....	37
Figura 7 – Pilares técnicos da tecnologia 5G.....	39
Figura 8 – Principais releases habilitadoras 5G.....	41
Figura 9 – Bastidor de energia.....	50
Figura 10 – Controlador da gnodeB .....	51
Figura 11 - Antenas de módulos de RF .....	51
Figura 12 - Site completo. ....	52
Figura 13 – GnodeB (5G) SA-1 .....	52
Figura 14 – GnodeB (5G) SA-1 .....	53
Figura 15 - Gnodeb (5G) NSA-1.....	53
Figura 16 – GnodeB (5G) NSA-2.....	54
Figura 17 – GnodeB (5G) NSA 3 .....	54
Figura 18 – Rede IPRAN (backhaul) da operadora. ....	55
Figura 19 – Rede Backbone da Operadora Claro. ....	55
Figura 20 – Mapa de calor de cobertura do sinal 5G em Manaus. ....	56
Figura 21 – Mapa de sinal de cobertura 5G.....	57
Figura 22 – Tecnologias 5G NSA e SA .....	57
Figura 23 – Releases de SW.....	58
Figura 24 – Teste de download. ....	58
Figura 25 – Histórico da evolução da cobertura por atendimento de moradores em Manaus-AM. ....	59
Figura 26 – Estações 5G ativas em Manaus-AM (abril de 2025).....	60
Figura 27 – Estações 5G ativas em São Paulo (abril de 2025). ....	60
Figura 28 – Cobertura estimada de 6,98% da área urbana de Manaus-AM. ....	61
Figura 29 – Cobertura estimada de 87,68 da área urbana de São Paulo – SP.....	61

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Estações de 5G instaladas pela Operadora em Manaus em 2022. ....	49
Tabela 2 – Perspectiva de crescimento da cobertura 5G. ....	66

## LISTA DE SIGLAS

AMPS: *Advanced Mobile Phone System*

AMF: *Access and Mobility Management Function*

AUC: *Authentication Center*

AUSF: *Authentication Server Function*

ANATEL: Agência Nacional de Telecomunicações

BBIP: *Backbone IP*

BSC: *Base Station Controller*

BTS: *Base Transceiver Station*

CDMA: *Code Division Multiple Access*

CMDI: Campus Manaus Distrito Industrial

CS Core: *Circuit Switched Core*

DNS: *Domain Name System*

EDGE: *Enhanced Data rates for GSM Evolution*

eMBB: *enhanced Mobile Broadband*

EIR: *Equipment Identity Register*

EPC: *Evolved Packet Core*

1G: *First Generation*

2G: *Second Generation*

3G: *Third Generation*

3GPP: *Third Generation Partnership Project*

4G: *Fourth Generation*

5G: *Fifth Generation*

5GC: *5G Core*

5G DSS: *5G Dynamic Spectrum Sharing*

5G NR: *5G New Radio*

5G NSA: *5G Non Standalone*

5G SA: *5G Standalone*

FIFA: *Fédération Internationale de Football Association*

FM: *Frequency Modulation*

FUST: *Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações*

GPRS: *General Packet Radio Service*

GGSN: *Gateway GPRS Support Node*  
GPS: *Global Positioning System*  
GSM: *Global System Mobile*  
GSMA: *GSM MoU Association*  
HSPA: *High Speed Packet Access*  
HLR: *Home Location Register*  
HSS: *Home Subscriber Server*  
IBGE: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
iDNS: *internal Domain Name System*  
IEEE: *Institute of Electrical and Electronics Engineers*  
IFAM: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Amazonas  
IP: *Internet Protocol*  
IPRAN: *IP Radio Access Network*  
IMT: *International Mobile Telecommunication*  
IoT: *Internet of Things*  
ITU: *International Telecommunication Union*  
LTE: *Long Term Evolution*  
LGPD: Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais  
mMTC: *massive Machine Type Communications*  
MME: *Mobility Management Entity*  
MMS: *Multimedia Messaging Service*  
MIMO: *Multiple-Input Multiple-Output*  
MGW: *Media Gateway*  
MSC: *Mobile Switching Center*  
M2M: *Machine to Machine*  
NBR: Norma Brasileira Regulamentadora  
NSA: *Non-Standalone*  
OFDMA: *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*  
PAIS: Programa Amazônia Integrada e Sustentável  
PPPs: Parcerias Público-Privadas  
PGW: *PDN Gateway*  
PIM: Polo Industrial de Manaus  
PS CORE: *Packet Switched Core*

QoS: *Quality of Service*

RNC: *Radio Node Controller*

RF: *Rádio Frequência*

SAEGW: *Serving and PDN Gateway*

SGW: *Serving Gateway*

SMS: *Short Mensage Service*

SGSN: *Serving GPRS Support Node*

TDD: *Time Division Duplexing*

TDMA: *Time Division Multiple Access*

UE: *User Equipment*

URLLC: *Ultra-Reliable Low Latency Communications*

UMTS: *Universal Mobile Telecommunications System*

VLR: *Visitor Location Register*

VoIP: *Voice over IP*

VoLTE: *Voice over LTE*

WCDMA: *Wideband Code Division Multiple Access*

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	16
1.1	PROBLEMÁTICA.....	17
1.2	JUSTIFICATIVA .....	18
1.3	OBJETIVOS .....	19
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	20
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	21
2.1	EVOLUÇÃO DAS GERAÇÕES DE REDES MÓVEIS.....	21
2.1.1	<b>Primeira Geração (1G) de Telefonia Móvel Celular</b> .....	22
2.1.1.1	Características Técnicas .....	22
2.1.1.2	Limitações .....	23
2.1.1.3	Evolução e Transição .....	23
2.1.2	<b>Segunda Geração (2G) de Telefonia Móvel Celular</b> .....	23
2.1.2.1	Características Técnicas .....	24
2.1.2.2	Serviços e Avanços.....	24
2.1.2.3	Impactos no Brasil.....	25
2.1.3	<b>Terceira Geração (3G) de Telefonia Móvel Celular</b> .....	25
2.1.3.1	Caraterísticas Técnicas.....	25
2.1.3.2	Avanços e Serviços.....	26
2.1.3.3	Implantação no Brasil .....	26
2.1.4	<b>Quarta Geração (4G) de Telefonia Móvel Celular</b> .....	27
2.1.4.1	Características Técnicas .....	27
2.1.4.2	Avanços e Serviços.....	28
2.1.4.3	Implantação no Brasil .....	28
2.1.4.4	Rede de Dados .....	29
2.1.5	<b>Topologias das Tecnologias 2G, 3G e 4G.</b> .....	31
2.1.5.1	Rede de Acesso .....	32

2.1.5.2	Núcleo da Rede (Core).....	33
2.1.6	<b>Quinta Geração (5G) de Telefonia Móvel Celular</b> .....	35
2.1.6.1	Características Técnicas .....	37
2.1.6.2	Casos de Uso e Aplicações .....	38
2.1.6.3	Implantação no Brasil .....	39
2.2	FUNDAMENTOS TÉCNICOS DA TECNOLOGIA 5G .....	40
2.3	ARQUITETURA E INFRAESTRUTURA DO 5G .....	40
2.4	APLICAÇÕES DO 5G EM CIDADES INTELIGENTES .....	44
2.5	DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DO 5G NO BRASIL .....	44
2.6	REGULAMENTAÇÕES E ASPECTOS LEGAIS.....	44
3.	METODOLOGIA .....	46
3.1	METODOLOGIA DA PESQUISA .....	46
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	47
3.3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.4	CRONOGRAMA DE ATIVAÇÃO DA REDE 5G EM MANAUS .....	59
3.5	COBERTURA INICIAL E EXPANSÃO DA INFRAESTRUTURA .....	60
3.6	PARCERIAS ESTRATÉGICAS E PROJETOS-PILOTO .....	62
3.7	DESAFIOS ENFRENTADOS.....	62
3.8	IMPACTOS INICIAIS OBSERVADOS .....	63
3.9	PERSPECTIVAS FUTURAS.....	63
4.	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS</b> .....	64
4.1	CONFRONTO COM O REFERENCIAL TEÓRICO.....	64
4.2	AVALIAÇÃO DA INFRAESTRUTURA LOCAL.....	64
4.3	IMPACTOS OBSERVADOS NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS .....	65
4.4	INCLUSÃO DIGITAL E ACESSIBILIDADE .....	65
4.5	VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA .....	65
4.6	ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA 5G EM MANAUS-AM .....	66

4.6.1	Situação atual da implantação da tecnologia 5G em Manaus-AM.....	66
4.6.2	<b>Análise Técnica Detalhada</b> .....	67
4.6.3	Análise da Cobertura da Tecnologia 5G em Manaus - AM .....	67
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>70</b>
5.1	SÍNTESE DOS RESULTADOS .....	70
5.2	CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO.....	71
5.3	LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	71
5.4	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	71
	REFERÊNCIAS .....	73

## 1. INTRODUÇÃO

A rede de telefonia móvel 5G é considerada uma revolução tecnológica que promete transformar a forma como interagimos com o mundo digital. Com velocidades de conexão até 100 vezes mais rápidas do que as oferecidas pelas redes 4G, o 5G não se limita apenas a melhorar a experiência do usuário em termos de navegação, mas abre novas possibilidades em áreas como Internet das Coisas (IoT), inteligência artificial e cidades inteligentes. Como afirma o especialista em telecomunicações, *"O 5G não é apenas uma evolução da tecnologia móvel, mas uma revolução que permite a criação de um mundo mais conectado e eficiente"* (Smith, 2020).

Além das vantagens em termos de velocidade e latência, a rede 5G oferece uma capacidade maior de conectar dispositivos simultaneamente, o que a torna essencial para o desenvolvimento de infraestruturas modernas e a implementação de soluções inovadoras em áreas como saúde, educação e segurança pública. Segundo estudos realizados pela Comissão Europeia, *"A implementação do 5G pode gerar um impacto significativo no desenvolvimento econômico, estimando-se que a sua adoção traga uma contribuição de mais de 1,1 trilhão de euros à economia global até 2035"* (European Commission, 2020).

No entanto, a implantação da rede 5G também enfrenta desafios significativos, especialmente em regiões como a Amazônia, onde questões geográficas, ambientais e sociais tornam a implementação mais complexa. Como observa o professor de engenharia de telecomunicações, *"Embora o 5G ofereça grandes avanços tecnológicos, sua implantação em áreas remotas exige uma adaptação das infraestruturas locais, além da superação de barreiras naturais e logísticas"* (Oliveira, 2022).

Este estudo visa explorar os desafios e as oportunidades da implementação da tecnologia 5G na cidade de Manaus-AM, considerando tanto as vantagens que essa tecnologia pode trazer para a região quanto os obstáculos que precisam ser superados para que sua adoção seja bem-sucedida e inclusiva.

## 1.1 PROBLEMÁTICA

De acordo com Lakatos e Marconi (2003), a formulação do problema de pesquisa constitui uma etapa essencial na estruturação de um trabalho científico, pois direciona os objetivos, delimita o escopo da investigação e orienta a coleta e análise dos dados.

A definição clara e precisa do problema é o ponto de partida para qualquer investigação metodologicamente fundamentada.

Neste contexto, o avanço das tecnologias de telecomunicações e, mais especificamente, a chegada do 5G representam uma transformação significativa no cenário das comunicações móveis.

A tecnologia 5G apresenta-se como um facilitador para aplicações emergentes como Internet das Coisas (IoT), cidades inteligentes, realidade aumentada e veículos autônomos, além de promover maior eficiência e conectividade em setores estratégicos como saúde, educação e indústria (ITU, 2021; 3GPP, 2020).

No entanto, apesar do seu grande potencial, a implementação do 5G no Brasil, e especialmente em regiões de infraestrutura desafiadora como a Amazônia, traz à tona questões complexas que precisam ser analisadas com base em evidências empíricas.

A cidade de Manaus-AM, capital do estado do Amazonas, é um exemplo relevante por apresentar uma geografia peculiar, dificuldades logísticas de transporte e conectividade, desigualdades sociais significativas e um modelo industrial de grande importância econômica — o Polo Industrial de Manaus (PIM) —, o que torna o cenário ainda mais complexo (SOUZA, 2022; GOMES et al., 2023).

Desse modo, emerge a seguinte questão norteadora deste trabalho:

Quais os principais desafios, limitações e impactos da implantação da rede de telefonia móvel 5G na cidade de Manaus-AM, considerando as condições técnico-infraestruturais, o contexto socioeconômico local e os possíveis desdobramentos no setor produtivo da região?

A complexidade desta questão exige um enfoque multidisciplinar, que envolva aspectos técnicos — como disponibilidade de espectro, densidade de antenas, cobertura de fibra ótica, padrões da 3GPP (2020) e diretrizes da ITU (2021) —, bem como fatores sociais e políticos, como políticas públicas de inclusão digital, desigualdade de acesso e regionalismos logísticos.

A abordagem metodológica proposta neste trabalho, conforme Gil (2017), fundamenta-se no método do estudo de caso, que permite a análise profunda de uma situação específica com vistas à generalização analítica.

O estudo de caso de Manaus será conduzido a partir de levantamento documental e bibliográfico, análise de dados públicos (como relatórios da ANATEL, IBGE, ITU, GSMA e operadoras), com foco na relação entre o avanço tecnológico e a realidade regional.

Segundo Severino (2016), o problema de pesquisa deve ser delimitado de maneira que seja possível respondê-lo por meio de dados verificáveis e análise racional, respeitando os critérios de objetividade e coerência científica. Portanto, a investigação buscará compreender não apenas a presença da infraestrutura 5G na cidade, mas também sua eficiência, seu alcance social e seu impacto no desenvolvimento local.

Além disso, como destaca Yin (2016), ao utilizar o estudo de caso como estratégia metodológica, é necessário considerar as variáveis contextuais que influenciam os resultados. No caso de Manaus, essas variáveis incluem a extensão territorial, o modelo econômico do PIM, a concentração populacional em áreas urbanas e ribeirinhas e as limitações de conectividade.

Portanto, ao investigar os obstáculos e benefícios da adoção do 5G em Manaus, este estudo pretende oferecer subsídios para a formulação de políticas públicas e estratégias empresariais voltadas à ampliação da conectividade, à promoção da inclusão digital e ao fortalecimento da Indústria 4.0 na região Norte do Brasil.

Este problema será abordado através da análise das condições técnicas da infraestrutura de telecomunicações da cidade, da participação das operadoras no processo de implementação e dos benefícios previstos para a população local e para o setor industrial. Para isso, será realizada uma investigação detalhada, considerando os aspectos geográficos, socioeconômicos e tecnológicos de Manaus.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Este trabalho possui relevância tanto do ponto de vista acadêmico quanto prático.

Do ponto de vista acadêmico, contribui para a compreensão dos desafios da implementação do 5G em áreas com dificuldades logísticas e socioeconômicas.

Do ponto de vista prático, a análise pode servir como base para a formulação de políticas públicas mais eficazes para a inclusão digital e para o desenvolvimento do setor industrial na Região Norte do Brasil, especialmente no que se refere à adoção de novas tecnologias em prol da inovação e competitividade (RODRIGUES et al., 2024).

O Brasil tem se esforçado para implementar a tecnologia 5G de forma a garantir sua democratização e inclusão digital em todo o território nacional. No entanto, a implantação em regiões como Manaus enfrenta obstáculos específicos, como a falta de infraestrutura de fibra ótica e a necessidade de adaptação da rede elétrica e das redes de distribuição de sinal. Além disso, a inclusão de comunidades periféricas e ribeirinhas no acesso ao 5G é um dos maiores desafios para garantir a equidade na oferta de serviços (SOUZA, 2022).

O estudo da implantação do 5G em Manaus se justifica por sua relevância em compreender como os fatores socioeconômicos, a infraestrutura existente e as políticas públicas influenciam a adoção de novas tecnologias em uma cidade com características tão particulares. Além disso, o uso do 5G em áreas industriais, como o Polo Industrial de Manaus (PIM), oferece uma oportunidade de analisar a potencial contribuição dessa tecnologia para o crescimento da Indústria 4.0 e da inovação no setor produtivo (GOMES et al., 2023).

Além disso, ao focar em Manaus, uma cidade com características únicas, o estudo pode oferecer insights valiosos para outras regiões do país com desafios semelhantes, como as cidades da Região Norte e as áreas rurais, onde a implementação de tecnologias como o 5G pode ser mais complexa.

### 1.3 OBJETIVOS

#### **GERAL**

✓ Analisar o processo de implantação da rede de telefonia móvel celular na tecnologia 5G na cidade de Manaus-AM, com base em um estudo de caso, identificando os principais desafios técnicos, impactos sociais e perspectivas de expansão.

#### **ESPECÍFICOS:**

✓ Descrever o cronograma e o histórico da implementação do 5G em Manaus;

- ✓ Identificar os principais atores envolvidos (operadoras, órgãos públicos e fornecedores);
- ✓ Avaliar os principais desafios técnicos, logísticos e operacionais enfrentados durante a implementação;
- ✓ Investigar a percepção da população local quanto à qualidade do serviço e benefícios do 5G;
- ✓ Apresentar possíveis soluções e estratégias de ampliação da cobertura e desempenho da rede.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho está estruturado em seis capítulos. No primeiro, apresenta-se a introdução, com contextualização, objetivos, justificativa e metodologia. O segundo capítulo traz o referencial teórico sobre a evolução das redes móveis e os aspectos técnicos do 5G. O terceiro capítulo caracteriza a cidade de Manaus e sua infraestrutura de telecomunicações. No quarto capítulo, desenvolve-se o estudo de caso, com foco na implantação do 5G. O quinto capítulo apresenta a análise dos resultados obtidos. Por fim, o sexto capítulo reúne as considerações finais, limitações do estudo e sugestões para pesquisas futuras.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

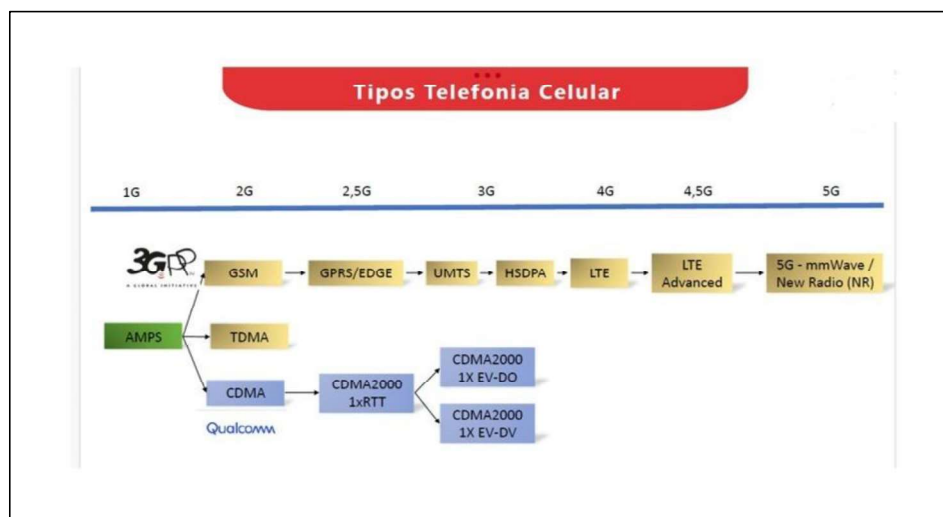
A compreensão da tecnologia 5G e seu processo de implantação requer uma análise aprofundada de sua evolução histórica, fundamentos técnicos, aplicações práticas e desafios estruturais. Esta seção apresenta o arcabouço teórico necessário para embasar o estudo de caso, abordando a evolução das gerações de redes móveis, os aspectos técnicos do 5G, sua arquitetura e aplicações, além de considerações regulatórias e socioeconômicas no contexto brasileiro.

### 2.1 EVOLUÇÃO DAS GERAÇÕES DE REDES MÓVEIS

A evolução das redes móveis se deu por meio de gerações tecnológicas que atenderam às crescentes demandas por mobilidade, velocidade e conectividade.

A Figura 1 mostra a evolução dos sistemas da telefonia móvel celular e suas respectivas tecnologias habilitadoras.

Figura 1 – Sistemas da Telefonia Móvel Celular



Fonte: 3GPP, 2023.

### 2.1.1 Primeira Geração (1G) de Telefonia Móvel Celular

A 1ª geração (1G), introduzida na década de 1980, permitia apenas comunicação de voz analógica.

A Primeira Geração de telefonia móvel celular, também conhecida como 1G, surgiu na década de 1980, sendo marcada principalmente pelo uso de tecnologia analógica e pela introdução dos primeiros sistemas celulares comerciais.

Esta geração representou um marco no desenvolvimento das telecomunicações móveis, possibilitando, pela primeira vez, a comunicação de voz sem fio em redes amplamente distribuídas.

#### 2.1.1.1 Características Técnicas

Os sistemas 1G operavam predominantemente na faixa de frequência de 800 MHz (em alguns países, 450 MHz) e utilizavam modulação analógica de frequência (FM) para a transmissão de voz. A tecnologia base era o *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), desenvolvida nos Estados Unidos e adotada por diversos países, inclusive o Brasil.

Conforme indicado por Stallings (2005), os principais aspectos técnicos dos sistemas 1G incluem:

- Transmissão analógica de voz: sem suporte para dados digitais.
- Baixa qualidade de áudio, com suscetibilidade a interferências e ruídos.
- Baixa eficiência espectral, devido à ocupação elevada de banda por canal.
- Ausência de criptografia, o que tornava as comunicações vulneráveis à interceptação.
- Alta taxa de consumo de energia, o que limitava a autonomia dos aparelhos móveis.

Segundo Ribeiro (2011), o sistema AMPS, utilizado no Brasil a partir de 1990, operava com largura de banda de 30 kHz por canal, o que limitava o número de chamadas simultâneas e exigia uma infraestrutura densa de estações rádio base para cobertura adequada.

### 2.1.1.2 Limitações

Entre as limitações da 1G, destacam-se a falta de mobilidade eficiente entre células (*handover* limitado), ausência de autenticação de usuários e falhas de segurança. Como não havia identificação robusta, era possível realizar clonagem de aparelhos, o que gerava perdas para as operadoras e riscos de segurança (*GSM Association, 2020*).

Ademais, o sistema não suportava serviços de dados, o que o restringia exclusivamente às chamadas de voz. A comunicação era unidimensional, sem qualquer tipo de interação multimídia ou troca de informações além da fala.

### 2.1.1.3 Evolução e Transição

O esgotamento da capacidade dos sistemas analógicos, aliado às suas limitações em termos de segurança e qualidade, impulsionou o desenvolvimento das tecnologias digitais que dariam origem à Segunda Geração (2G).

A transição para os sistemas digitais marcou o início de uma nova era nas telecomunicações móveis, com o suporte a mensagens de texto (SMS), criptografia de dados e melhor eficiência espectral.

## 2.1.2 Segunda Geração (2G) de Telefonia Móvel Celular

A 2G trouxe a digitalização da comunicação, possibilitando envio de SMS e maior segurança.

A Segunda Geração de telefonia móvel, ou 2G, representou uma evolução significativa em relação à tecnologia analógica da primeira geração (1G), marcando a transição para sistemas digitais de comunicação móvel.

Lançada no início da década de 1990, a 2G introduziu uma nova arquitetura de rede que passou a oferecer comunicação de voz digital, melhoria na qualidade de sinal, segurança aprimorada, além da transmissão de dados em baixa velocidade, abrindo caminho para novos serviços como mensagens de texto (SMS) e serviços multimídia simples.

### 2.1.2.1 Características Técnicas

Diferente da 1G, os sistemas 2G utilizavam modulação digital e protocolos padronizados que aumentaram a eficiência espectral e a segurança nas comunicações.

O padrão mais amplamente adotado mundialmente foi o GSM (*Global System for Mobile Communications*), desenvolvido na Europa. Outros padrões relevantes incluíram o IS-95 (CDMA) nos Estados Unidos e o D-AMPS (Digital AMPS) como uma evolução do AMPS analógico.

De acordo com Stallings (2005) e Ribeiro (2011), as principais características da 2G são:

- Transmissão digital de voz, com melhor qualidade e menor ruído.
- Modulação digital (GMSK no GSM), que permite mais usuários por faixa de espectro.
- Criptografia das comunicações, com autenticação de usuários e proteção de dados.
- Serviços de dados limitados, como SMS (*Short Message Service*) e MMS (*Multimedia Messaging Service*).
- Eficiência espectral aprimorada, com canais digitais mais compactos (200 kHz no GSM).
- Suporte à mobilidade com *handover* mais eficaz, inclusive entre áreas de cobertura distintas.

Além disso, a 2G introduziu o conceito de *roaming* internacional, permitindo que usuários de redes GSM utilizassem seus dispositivos em diferentes países, algo inédito até então.

### 2.1.2.2 Serviços e Avanços

Um dos marcos da 2G foi a introdução do serviço de SMS, que rapidamente se tornou extremamente popular. Com o tempo, foram desenvolvidas extensões como o GPRS (*General Packet Radio Service*) e o EDGE (*Enhanced Data rates for GSM Evolution*), permitindo taxas de transmissão de dados de até 384 kbps em redes evoluídas, características da chamada 2.5G e 2.75G, respectivamente (*GSM Association, 2020*).

Esses avanços possibilitaram o início da navegação na internet móvel, envio de e-mails e até a utilização de aplicativos básicos em telefones celulares, embora com limitações de velocidade e capacidade de processamento.

### 2.1.2.3 Impactos no Brasil

No Brasil, a rede 2G foi implementada oficialmente a partir de 1997 com o início da privatização das telecomunicações e a atuação das operadoras privadas, como a TIM, Claro e Vivo. O padrão GSM rapidamente se consolidou como o mais utilizado no país, substituindo os sistemas analógicos anteriores e ampliando o acesso da população à telefonia móvel (ANATEL, 2023).

Essa mudança também contribuiu para a popularização dos celulares em diversas regiões brasileiras, sendo um importante vetor de inclusão social e digital.

### 2.1.3 Terceira Geração (3G) de Telefonia Móvel Celular

A 3G permitiu acesso à internet móvel e vídeo chamadas, enquanto a 4G, lançada por volta de 2010, impulsionou a era do *streaming* e dos *smartphones* conectados em alta velocidade (GOMES; PEREIRA, 2020).

A Terceira Geração (3G) de telefonia móvel celular marca uma etapa fundamental no processo de convergência entre voz, dados e multimídia nas redes móveis. Lançada comercialmente a partir dos anos 2000, a 3G representa o início da banda larga móvel, permitindo o acesso à internet em alta velocidade, a realização de videochamadas, transmissão de vídeos, além de suportar a execução de aplicativos e serviços móveis com maior desempenho.

#### 2.1.3.1 Características Técnicas

A 3G foi padronizada pela União Internacional de Telecomunicações (UIT) no projeto IMT-2000, com diferentes tecnologias implementadas globalmente, sendo as principais: UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) baseado em W-CDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), CDMA2000 e TD-SCDMA (usado principalmente na China).

Segundo Stallings (2005) e a ITU (2019), suas principais características técnicas são:

- Acesso por divisão de código (CDMA), permitindo múltiplos usuários em uma mesma faixa de frequência.
- Operação em frequências de 850 MHz, 900 MHz, 1900 MHz e 2100 MHz, variando por país.
- Taxas de dados de até 2 Mbps em condições ideais (usuário fixo), com média de 384 kbps para dispositivos móveis.
- Apoio a mobilidade total e *handover* inter-redes, incluindo *roaming* internacional.
- Integração com redes IP, possibilitando novos serviços multimídia.
- Qualidade de serviço (QoS) configurável por aplicação.

Com a evolução da 3G, surgiram tecnologias intermediárias como o HSPA (*High Speed Packet Access*) e o HSPA+, conhecidas como 3.5G e 3.75G, capazes de atingir velocidades de até 14 Mbps no *downlink* e 5,76 Mbps no *uplink* (3GPP, 2020).

#### 2.1.3.2 Avanços e Serviços

A grande inovação da 3G foi permitir acesso contínuo à internet, com suporte a aplicações interativas, redes sociais, serviços bancários móveis, navegação GPS e *streaming* de mídia. Essa geração impulsionou a popularização dos *smartphones*, integrando múltiplos serviços em um único dispositivo móvel.

Com a 3G, os sistemas operacionais móveis como Android e iOS ganharam terreno, promovendo uma nova era na mobilidade digital. A capacidade de integrar voz e dados em uma única rede também permitiu maior eficiência e redução de custos operacionais.

#### 2.1.3.3 Implantação no Brasil

No Brasil, a 3G começou a ser implantada em 2007, com a licitação das faixas de frequência conduzida pela ANATEL. As operadoras Claro, Vivo, TIM e Oi iniciaram a expansão da cobertura em grandes centros urbanos, com posterior interiorização.

Embora tenha demorado para atingir áreas remotas e da Região Norte, inclusive no Amazonas, a 3G representou um avanço importante para a inclusão digital, sendo até hoje utilizada em regiões onde ainda não há cobertura 4G (ANATEL, 2023).

A implantação da 3G também serviu de base para a estrutura futura do 4G e do 5G, ao introduzir redes com arquitetura IP e equipamentos de rádio compatíveis com evoluções tecnológicas posteriores.

#### 2.1.4 Quarta Geração (4G) de Telefonia Móvel Celular

A Quarta Geração (4G) de telefonia móvel representa um marco significativo na evolução das redes celulares ao introduzir comunicação totalmente baseada em IP, maior largura de banda, latência reduzida e suporte a aplicações de alto desempenho, como vídeo em alta definição, chamadas VoIP, jogos online e *streaming* em tempo real. O 4G possibilitou o acesso à internet móvel em velocidades comparáveis às redes fixas de banda larga, consolidando a mobilidade digital e a conectividade ubíqua.

##### 2.1.4.1 Características Técnicas

A tecnologia 4G foi padronizada pelo consórcio *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) no Release 8, com base na arquitetura *Long Term Evolution* (LTE). Posteriormente, foi introduzida a versão avançada denominada *LTE-Advanced*, também conhecida como *True 4G*, capaz de atender aos requisitos do padrão *IMT-Advanced*, definido pela União Internacional de Telecomunicações (UIT).

De acordo com Stallings (2015) e 3GPP (2020), as principais características da 4G são:

- Transmissão de dados exclusivamente por IP (*all-IP network*), unificando voz, vídeo e dados.
- Taxas de *download* de até 100 Mbps em mobilidade e 1 Gbps em ambientes fixos, com variações práticas de acordo com a infraestrutura e ambiente.
- Latência média inferior a 50 ms, fundamental para aplicações em tempo real.
- Largura de banda escalável, entre 1,4 MHz a 20 MHz, com agregação de portadoras no *LTE-Advanced*.
- Utilização de MIMO (*Multiple Input, Multiple Output*) para aumentar a eficiência espectral e a capacidade de transmissão.

- Qualidade de Serviço (QoS) diferenciada por tipo de aplicação, como voz, vídeo e dados.
- Melhoria na eficiência energética e na alocação de recursos da rede.

#### 2.1.4.2 Avanços e Serviços

A 4G possibilitou o avanço de aplicações multimídia, como videoconferências em HD, jogos online sem *lag*, redes sociais com transmissão ao vivo, serviços bancários mais seguros, entre outros. Também viabilizou a popularização de plataformas de *streaming*, como Netflix, YouTube e Spotify em dispositivos móveis.

Outra inovação foi o suporte à tecnologia Voice over LTE (VoLTE), que permite chamadas de voz com qualidade HD utilizando a infraestrutura de dados da rede, com comutação totalmente baseada em pacotes, eliminando a necessidade de *fallback* para redes 2G ou 3G.

#### 2.1.4.3 Implantação no Brasil

A tecnologia 4G começou a ser implementada no Brasil em 2013, inicialmente nas capitais, em função da Copa do Mundo FIFA de 2014, seguindo diretrizes e editais de licitação promovidos pela ANATEL. A faixa de 2,5 GHz foi a principal utilizada no início da implantação, com posterior ampliação para outras bandas, como 700 MHz (liberada após o desligamento da TV analógica).

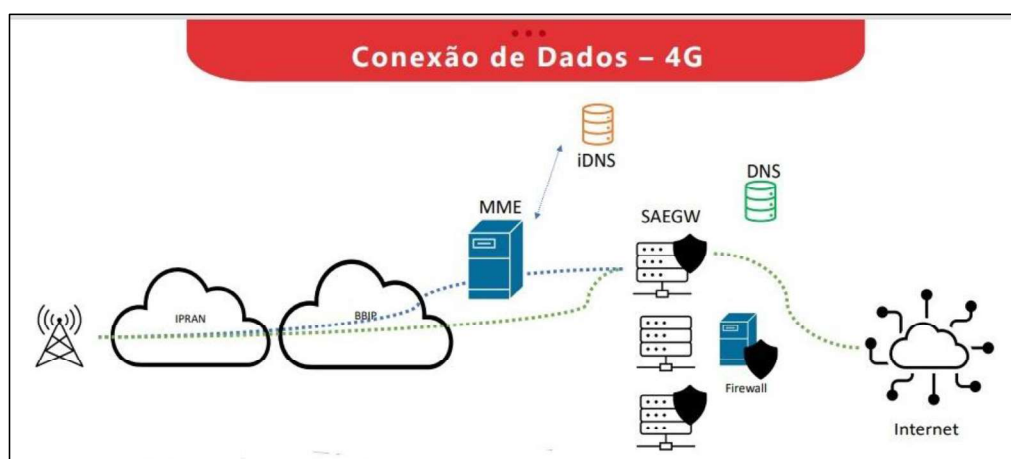
Segundo dados da ANATEL (2023), o Brasil já possui mais de 135 milhões de acessos 4G ativos, sendo essa a principal tecnologia de acesso móvel em áreas urbanas. No entanto, ainda persistem desafios relacionados à cobertura em áreas rurais e regiões remotas, como a Amazônia, onde a infraestrutura é escassa e o custo de implantação elevado.

A infraestrutura 4G também representa a base estrutural para a implementação do 5G, possibilitando integração entre ambas as tecnologias e migração progressiva de usuários e serviços.

#### 2.1.4.4 Rede de Dados

A rede de dados da tecnologia 4G é composta por diversos elementos que atuam em conjunto para proporcionar conectividade eficiente, segura e de alta velocidade aos usuários finais. A Figura 2 ilustra essa arquitetura, sendo cada componente descrito a seguir:

Figura 2 – Rede de Dados na tecnologia 4G.



Fonte: 3GPP, 2023.

##### a) Antena (*eNodeB*)

A estação rádio base denominada *eNodeB* é o ponto inicial de conexão dos dispositivos móveis com a rede da operadora. Ela realiza a transmissão e recepção dos sinais de rádio, estabelecendo a interface aérea com o terminal do usuário. Além disso, desempenha funções de controle de rádio e gerenciamento de recursos da célula (Sauter, 2014; Dahlman et al., 2011).

##### b) IPRAN (*IP Radio Access Network*)

Trata-se da rede de transporte baseada em protocolo IP, que interliga as *eNodeBs* ao núcleo da rede da operadora. O IPRAN é responsável por garantir baixa latência, alta capacidade e qualidade na transmissão do tráfego de dados proveniente dos usuários (Cicconetti et al., 2015).

c) BBIP (*Backbone IP*)

O Backbone IP representa a espinha dorsal da infraestrutura de rede da operadora. É através dele que se dá a comunicação entre os elementos centrais da rede, como MME, gateways e servidores. Seu papel é assegurar a escalabilidade e redundância do tráfego de dados entre diferentes regiões e sistemas (Sauter, 2014).

d) MME (*Mobility Management Entity*)

A Entidade de Gerenciamento de Mobilidade (MME) é responsável pelo controle da mobilidade dos usuários, autenticação, gerenciamento de sessões e controle do estabelecimento de conexões. Apesar de não atuar diretamente no encaminhamento de pacotes de dados do usuário, o MME é essencial para a coordenação das conexões com os *gateways* de dados (Dahlman et al., 2011).

e) iDNS (*Internal Domain Name System*)

O iDNS é o sistema de resolução de nomes interno da operadora. Sua função é traduzir os nomes de domínios utilizados em aplicações e serviços internos para os respectivos endereços IP, otimizando o tempo de resposta e organizando o tráfego dentro da infraestrutura da operadora (Tanenbaum e Wetherall, 2011).

f) SAEGW (*Serving and PDN Gateway*)

O *gateway* SAEGW combina duas funções: o *Serving Gateway* (SGW) e o *PDN Gateway* (PGW).

O SGW é responsável por encaminhar os dados entre a *eNodeB* e o PGW, enquanto o PGW conecta a rede 4G à rede externa (internet), aplicando políticas de qualidade de serviço (QoS), segurança e cobrança. Esse elemento é o principal ponto de ancoragem dos dados do usuário (Dahlman et al., 2011; Sauter, 2014).

g) DNS (*Domain Name System*)

O DNS público realiza a conversão de nomes de domínios da internet para endereços IP acessíveis, permitindo que os usuários se conectem a sites e serviços web. É acionado após a liberação da navegação pelos *gateways* da operadora (Tanenbaum e Wetherall, 2011).

### h) Firewall

O *firewall* atua como uma barreira de segurança que inspeciona, filtra e protege o tráfego de dados da rede da operadora. Ele previne acessos não autorizados e ataques cibernéticos, assegurando a integridade e confidencialidade da rede e dos dados dos usuários (Stallings, 2014).

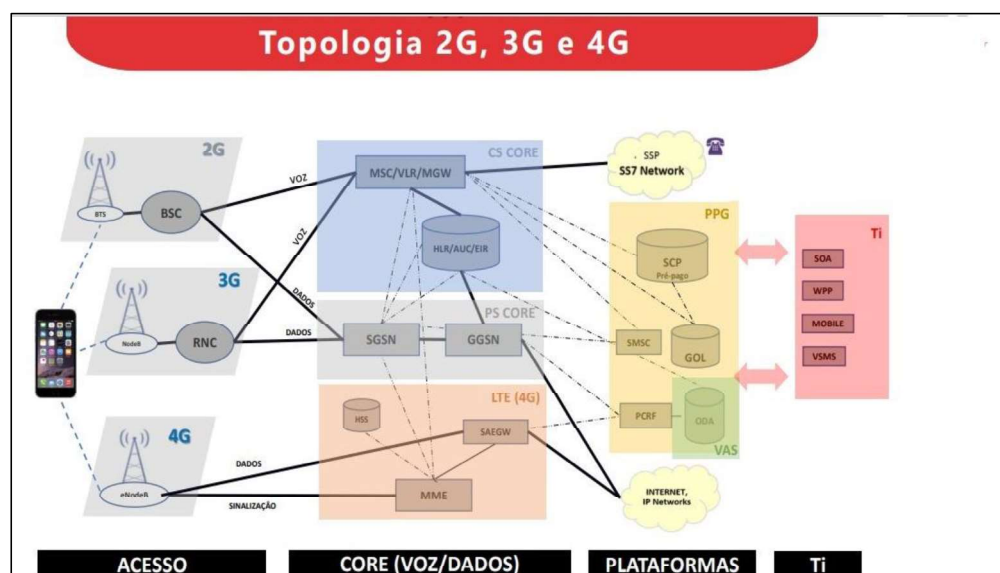
### i) Internet

A internet é a rede pública mundial com a qual os usuários finais desejam se comunicar. Após passar por todos os mecanismos e filtros da operadora, o tráfego é finalmente encaminhado à internet, permitindo o acesso a conteúdos, serviços e aplicações hospedados globalmente (Tanenbaum e Wetherall, 2011).

## 2.1.5 Topologias das Tecnologias 2G, 3G e 4G.

A Figura 3 apresenta a topologia das tecnologias 2G, 3G e 4G. Cada componente da Rede de Acesso e Núcleo da Rede (Core) será descrito a seguir.

Figura 3 – Topologias 2G, 3G e 4G



Fonte: 3GPP, 2023.

### 2.1.5.1 Rede de Acesso

Na arquitetura da tecnologia 2G, especificamente no padrão GSM (*Global System for Mobile Communications*), a rede de acesso é composta, principalmente, pelos elementos BTS (*Base Transceiver Station*) e BSC (*Base Station Controller*).

A BTS é o elemento responsável pela interface direta com o terminal móvel, realizando a transmissão e recepção dos sinais de rádio frequência entre a estação e os dispositivos dos usuários (SOUZA, 2017).

Cada BTS cobre uma área geográfica específica denominada célula, utilizando técnicas de múltiplo acesso por divisão de tempo (TDMA) e frequência (FDMA) (KUROSE; ROSS, 2017).

Os principais componentes físicos de uma BTS incluem transceptores, antenas, amplificadores e filtros, além dos sistemas de controle que gerenciam os canais de comunicação com os usuários.

Já o BSC é responsável pelo gerenciamento de múltiplas BTSs conectadas a ele. Suas funções incluem a alocação de recursos de rádio, controle de *handover* (transferência de chamada entre células), gerenciamento de potência de transmissão, além de coordenar os canais de tráfego e sinalização (FURHT; AHMAD, 2014).

O BSC representa o primeiro ponto de controle centralizado dentro da rede de acesso, sendo essencial para garantir a continuidade e qualidade das chamadas móveis.

Com a evolução para a tecnologia 3G, baseada no padrão UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*), houve uma ampliação das capacidades da rede de acesso, principalmente no que se refere à transmissão de dados (MUKHERJEE, 2007). Nessa arquitetura, os elementos equivalentes à BTS e ao BSC são, respectivamente, o Node B e o RNC (*Radio Network Controller*).

O Node B funciona como a estação rádio base do sistema 3G, fazendo a interface entre a rede e os terminais móveis por meio da tecnologia WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*). Ele realiza as funções de modulação, demodulação, amplificação e transmissão dos sinais, além de codificação de canal e multiplexação (SANTOS, 2020).

A principal melhoria em relação à BTS da 2G está na capacidade de suportar maiores taxas de dados e múltiplos usuários simultâneos, utilizando códigos específicos para separação dos canais (SOUZA, 2017).

O RNC é o controlador da camada de rádio da rede UMTS. Ele gerencia os recursos de rádio utilizados pelos Node Bs, sendo responsável por funções como o controle de *handover*, gerenciamento de mobilidade, alocação de largura de banda e qualidade de serviço (QoS). Além disso, o RNC realiza tarefas de compressão de cabeçalho de pacotes e controle de erros, atuando como elo entre a rede de acesso e o núcleo da rede (*core network*) (MUKHERJEE, 2007).

Na arquitetura da rede 4G, baseada no padrão LTE (*Long Term Evolution*), há uma simplificação significativa da rede de acesso, com a integração das funções anteriormente distribuídas entre Node B e RNC. Esse novo elemento integrado é denominado eNodeB (*Evolved Node B*) (FURHT; AHMAD, 2014).

O eNodeB é responsável por toda a comunicação com os terminais móveis, operando com tecnologias avançadas como OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e MIMO (*Multiple Input Multiple Output*). Dentre suas principais funções estão a transmissão e recepção dos sinais de rádio, controle de mobilidade, modulação e codificação de canal, garantia da qualidade de serviço (QoS), autenticação inicial do usuário, além do estabelecimento, manutenção e liberação das conexões IP (SANTOS, 2020).

O eNodeB também interage diretamente com o núcleo da rede (*EPC - Evolved Packet Core*), eliminando a necessidade de um controlador intermediário como o RNC nas gerações anteriores.

Essa centralização das funções no eNodeB possibilita uma arquitetura mais plana e eficiente, resultando em menor latência, maior velocidade de transmissão de dados e melhor desempenho geral da rede (KUROSE; ROSS, 2017).

#### 2.1.5.2 Núcleo da Rede (Core)

A rede núcleo (Core Network) é responsável por gerenciar a mobilidade, a autenticação dos usuários e o encaminhamento do tráfego de voz e dados nas redes móveis.

Ao longo da evolução das gerações 2G, 3G e 4G, essa arquitetura passou por transformações estruturais e funcionais com a substituição progressiva da comutação de circuitos pela comutação de pacotes (FURHT; AHMAD, 2014).

#### a) CS Core

A CS Core (*Circuit Switched Core*) representa a parte da rede responsável por chamadas de voz e SMS nas tecnologias 2G e 3G.

O MSC (*Mobile Switching Center*) é o principal componente da comutação por circuitos, responsável por gerenciar o roteamento das chamadas de voz, estabelecer conexões entre usuários móveis e entre a rede móvel e a rede pública comutada (PSTN). Também realiza controle de mobilidade, como registro de localização e *handover* (SOUZA, 2017).

O VLR (*Visitor Location Register*) é uma base de dados temporária que armazena informações de assinantes visitantes dentro da área de cobertura de um MSC específico. Ele trabalha em conjunto com o HLR para permitir que usuários utilizem a rede ao se moverem entre diferentes áreas (MUKHERJEE, 2007).

O MGW (*Media Gateway*) atua como *gateway* entre a rede de comutação de circuitos e a rede de transporte IP. Ele realiza a comutação da mídia (voz) propriamente dita, enquanto o MSC cuida do controle de sinalização.

O HLR (*Home Location Register*) é uma base de dados centralizada que contém todas as informações permanentes dos assinantes da operadora, como número IMSI, plano de serviço, permissões e dados de *roaming*.

O AUC (*Authentication Center*) é responsável pela autenticação dos usuários e pela geração das chaves criptográficas usadas na segurança das comunicações.

O EIR (*Equipment Identity Register*) mantém uma lista de identificadores internacionais de equipamentos móveis (IMEI), classificando os dispositivos como válidos (lista branca), roubados (lista negra) ou em observação (lista cinza) (FURHT; AHMAD, 2014).

#### b) PS Core

Na transição para a 3G, a rede núcleo passou a incorporar um domínio de comutação por pacotes (*Packet Switched Core*) destinado à transmissão de dados, como acesso à internet e serviços multimídia.

O SGSN (*Serving GPRS Support Node*) gerencia sessões de dados móveis dos usuários. Suas principais funções incluem autenticação, controle de mobilidade, roteamento de pacotes e registro de localização dentro da área de serviço.

O GGSN (*Gateway GPRS Support Node*) é responsável pela conexão entre a rede móvel e redes externas como a internet. Ele atribui endereços IP aos terminais móveis e realiza funções de segurança, filtragem e encapsulamento de pacotes IP (SANTOS, 2020).

Essa estrutura do PS Core possibilitou o uso simultâneo de voz e dados na rede 3G, com maior eficiência e flexibilidade no uso da banda.

c) LTE - 4G (HSS, SAE-GW e MME)

Na arquitetura LTE (4G), o núcleo da rede foi totalmente redesenhado e passou a ser chamado de *Evolved Packet Core* (EPC).

Diferente das gerações anteriores, a LTE abandonou a comutação por circuitos, adotando comunicação totalmente baseada em pacotes (*All-IP*) (MUKHERJEE, 2007).

O HSS (*Home Subscriber Server*) substitui o HLR na LTE. Ele armazena informações completas dos assinantes, incluindo perfis de serviço, autenticação, localização e dados de mobilidade. Também interage diretamente com o MME e outros elementos do EPC.

O MME (*Mobility Management Entity*) é o principal componente de controle da rede LTE. Suas funções incluem autenticação do usuário, estabelecimento e liberação de conexões, gerenciamento da mobilidade e rastreamento dos dispositivos móveis. Ele não lida com o tráfego de dados propriamente dito, apenas com sinalização (FURHT; AHMAD, 2014).

O SAE-GW (*System Architecture Evolution Gateway*) é composto por duas entidades lógicas:

- SGW (*Serving Gateway*): Roteia e encaminha dados entre o eNodeB e o PGW, além de manter a conectividade durante a mobilidade do usuário entre eNodeBs.
- PGW (*PDN Gateway*): Realiza a interface com redes externas, como a internet. Responsável por atribuir endereços IP, realizar filtragem de tráfego, políticas de QoS e cobrança.

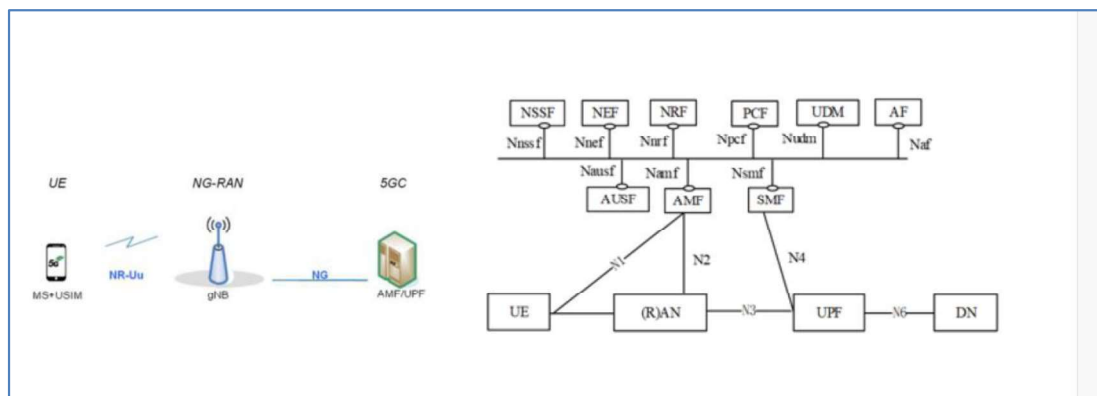
Essa arquitetura plana, com foco em pacotes, permite maior velocidade de conexão, menor latência e integração com serviços avançados, como voz sobre IP (VoLTE) (KUROSE; ROSS, 2017).

### 2.1.6 Quinta Geração (5G) de Telefonia Móvel Celular

A quinta geração de telefonia móvel celular (5G) representa a mais recente evolução das redes móveis, superando os paradigmas das gerações anteriores ao oferecer latência ultra-baixa, altíssimas taxas de transmissão, conectividade massiva de dispositivos e alta confiabilidade.

A Figura 4 apresenta a arquitetura da tecnologia 5G *Stand Alone*.

Figura 4 – Arquitetura da tecnologia 5G *Stand Alone*

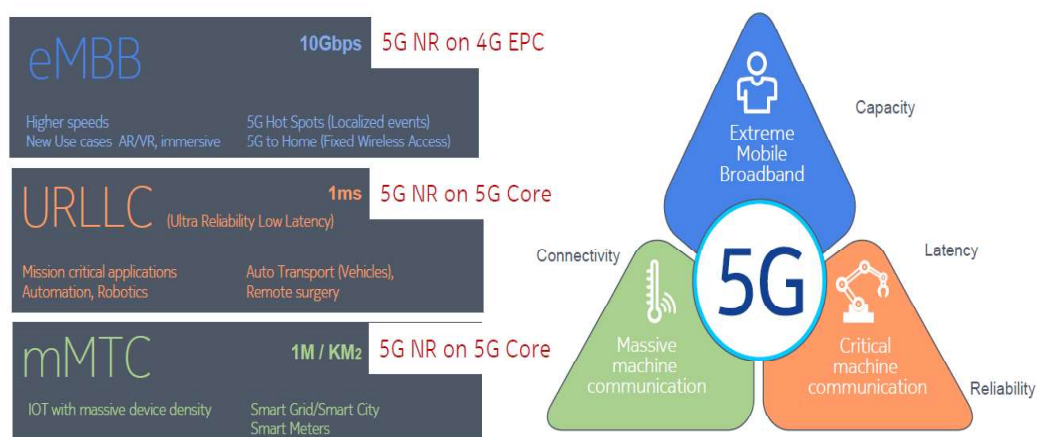


Fonte: 3GPP, 2023.

Diferente das gerações anteriores, o 5G foi projetado não apenas para melhorar a comunicação entre pessoas, mas sobretudo para integrar dispositivos inteligentes, máquinas industriais, veículos autônomos, sistemas de saúde remotos, entre outras aplicações avançadas da chamada Internet das Coisas (IoT) e Indústria 4.0.

A tecnologia 5G representa um avanço significativo em relação às gerações anteriores de redes móveis, destacando-se por três pilares fundamentais: conectividade massiva de dispositivos, alta capacidade de transmissão de dados e baixa latência com alta confiabilidade, conforme Figura 5.

Figura 5 – Pilares Técnicos da tecnologia 5G.



Fonte: Nokia, 2024.

### 2.1.6.1 Características Técnicas

O 5G foi especificado pelo consórcio 3GPP a partir do Release 15 e padronizado pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) no âmbito do IMT-2020. Essa geração utiliza três faixas principais de frequência:

- Sub-1 GHz: para cobertura ampla e penetração (ex: 700 MHz).
- Faixa média (1–6 GHz): equilíbrio entre cobertura e capacidade (ex: 3,5 GHz).
- Faixas milimétricas (mmWave – acima de 24 GHz): altíssima velocidade, porém alcance reduzido.

Segundo a ITU (2020) e o 3GPP (2022), suas principais especificações incluem:

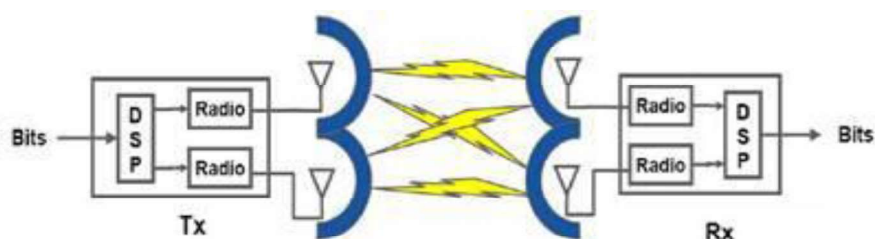
- Velocidade de *download* de até 20 Gbps (teórica); 1 Gbps em ambientes práticos.
- Latência inferior a 1 milissegundo em aplicações críticas (ex: saúde, veículos autônomos).
- Capacidade de conexão para 1 milhão de dispositivos por km<sup>2</sup>.
- Eficiência espectral até três vezes superior ao 4G.
- Confiabilidade de 99,999%, essencial para aplicações críticas.
- Topologias de rede flexíveis, incluindo redes privadas, *slicing* e *edge computing*.

Além disso, o 5G utiliza tecnologias como:

- Massive MIMO (múltiplas antenas simultâneas para ganho de desempenho).

A Figura 6 ilustra o sistema MIMO utilizando a configuração 2x2.

Figura 6 – Sistema MIMO 2x2



Fonte: 3G Américas, 2009.

- *Beamforming* (formação de feixe direcional para melhorar cobertura e qualidade).

### 2.1.6.2 Casos de Uso e Aplicações

Conforme a UIT (2021) e GSMA (2022), o 5G foi estruturado com base em três pilares principais:

1. eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) – Banda larga móvel aprimorada.

Essa funcionalidade proporciona velocidades de transmissão de dados significativamente maiores do que as disponíveis em redes 4G, possibilitando experiências aprimoradas de realidade aumentada, realidade virtual, streaming em 4K/8K e outras aplicações que demandam alta largura de banda (ITU, 2020).

2. URLLC (*Ultra-Reliable Low Latency Communications*) – Comunicação ultraconfiável e de baixa latência.

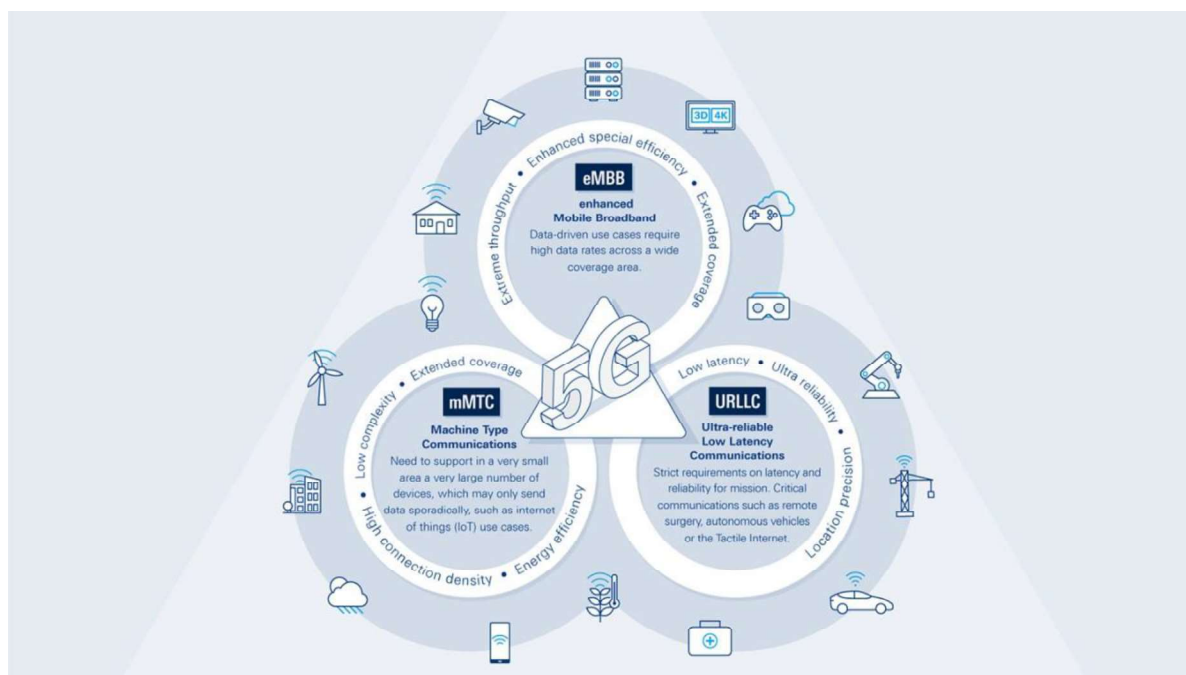
Este aspecto do 5G é crucial para aplicações críticas em tempo real, como veículos autônomos, controle remoto de máquinas industriais, cirurgias remotas e sistemas de segurança pública. A latência pode ser reduzida para até 1 milissegundo, garantindo respostas imediatas e maior segurança em operações sensíveis (GSMA, 2021).

3. mMTC (*Massive Machine Type Communications*) – Comunicação massiva entre máquinas: sensores industriais, agricultura conectada, *smart grids*.

Este pilar está relacionado à capacidade do 5G de conectar simultaneamente uma grande quantidade de dispositivos por quilômetro quadrado. Essa característica é essencial para a viabilização da Internet das Coisas (IoT), permitindo que sensores, atuadores e dispositivos inteligentes comuniquem-se de forma contínua e eficiente em ambientes urbanos e industriais (3GPP, 2020).

Esses pilares fazem do 5G um ecossistema tecnológico multifuncional, com forte impacto na economia digital e na transformação de setores como saúde, transporte, energia, indústria e entretenimento, conforme Figura 7.

Figura 7 – Pilares técnicos da tecnologia 5G.



Fonte: Rohde-Schwarz, 2025.

A implementação do 5G NR está avançando rapidamente, oferecendo novos casos de uso e uma infinidade de aplicações, além de abrir inúmeras oportunidades para novos dispositivos e equipamentos de infraestrutura

O 5G muda a forma como nos comunicamos. Ao introduzir uma mudança de paradigma em direção a uma estrutura de tecnologia centrada na aplicação e no usuário, o 5G tem como objetivo aumentar a eficiência do sistema e oferecer uma flexibilidade incrível.

### 2.1.6.3 Implantação no Brasil

No Brasil, a licitação do espectro para 5G foi realizada em novembro de 2021, pela ANATEL, envolvendo as faixas de 700 MHz, 2,3 GHz, 3,5 GHz e 26 GHz.

As principais operadoras vencedoras foram Vivo, TIM e Claro, que iniciaram a implantação da rede em capitais a partir de 2022, com expansão progressiva para as demais cidades até 2029.

De acordo com a ANATEL (2024), mais de 180 cidades brasileiras já contam com 5G SA (*standalone*), incluindo Manaus-AM, foco deste trabalho.

A implementação envolve desafios como a necessidade de fibra óptica de alta capacidade, alta densidade de antenas, e remoção de interferências na faixa de 3,5 GHz, utilizada anteriormente por sistemas de TV via satélite (banda C).

Em Manaus, a chegada do 5G é estratégica para incentivar a inovação tecnológica, estimular o setor industrial da Zona Franca, melhorar os serviços públicos, e promover inclusão digital em comunidades isoladas, através de soluções baseadas em IoT e redes privadas (BRASIL, 2023).

## 2.2 FUNDAMENTOS TÉCNICOS DA TECNOLOGIA 5G

A tecnologia 5G representa uma ruptura paradigmática, não apenas por seus ganhos em velocidade e latência, mas principalmente por sua capacidade de suportar um ecossistema massivo de dispositivos conectados simultaneamente - estimativas apontam que, até 2030, mais de 125 bilhões de dispositivos estarão conectados globalmente (ITU, 2022).

A latência na rede 5G pode ser reduzida para até 1 milissegundo, enquanto a velocidade pode ultrapassar 10 Gbps em condições ideais, representando um ganho até 100 vezes superior ao 4G (KUMAR et al., 2021).

## 2.3 ARQUITETURA E INFRAESTRUTURA DO 5G

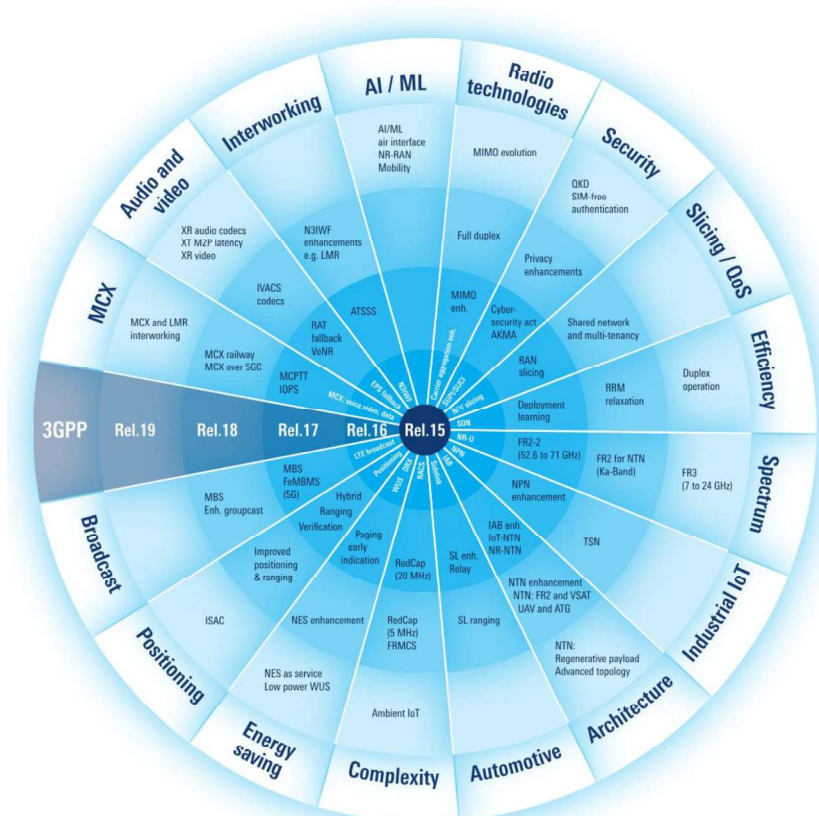
Diferentemente das gerações anteriores, o 5G utiliza uma arquitetura baseada em *network slicing* (fatiamento da rede), que permite a personalização da rede para diferentes serviços e clientes, otimizando recursos e garantindo qualidade de serviço (QoS) (FERREIRA et al., 2021).

Outro diferencial é a adoção de faixas de frequência mais altas, como as ondas milimétricas (mmWave), que operam em frequências superiores a 24 GHz, possibilitando altas velocidades, porém com menor alcance e maior sensibilidade a obstáculos físicos (ITU,

2022). Para compensar essa limitação, utiliza-se o conceito de *small cells*, que são antenas de pequeno porte instaladas em áreas urbanas densas para ampliar a cobertura e reduzir a latência.

A Figura ilustra as principais *releases* habilitadoras da tecnologia 5G.

Figura 8 – Principais releases habilitadoras 5G.



Fonte: Rohde-schwarz, 2024.

a) A versão 15 do 3GPP estabeleceu a base para o 5G NR como tecnologia de acesso por rádio com numerologia nova e flexível, codificação de canal avançada e esquemas de modulação.

Com o 5G Core (5GC), o 3GPP introduziu um modelo de arquitetura baseado em serviços das funções relevantes da rede central. Tanto o 5G NR quanto o 5GC, como tecnologias centrais, impulsionam a evolução dos próximos lançamentos. Essa versão abordou principalmente casos de uso da eMBB, permitindo larguras de banda de canal mais amplas e esquemas de agregação de portadora estendidos, além de estender as frequências para a

faixa de ondas milimétricas para aumentar a disponibilidade de recursos de radiocomunicação.

O congelamento funcional da versão 15 foi concluído em junho de 2019.

- b) A versão 16 do 5G foi desenvolvida com base nos recursos introduzidos na versão 15, como a banda larga móvel, para aprimorar a tecnologia e otimizar o conjunto de recursos. No entanto, a versão 16 foi influenciada principalmente por dois mercados verticais: automotivo e indústria 4.0, que geralmente exigem baixa latência, assim como comunicações confiáveis e seguras. Como resultado, foram introduzidos novos recursos como V2X *sidelink*, posicionamento 5G, 5G não licenciado (NR-U), DSS, fatiamento de rede e suporte a redes 5G privadas.

O congelamento funcional da versão 16 foi concluído em junho de 2020.

- c) O congelamento funcional da versão 17 do 5G foi concluído em junho de 2022, consolidando, aprimorando e melhorando os recursos introduzidos nas versões 15 e 16 - além de adicionar novos recursos, como o acesso a satélites por meio de redes não terrestres, desempenho aprimorado da bateria, extensão da FR2 e introdução do *RedCap*. Com a versão 17, a rede terrestre tradicional foi complementada pela primeira vez por uma rede baseada em satélite, indo além das limitações das redes 2D para incluir redes não terrestres (NTN). Essa expansão em direção a uma rede 3D unificada prepara o terreno para futuros avanços em direção à tecnologia 6G.

O *RedCap* na versão 17 levou a uma redução da complexidade, abrindo caminho para novas categorias de dispositivos e serviços, preenchendo a lacuna entre eMBB e mMTC, apresentando até mesmo ambiente IoT na versão 19. Além disso, o 5G expandiu seus serviços para cobrir espectros de frequência novos e adicionais, incluindo uma extensão da FR2 até 71 GHz.

- d) A versão 18 é a primeira versão do 5G-*Advanced*, representando uma evolução significativa na tecnologia 5G. Esta versão apresenta aprimoramentos de aspectos da tecnologia antiga e otimiza as tecnologias existentes. Mas, ela também apresenta aspectos mais revolucionários com tecnologias inovadoras no contexto da inteligência artificial e da realidade estendida (XR), preparando o terreno para o 6G. Ele inclui técnicas de aprendizado de máquina em diferentes níveis de rede, aprimorando o *beamforming*/MIMO, estimativas de posição e eficiência energética da rede. Para permitir novos casos de uso, as adições notáveis incluem um aprimoramento das aplicações de *RedCap* e de realidade estendida (XR).

A realidade estendida não precisa da introdução de novas tecnologias, mas requer a otimização das tecnologias 5G existentes para garantir a melhor qualidade da experiência para esses casos de uso revolucionários. A utilização dos recursos aprimorados do RedCap e das novas categorias de equipamentos de usuário (UE) de RedCap com base na versão 18 levará à redução do consumo de energia e dos custos dos dispositivos, além de possibilitar novos casos de uso, como o 5G de missão crítica (MCX) ou o futuro sistema de comunicação em aplicações ferroviárias (FRMCS). Além disso, a introdução da FR2 para NTN é um recurso fundamental que não apenas permite a conectividade via satélite por meio do 5G, mas também oferece suporte a serviços de NTN que exigem uma alta taxa de transferência de dados e novas categorias de equipamentos de usuário para NTN, como VSATs baseados em aviões, embarcações ou veículos. O congelamento funcional da versão 18 foi concluído em junho de 2024.

- e) A versão 19, programada para ser concluída até o final de 2025, terá como foco principal a otimização do desempenho e o atendimento às necessidades críticas nas implementações comerciais do 5G. Ela dará suporte ao MIMO massivo em conjuntos de antenas maiores, melhorará o desempenho da rede e do enlace de comunicação e explorará o potencial de utilização do «FR3» (7 GHz a 24 GHz) para aplicações 5G. O uso desse espectro é muito exigente, pois ele se encontra ocupado por proprietários já estabelecidos. Para garantir uma transmissão justa nas proximidades, o 5G NR precisa introduzir novos mecanismos, como bancos de dados de geolocalização, conceitos de compartilhamento dinâmico de espectro ou restrições de potência e uma arquitetura de receptor resistente a interferências. Essa versão também investigará novas arquiteturas para dispositivos ambientes IoT - dispositivos sem bateria, usando métodos de colheita de energia — no âmbito do 5G-Advanced. Casos de uso antigos, como voz e vídeo, também terão suporte no 5G, com novos *codecs* de fala e cenários de protocolo em VoNR otimizando a qualidade da voz ao oferecer taxas de codec de fala mais altas, mas também introduzindo codecs de áudio de baixa complexidade para mensagens de áudio básicas do tipo máquina. Isso resultará em uma nova era de serviços com suporte para aplicações de XR ou AR como inovações potencialmente revolucionárias no futuro.
- f) A versão 20, programada para começar no início de 2026, visa novos casos de uso, otimizando e aprimorando o conjunto de recursos do 5G-Advanced. Mas, a versão 20 também

começará com um item de estudo sobre 6G para preparar o caminho do trabalho de padronização do 6G, previsto para a série da versão 21.

## 2.4 APLICAÇÕES DO 5G EM CIDADES INTELIGENTES

O 5G é considerado um facilitador essencial para a construção de cidades inteligentes, pois permite a integração de tecnologias como sensores urbanos, iluminação pública inteligente, monitoramento ambiental e mobilidade urbana eficiente. Segundo estudos da Ericsson (2023), o 5G tem potencial para transformar setores como saúde, segurança pública, transporte e educação, promovendo maior eficiência e qualidade de vida.

No contexto industrial, o 5G é a base da Indústria 4.0, permitindo comunicações máquina-a-máquina (M2M), manutenção preditiva e automação em tempo real (IEEE, 2021).

## 2.5 DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DO 5G NO BRASIL

A implantação do 5G no Brasil enfrenta obstáculos técnicos e regulatórios. Entre os principais desafios estão:

- A necessidade de atualização e expansão da infraestrutura de fibra óptica (*backhaul*);
- A dificuldade de instalação de antenas em áreas urbanas, devido a legislações municipais restritivas;
- Os altos custos de investimento para as operadoras;
- A escassez de mão de obra especializada (COSTA; NASCIMENTO, 2022).

Em 2021, a ANATEL realizou o leilão das frequências para o 5G, o maior da história do país, com previsão de cobertura inicial para todas as capitais até 2025 (ANATEL, 2023). A cidade de Manaus, por sua posição geográfica e peculiaridades urbanas, exige soluções personalizadas para garantir conectividade adequada e equitativa à sua população.

## 2.6 REGULAMENTAÇÕES E ASPECTOS LEGAIS

O marco regulatório brasileiro para o 5G é estabelecido pela ANATEL, conforme a Resolução nº 742/2021, que define diretrizes para uso das faixas de 3,5 GHz, 26 GHz e 700

MHz, bem como obrigações de cobertura e metas de inclusão digital. A agência também orienta sobre os padrões de interferência, compartilhamento de infraestrutura e mitigação de riscos à aviação civil, que utiliza faixas adjacentes (ANATEL, 2023).

Além disso, políticas públicas como o Programa Amazônia Integrada e Sustentável (PAIS), promovido pelo Ministério das Comunicações, visam ampliar a infraestrutura digital na região Norte, incluindo Manaus e entorno.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada para este estudo será o método de estudo de caso, com base em dados secundários de fontes como a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), operadoras de telefonia, e publicações especializadas em 5G, como os relatórios da ITU (*International Telecommunication Union*) e GSMA. Além disso, será realizada uma análise quantitativa e qualitativa da infraestrutura existente, das condições de cobertura e dos impactos socioeconômicos, com foco nas áreas mais afetadas pela transformação digital, como o PIM e as áreas periféricas de Manaus.

Este capítulo apresenta o estudo de caso da implantação da tecnologia 5G em Manaus, com base em dados secundários fornecidos por órgãos oficiais como ANATEL e MCom, além de fontes técnicas e reportagens de operadoras que atuam na região. A análise contempla o cronograma de implantação, a cobertura atual, os desafios enfrentados, os primeiros impactos observados e perspectivas futuras para a capital amazonense.

#### 3.1 METODOLOGIA DA PESQUISA

Este estudo de caso tem abordagem qualitativa e descritiva, com base na análise documental de dados secundários, conforme a metodologia proposta por Gil (2019). Foram consultados relatórios técnicos da ANATEL, publicações especializadas (Ericsson, Huawei, GSMA), matérias de portais tecnológicos e documentos disponibilizados pelas operadoras Vivo, Claro e TIM. Também foram considerados indicadores de infraestrutura de telecomunicações e inclusão digital da cidade de Manaus (IBGE, 2023; ANATEL, 2024).

Segundo Severino (2016), a análise qualitativa busca compreender os fenômenos sociais e técnicos em seus contextos reais, sendo especialmente adequada para estudos de implantação tecnológica.

A metodologia para o tema proposto deve ser estruturada para abordar de forma sistemática os aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais da implementação do 5G.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

No caso de Manaus-AM as características são:

#### a) Geográficas

Localização: Manaus é a capital do Amazonas, localizada na região Norte do Brasil.

Clima: O clima é equatorial, com altas temperaturas e umidade ao longo do ano.

Relevo: A cidade está situada às margens do rio Negro com uma topografia plana.

#### b) Demográficas

População: A população de Manaus é de aproximadamente 2,2 milhões de habitantes.

Densidade demográfica: A densidade demográfica é alta, especialmente em áreas urbanas.

#### c) Infraestrutura

Comunicações: A infraestrutura de comunicações em Manaus é desenvolvida, com presença de várias operadoras de telefonia móvel e internet.

Energia: A energia elétrica é fornecida principalmente por usinas hidrelétricas e termelétricas.

Transporte: O transporte é realizado principalmente por rodovias e avenidas.

#### d) Desafios

Congestionamento de rede: A alta densidade demográfica e o uso intensivo de dispositivos móveis podem causar congestionamento de rede.

Interferência: A presença de muitas torres de transmissão e outros obstáculos pode causar interferência no sinal de 5G.

Custo: O custo de implantação de infraestrutura de 5G em Manaus pode ser alto devido à necessidade de *upgrade* de infraestrutura existente.

#### e) Oportunidades

Melhoria da conectividade: A implantação do 5G em Manaus pode melhorar a conectividade e o acesso a serviços de saúde, educação e outros.

Desenvolvimento econômico: A implantação do 5G pode impulsionar o desenvolvimento econômico em Manaus, especialmente em setores como o comércio e a indústria.

Inovação: A implantação do 5G pode permitir a implementação de soluções inovadoras, como IoT e inteligência artificial, em áreas como a gestão de tráfego e a segurança pública.

f) **Áreas prioritárias**

**Centro da cidade:** A área central da cidade é uma prioridade para a implantação do 5G devido à alta densidade demográfica e ao uso intensivo de dispositivos móveis.

**Zonas industriais:** As zonas industriais também são uma prioridade devido à necessidade de conectividade para o desenvolvimento de atividades econômicas.

**Áreas de grande fluxo:** Áreas de grande fluxo, como aeroportos e rodoviárias, também são prioritárias para a implantação do 5G.

### 3.3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais e métodos que foram utilizados neste trabalho estão descritos a seguir:

#### 1. Tipo de Pesquisa

**Natureza da pesquisa:** Qualitativa e quantitativa.

**Abordagem:** Estudo de caso, focado na análise específica da cidade de Manaus.

**Objetivo:** Exploratório e descritivo, com foco na compreensão dos desafios e oportunidades da implantação da tecnologia 5G.

#### 3.3.1 Planejamento de Instalação com os Dados de uma Operadora

Os serviços de planejamento de instalação de uma rede de operadora de telefonia celular localizada em Manaus-AM estão discriminados a seguir:

I - 5G SA E NSA: Implantação da rede em setembro de 2022.

- a) Abertura de SSDs (RAN) para a elaboração de projetos, documentação e orçamento com o fabricante.
- b) Solicitação de licenças de órgãos regulatórios.

- c) Desenvolvimento de projetos de RF para atender a área a ser atendida e desenvolvimento de planos de frequências das áreas e/ou regiões a serem implantadas os primeiros *sites* 5G.
- d) Desenvolvimento de projeto de solução de transmissão e conexão do *backhaul*, rede RMS e *EPCore*.
- e) Captação de recurso interno para compra de equipamentos e serviços de instalações junto ao fabricante.
- f) Elaboração de projeto de sistemas de energia AC/DC com capacidade para atender à carga, bastidores, baterias, fontes de alimentação DC e, em alguns casos, sistemas de proteção e/ou monitoramento contra vandalismo.
- g) Vistoria em campo para a elaboração de relatório para a preparação de novas instalações em torres existentes ou verificação da necessidade de instalação de novas torres para atender tal cobertura.
- h) Integração física e lógica (instalação de equipamentos).
- i) Início das instalações seguindo um cronograma que prioriza a região central da cidade de Manaus-AM. A operadora planejou a instalação de 29 (vinte e nove) estações 5G em setembro de 2022, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Estações de 5G instaladas por Operadora Celular em Manaus-AM em Setembro de 2022.

ITEM	SITE	UF	CIDADE	LONGITUDE	LATITUDE
01	AMMA011	AM	MANAUS	-60,06714	-3,10179
02	AMMA015	AM	MANAUS	-60,03861	-3,12806
03	AMMA020	AM	MANAUS	-60,02165	-3,11511
04	AMMA036	AM	MANAUS	-60,01050	-3,11463
05	AMMNS01	AM	MANAUS	-60,01260	-3,10861
06	AMMNS02	AM	MANAUS	-60,00639	-3,09028
07	AMMNS03	AM	MANAUS	-60,01127	-3,09421
08	AMMNS15	AM	MANAUS	-60,00570	-3,12034
09	AMMNS16	AM	MANAUS	-60,01556	-3,12639
10	AMMNS25	AM	MANAUS	-60,02390	-3,09264
11	AMMNS36	AM	MANAUS	-60,05670	-3,10064
12	AMMNS44	AM	MANAUS	-60,04061	-3,08744
13	AMMNS45	AM	MANAUS	-60,04562	-3,09235
14	AMMNS54	AM	MANAUS	-60,02419	-3,10694
15	AMMNSE6	AM	MANAUS	-60,00661	-3,10039
16	AMMNSI2	AM	MANAUS	-60,02528	-3,10111
17	AMMNSI3	AM	MANAUS	-60,01195	-3,10424
18	AMMNSIA	AM	MANAUS	-60,04612	-3,03224

19	AMMNS55	AM	MANAUS	-60,01927	-3,1004
20	AMMNS59	AM	MANAUS	-60,01786	-3,08658
21	AMMNS65	AM	MANAUS	-60,10250	-3,06111
22	AMMNS67	AM	MANAUS	-60,01722	-3,11889
23	AMMNS70	AM	MANAUS	-60,03735	-3,11921
24	AMMNS71	AM	MANAUS	-60,04911	-3,11811
25	AMMNS72	AM	MANAUS	-60,00306	-3,10889
26	AMMNS73	AM	MANAUS	-60,03614	-3,11012
27	AMMNS83	AM	MANAUS	-60,04600	-3,10919
28	AMMNS88	AM	MANAUS	-60,05850	-3,11091
29	AMMNSD1	AM	MANAUS	-60,05711	-3,08781

Fonte: Autor, 2025.

A seguir, serão apresentados os equipamentos para instalação de uma estação gNodeB (5G SA E NSA).

A Figura 9 apresenta uma estação de telefonia móvel celular com seus sistemas de energia e transmissão.

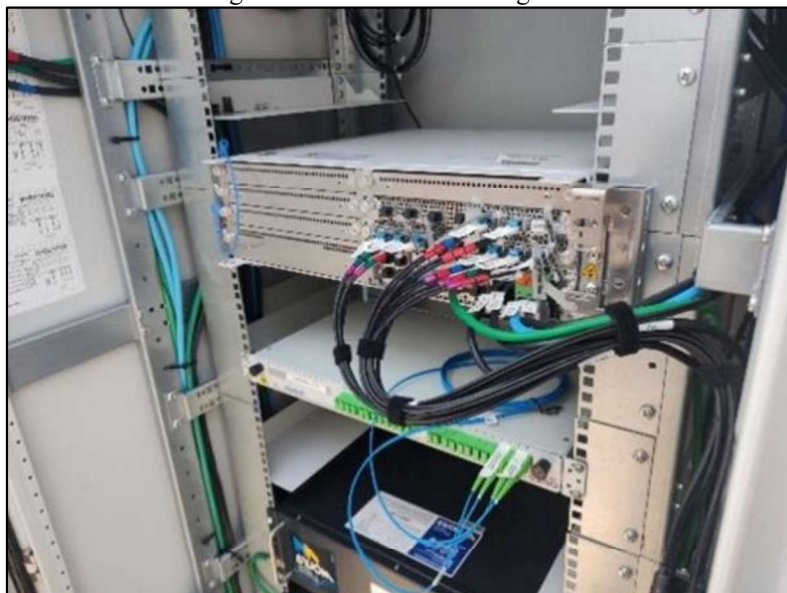
Figura 9 – Bastidor de energia de estação celular.



Fonte: Nokia, 2022.

A Figura 10 apresenta a controladora da estação celular gNodeB.

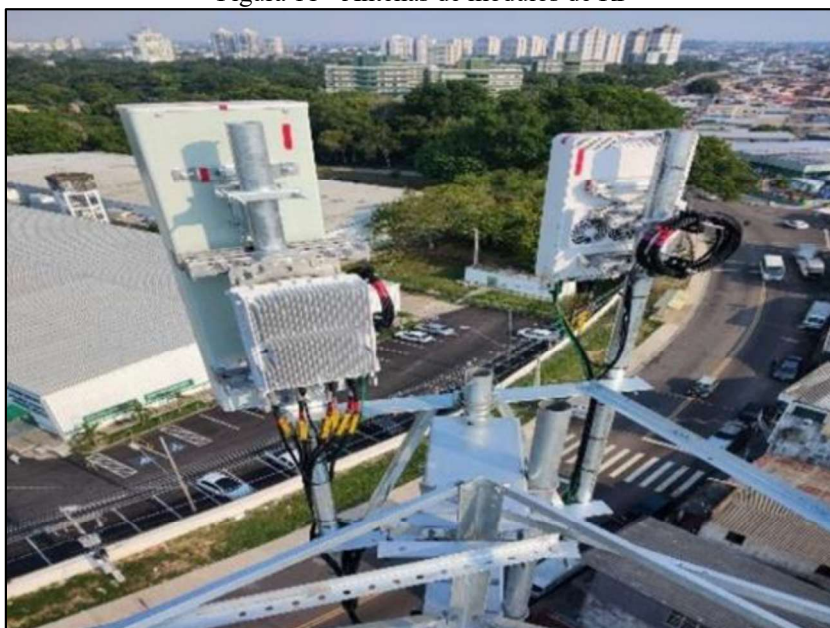
Figura 10 – Controladora da gnodeB



Fonte: Nokia, 2022.

A Figura 11 apresenta os módulos de RF (portadoras) com suas respectivas antenas no topo da torre da operadora celular.

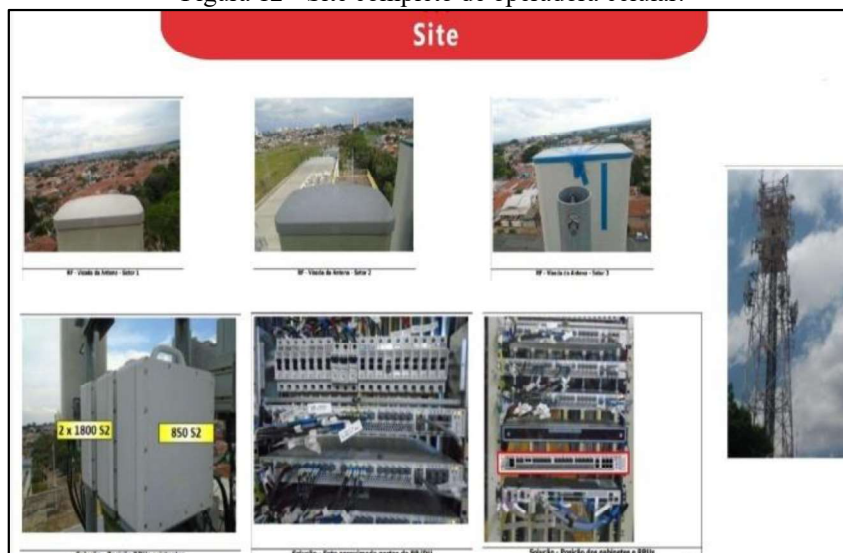
Figura 11 - Antenas de módulos de RF



Fonte: Nokia, 2022.

A Figura 12 apresenta o *site* completo da operadora celular.

Figura 12 - Site completo de operadora celular.



Fonte: Nokia, 2022.

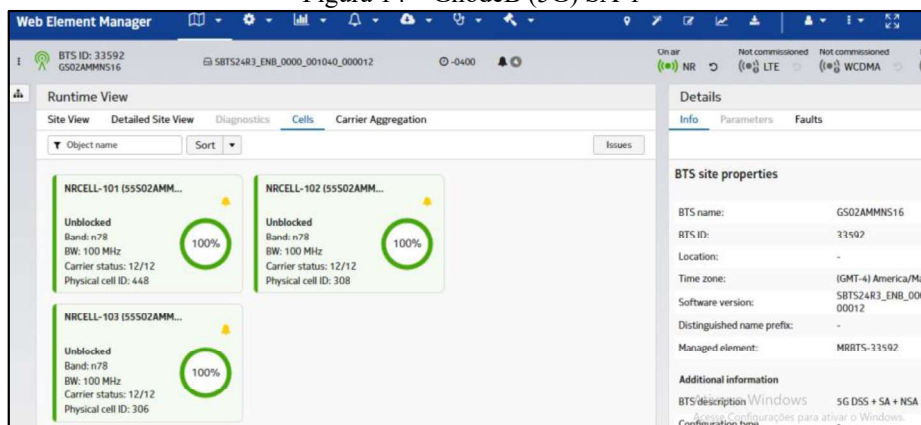
As Figuras 13 e 14 apresentam, respectivamente, três setores operando 100% com uma banda de 100 MHz para cada estação gNodeB SA. Observa-se que a configuração é somente 5G independente com banda de 100 MHz e suas devidas funcionalidades.

Figura 13 – GnodeB (5G) SA-1



Fonte: Nokia, 2025 (editado pelo autor).

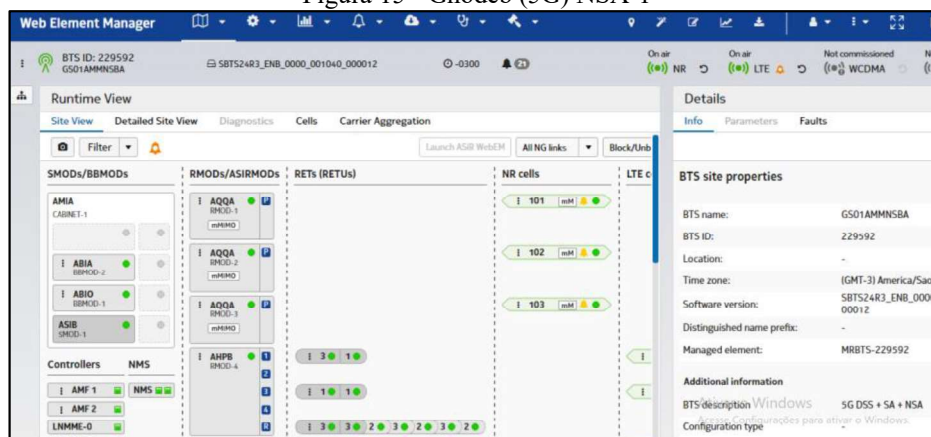
Figura 14 – GnodeB (5G) SA-1



Fonte: Nokia, 2025 (editado pelo autor).

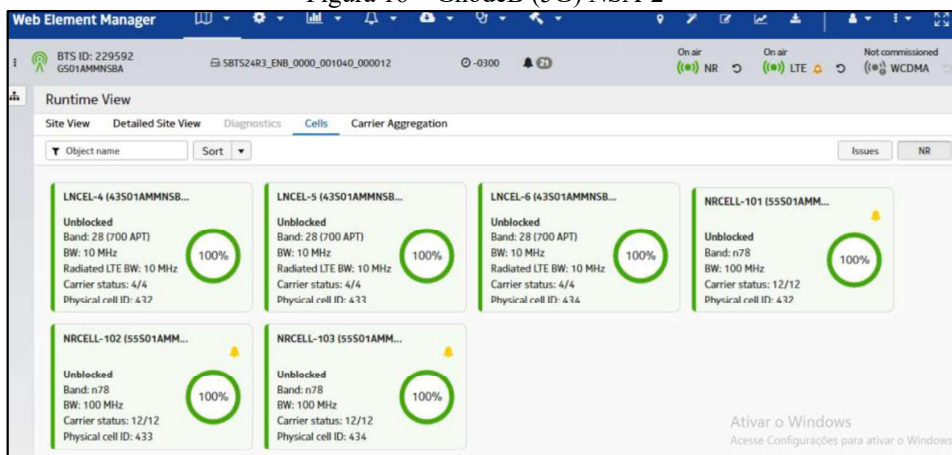
As Figuras 15,16 e 17 apresentam, respectivamente, três setores operando 100% com uma banda de 100 MHz para cada gNodeB NSA. Observa-se que a configuração é 4G e 5G operando em conjunto com banda de 100 MHz e suas devidas funcionalidades compartilhando o hardware e a infraestrutura.

Figura 15 - Gnodeb (5G) NSA-1



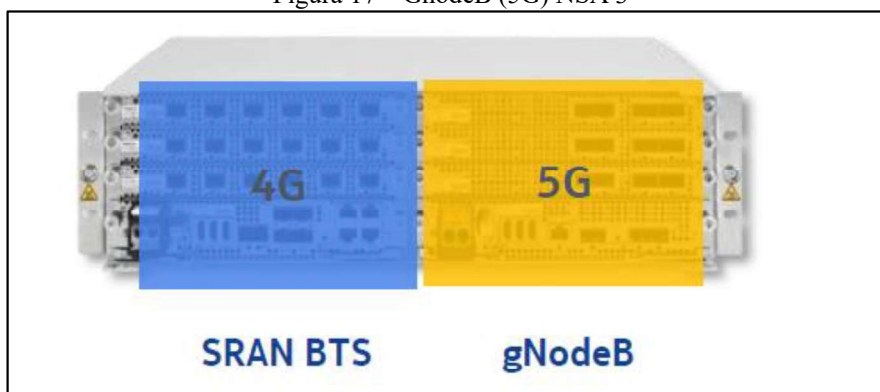
Fonte: Nokia, 2025 (editado pelo autor).

Figura 16 – GnodeB (5G) NSA-2



Fonte: Nokia, 2025 (editado pelo autor).

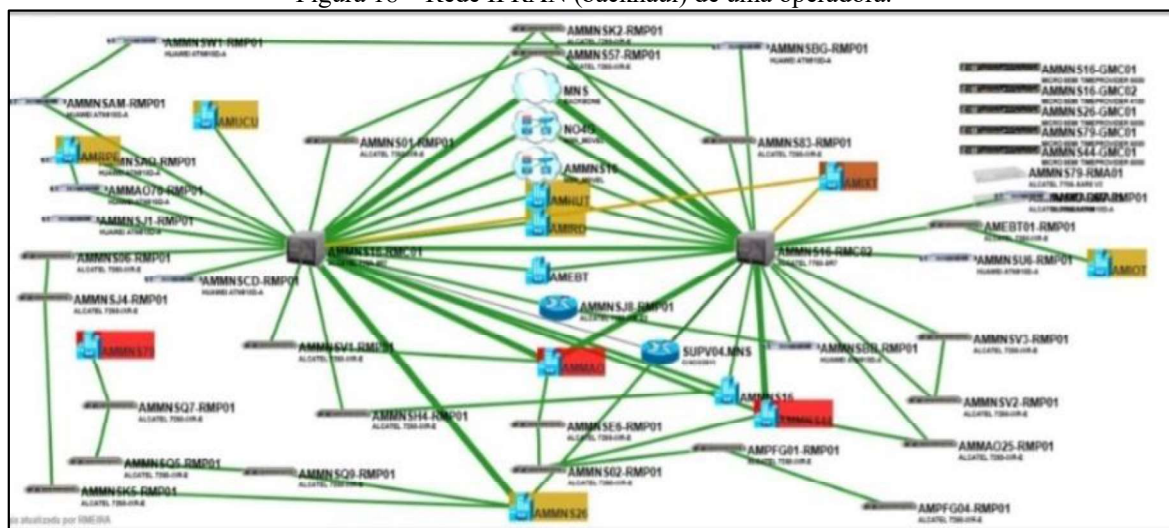
Figura 17 – GnodeB (5G) NSA 3



Fonte: Nokia, 2025 (editado pelo autor).

A Figura 18 ilustra uma pequena parte da rede de acesso IPRAN (*backhaul*) tendo topologias em anéis óticos para que as estações tenham ao menos duas conexões: uma principal e outra *backup* para se conectar ao *EPCore*.

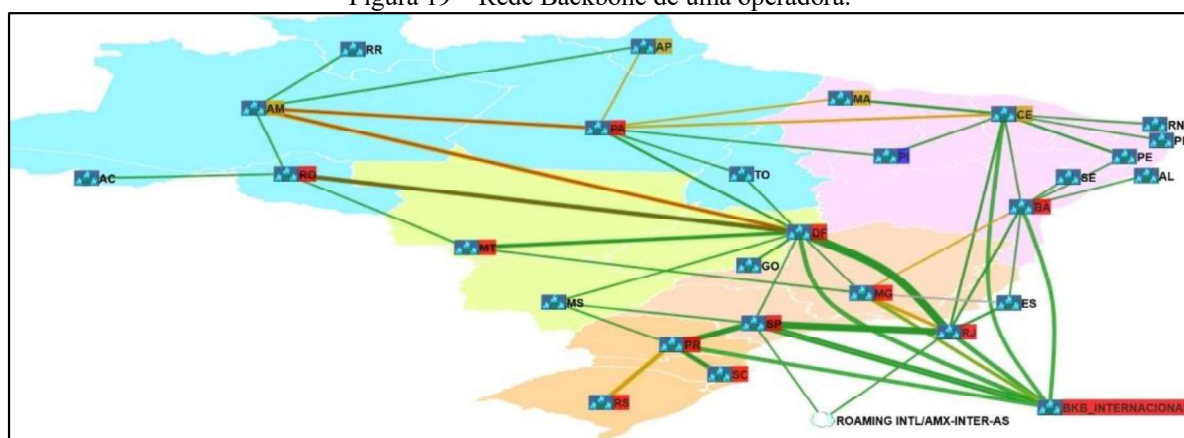
Figura 18 – Rede IPRAN (backhaul) de uma operadora.



Fonte: Portal de uma operadora (editado pelo autor).

A Figura 19 mostra a saída de conexões do *backbone* de uma operadora celular. É possível observar que o estado do Amazonas tem uma logística complexa com longas distâncias tornando as conexões mais vulneráveis com os outros grandes centros e servidores de conexão.

Figura 19 – Rede Backbone de uma operadora.

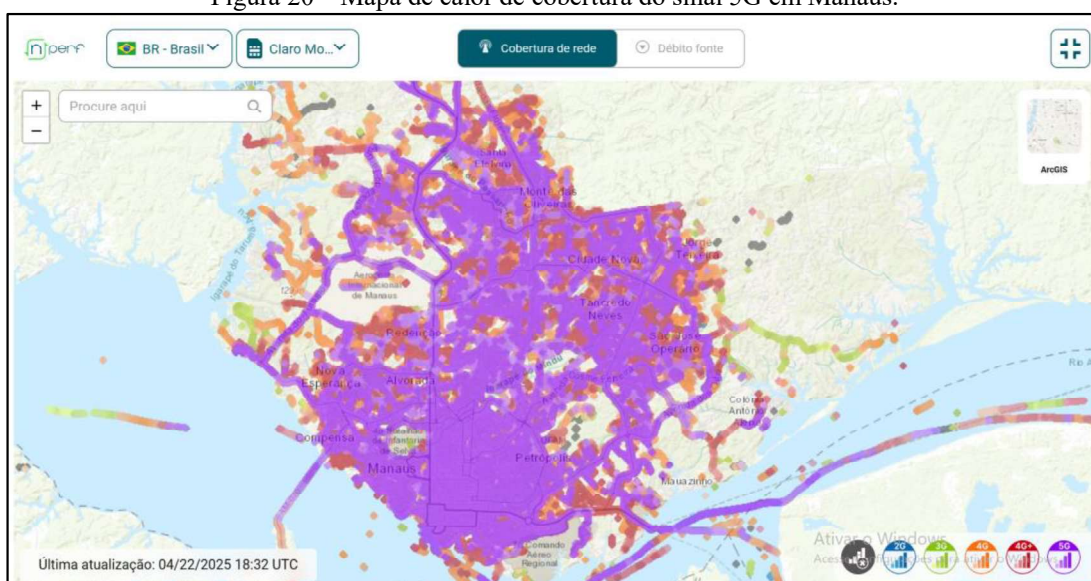


Fonte: Portal de uma operadora (editado pelo autor).

A partir do momento que as estações forem sendo integradas, a outra equipe de Engenharia da operadora realiza o *drive test*, ou seja, testes de desempenho por meio de medição de sinal em campo.

A Figura 20 reporta o mapa de calor de cobertura das tecnologias 2G, 3G, 4G e 5G na área urbana de Manaus. Percebe-se que há muitas áreas com falta de cobertura do sinal de 5G (cor lilás).

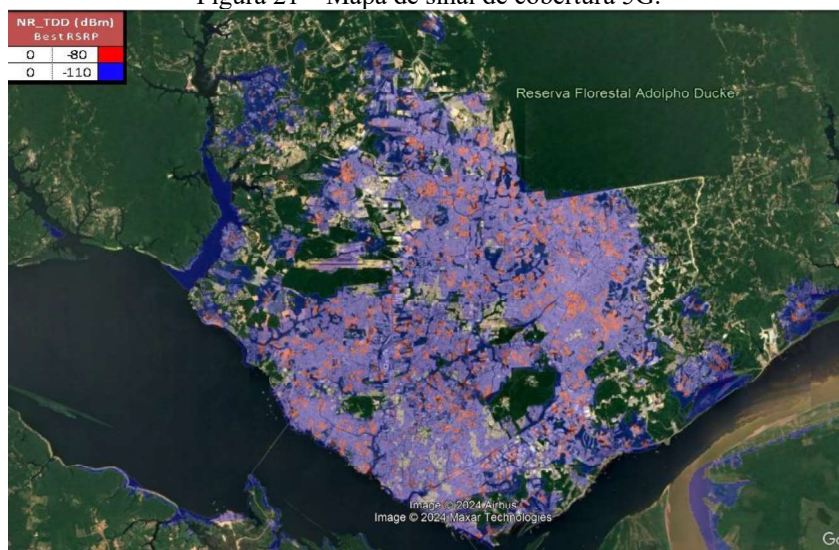
Figura 20 – Mapa de calor de cobertura do sinal 5G em Manaus.



Fonte: Nperf, 2025.

A Figura 21 apresenta o mapa de sinal de cobertura realizado pela equipe de *drive test* de uma operadora celular de Manaus em outubro de 2024. Os níveis de sinal indicam que ainda há muito o que melhorar em cobertura de sinal 5G em Manaus para que seja possível ter uma conexão confiável e estável.

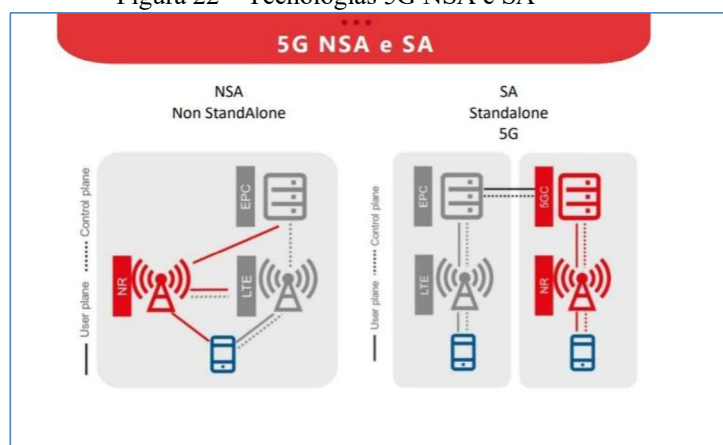
Figura 21 – Mapa de sinal de cobertura 5G.



Fonte: Portal de uma operadora (editado pelo autor).

A Figura 22 apresenta a diferença entre o 5G SA (*Standalone*) e o 5G NSA (*Non Standalone*).

Figura 22 – Tecnologias 5G NSA e SA

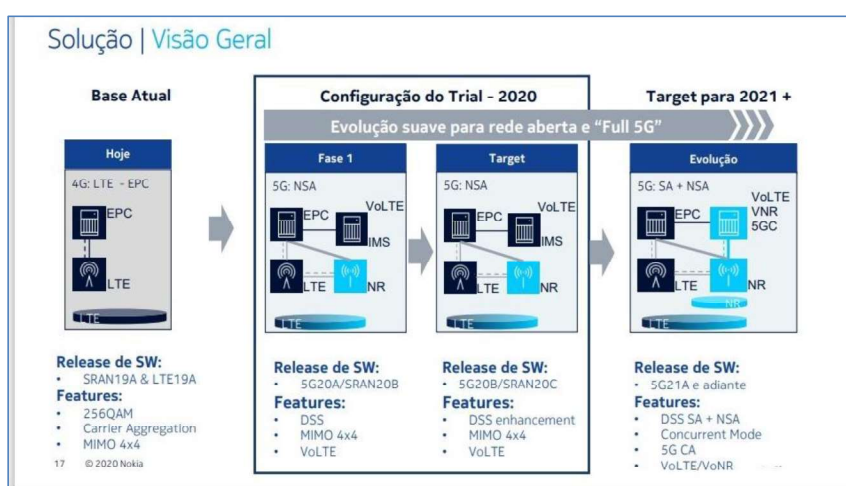


Fonte: Claro S.A, 2025.

No caso do *5G-NSA*, a rede 5G compartilha infraestrutura e o núcleo (*core*) com a rede 4G, ou seja, não há uma independência em suas aplicabilidades, além de compartilhar banda de transmissão e outras funcionalidades que podem causar perda nos serviços que a rede 5G propõe.

A Figura 23 apresenta a evolução dos *releases* e tecnologias habilitadoras da rede 4G para a rede 5G de uma forma mais detalhada que irão suportar a expansão da rede.

Figura 23 – Releases de softwares.



Fonte: Fabricante de equipamento de telecomunicações, 2021.

A Figura 24 mostra um teste de *download* e *upload* da cobertura de sinal de uma torre 5G da operadora Claro. Nota-se uma latência relativamente alta para o que foi prometido para uma rede 5G.

Figura 24 – Teste de *download* do sinal 5G.



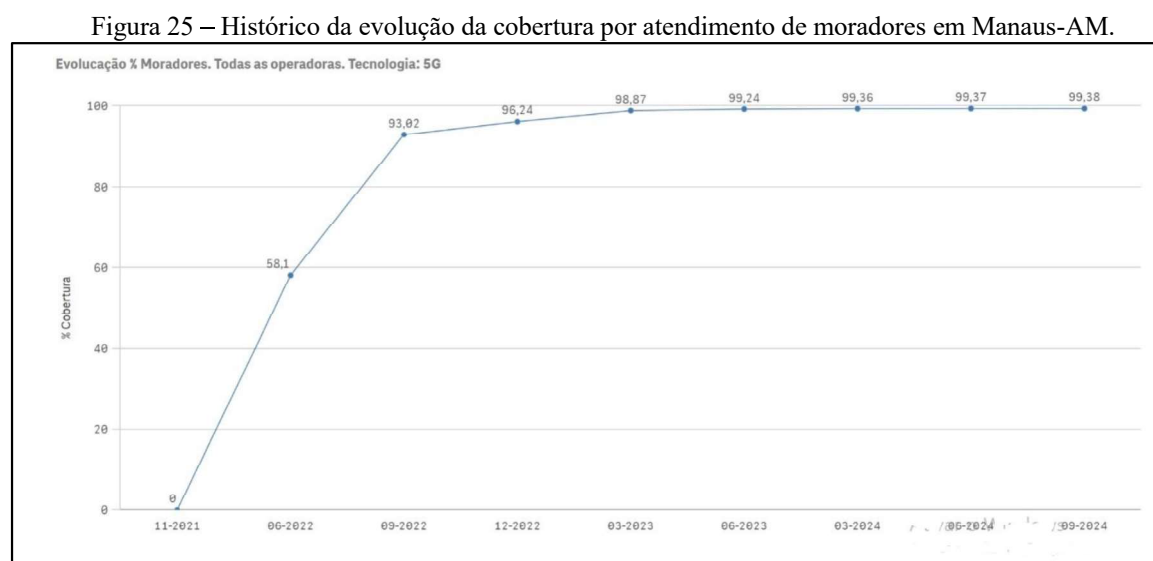
Fonte: Speedtest, 2025.

### 3.4 CRONOGRAMA DE ATIVAÇÃO DA REDE 5G EM MANAUS

De acordo com a ANATEL (2024), Manaus teve sua rede 5G ativada oficialmente em 6 de outubro de 2022, dentro do cronograma nacional de ativação nas capitais brasileiras. A liberação da faixa de 3,5 GHz foi concluída após os testes de interferência com serviços de TV via satélite (banda C) e a distribuição de kits de migração para beneficiários do CadÚnico.

O cronograma estipulava a ativação de pelo menos uma antena por operadora nas capitais até o final de 2022. Em Manaus, as três principais operadoras (Vivo, Claro e TIM) iniciaram operações nos bairros centrais, como Adrianópolis, Centro, Aleixo e Parque Dez de Novembro.

A Figura 25 mostra o histórico da evolução de cobertura por atendimento de moradores na cidade de Manaus iniciadas no final de 2022.

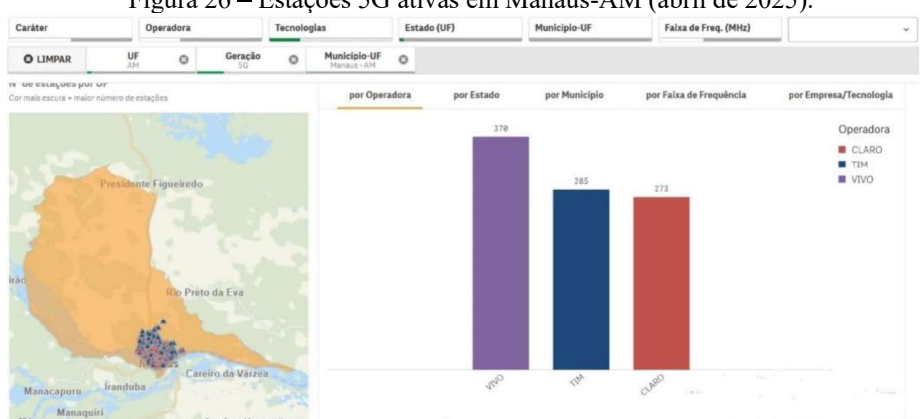


Fonte: Anatel, 2025

### 3.5 COBERTURA INICIAL E EXPANSÃO DA INFRAESTRUTURA

Conforme a plataforma do sistema mosaico da ANATEL, o município de Manaus-AM possui, em abril de 2025, um total de 928 estações 5G ativas e licenciadas pelas três operadoras: Vivo (370), TIM (285) e Claro (273), conforme Figura 26.

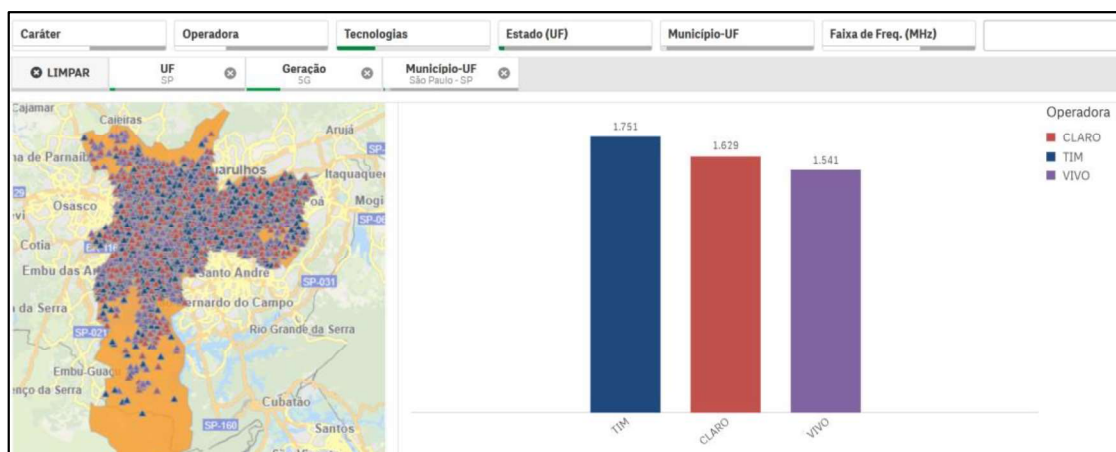
Figura 26 – Estações 5G ativas em Manaus-AM (abril de 2025).



Fonte: ANATEL, 2025.

Numa comparação entre as cidades de Manaus-AM e São Paulo-SP, identificou-se uma diferença bem grande de cobertura do sinal 5G, conforme Figura 27. A cidade de São Paulo-SP, possui em abril de 2025, um total de 4921 estações 5G ativas e licenciadas pelas três operadoras: Vivo (1541), TIM (1751) e Claro (1629).

Figura 27 – Estações 5G ativas em São Paulo-SP (abril de 2025).



Fonte: ANATEL 2025



entanto, a cobertura em áreas periféricas e comunidades ribeirinhas ainda é limitada, exigindo maior investimento público e parcerias privadas.

### 3.6 PARCERIAS ESTRATÉGICAS E PROJETOS-PILOTO

A TIM anunciou, em 2023, uma parceria com o Distrito Industrial de Manaus para testar soluções de automação em tempo real e rastreamento logístico com 5G. O projeto-piloto, em colaboração com empresas do Polo Industrial de Manaus (PIM), utiliza sensores IoT conectados por 5G para controlar etapas de produção e movimentação de insumos (TIM, 2023).

Já a Claro promoveu testes com realidade aumentada (RA) em salas de aula da Universidade Federal do Amazonas (UFAM), demonstrando o potencial do 5G na educação superior, com acesso instantâneo a conteúdos interativos em nuvem (CLARO, 2023).

Além disso, a operadora Vivo firmou parceria com o poder público municipal para estudar o uso de câmeras de segurança conectadas ao 5G em vias de alto fluxo, como a Avenida Djalma Batista, visando aumentar a capacidade de monitoramento em tempo real.

### 3.7 DESAFIOS ENFRENTADOS

A implantação do 5G em Manaus enfrenta uma série de dificuldades estruturais e legais, entre as quais se destacam:

- Infraestrutura de fibra óptica insuficiente para áreas distantes do centro urbano;
- Burocracia para instalação de novas antenas, apesar da recente modernização da legislação municipal;
- Altos custos de operação na região Norte, especialmente no transporte de equipamentos;
- Baixa penetração de smartphones compatíveis com 5G entre a população de baixa renda (GSMA, 2024).

Outro obstáculo recorrente relatado pelas operadoras refere-se às condições climáticas extremas e à vegetação densa, que afetam o desempenho das antenas *mmWave* e exigem soluções técnicas específicas, como torres elevadas e uso de repetidores ópticos.

### 3.8 IMPACTOS INICIAIS OBSERVADOS

Os primeiros relatórios de desempenho das redes 5G em Manaus apontam:

- Velocidades médias de download entre 400 Mbps e 900 Mbps (Claro e Vivo);
- Latência média de 5 a 15 milissegundos, dependendo da área de cobertura;
- Redução significativa de falhas em chamadas VoNR (voz sobre 5G) em relação ao 4G;
- Crescimento de 40% no consumo de dados móveis nas áreas cobertas, segundo a TIM (2024).

Além disso, moradores de bairros como Vieiralves, Ponta Negra e Aleixo relataram melhora na estabilidade de conexão em horários de pico, especialmente em serviços de *streaming* e videochamadas (G1 Amazonas, 2024).

### 3.9 PERSPECTIVAS FUTURAS

As previsões para o crescimento da rede 5G em Manaus incluem a expansão para áreas escolares, polos de saúde e bairros periféricos até o fim de 2025, com apoio dos programas Norte Conectado e Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações (FUST). A expectativa é que o modelo *stand alone* comece a ser implementado ainda em 2025 nas zonas industriais e acadêmicas.

O uso de 5G em monitoramento ambiental, prevenção de desastres naturais e melhoria da mobilidade urbana também é apontado como prioridade para os próximos anos, principalmente diante da importância estratégica da cidade na Amazônia Legal.

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo, procede-se à análise crítica dos dados obtidos sobre a implantação do 5G em Manaus-AM, relacionando-os ao referencial teórico e aos objetivos definidos no início do trabalho. A abordagem qualitativa visa compreender os principais desafios, avanços e impactos da nova geração da rede móvel na realidade local, considerando aspectos técnicos, sociais, econômicos e regulatórios.

### 4.1 CONFRONTO COM O REFERENCIAL TEÓRICO

A literatura técnica (3GPP, ITU, GSMA) aponta que a tecnologia 5G representa uma ruptura significativa em relação às gerações anteriores, especialmente pelas capacidades de baixa latência, alta velocidade e suporte massivo a dispositivos conectados (ITU, 2021; GSMA, 2024). No caso de Manaus, esses elementos ainda estão em fase de construção, com predominância do modelo *non-standalone (NSA)*, como indicado no estudo de caso.

Ao comparar o avanço do 5G com as diretrizes da União Internacional de Telecomunicações (ITU-R M.2083-0), observa-se que Manaus ainda não atinge os três pilares da IMT-2020 de forma plena: eMBB (banda larga móvel aprimorada) já apresenta resultados concretos; porém, URLLC (comunicação ultraconfiável e de baixa latência) e mMTC (comunicações massivas de máquina) ainda não são amplamente aplicados na cidade, o que está alinhado com o estágio nacional da tecnologia.

### 4.2 AVALIAÇÃO DA INFRAESTRUTURA LOCAL

Com base nos dados da ANATEL (2024), a cidade de Manaus possui uma cobertura inicial de 5G inferior à média das capitais brasileiras do Sul e Sudeste, fato explicado pela combinação de fatores como:

- Logística regional complexa;
- Legislação municipal desatualizada até recentemente;
- Menor densidade de infraestrutura óptica em áreas periféricas.

O número de antenas instaladas (82) revela que o processo de expansão está em curso, mas ainda distante da densidade ideal sugerida pela GSMA (2024), que recomenda entre 40 a 60 antenas por km<sup>2</sup> em áreas urbanas densas para garantir plena capacidade da tecnologia.

#### 4.3 IMPACTOS OBSERVADOS NO POLO INDUSTRIAL DE MANAUS

A análise dos projetos-piloto evidencia que o Polo Industrial de Manaus está sendo priorizado como ambiente de testes para soluções em automação industrial, logística inteligente e manutenção preditiva. Essa escolha está em consonância com o conceito de Indústria 4.0 apresentado por Ferreira e Dias (2021), que destaca a importância de redes móveis de quinta geração para transformação digital de parques fabris.

Entretanto, nota-se uma dependência de parcerias com operadoras para implementação dessas soluções, o que pode limitar a autonomia das empresas locais em desenvolver tecnologias próprias baseadas em 5G.

#### 4.4 INCLUSÃO DIGITAL E ACESSIBILIDADE

Um dos achados mais relevantes da pesquisa é a persistente desigualdade digital em Manaus. Embora os bairros centrais e industriais apresentem avanços concretos, as zonas periféricas e comunidades ribeirinhas continuam com baixo índice de acesso à internet e quase nenhuma cobertura de 5G.

Esse cenário reforça a crítica apresentada por Castells (2003) sobre a ampliação das desigualdades informacionais em cenários de modernização tecnológica desigual. A presença do 5G, nesse contexto, corre o risco de reforçar a exclusão digital, caso não sejam implementadas políticas públicas específicas para universalização do acesso.

#### 4.5 VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

Os dados da TIM (2024) e Vivo (2023) indicam que, do ponto de vista técnico, a operação do 5G em Manaus tem obtido bons resultados nas áreas com infraestrutura adequada, com latência abaixo de 15 ms e velocidades acima de 400 Mbps. Esses índices se aproximam das metas da ITU-R para aplicações de eMBB (ITU, 2021).

Por outro lado, o alto custo de implementação, agravado pelas dificuldades logísticas na Região Norte, compromete a viabilidade econômica da expansão rápida para toda a cidade, especialmente se dependente exclusivamente da iniciativa privada.

A atuação do Estado, por meio do FUST e programas como o Norte Conectado, é vista como essencial para viabilizar economicamente a universalização do 5G em Manaus e outros municípios amazônicos.

#### 4.6 ANÁLISE DA IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA 5G EM MANAUS-AM

##### 4.6.1 Situação atual da implantação da tecnologia 5G em Manaus-AM

A cidade de Manaus-AM encontra-se em processo de implantação gradual da tecnologia 5G, com avanços significativos em áreas centrais, porém com limitações evidentes em regiões periféricas. De acordo com levantamento realizado (IMPLANTAÇÃO DA TECNOLOGIA 5G, 2024), a cobertura urbana atual alcança aproximadamente 42% da área da cidade, ficando abaixo da média nacional, que gira em torno de 60%, conforme dados da Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel, 2024).

A Tabela 2 apresenta um comparativo técnico entre a situação local e os parâmetros de referência nacionais e internacionais.

Tabela 2 – Perspectiva de crescimento da cobertura 5G.

Aspecto	Situação atual em Manaus-AM	Referência comparativa
Cobertura 5G urbana	42% da área urbana (em expansão)	Média nacional: ~60% (Anatel, 2024)
Latência	5-15 ms nas áreas cobertas	Meta ITU: < 1ms para URLLC
Velocidade média de download	400-900 Mbps	eMBB: compatível
Acesso nas periferias	Muito limitado	Meta política: universalização
Antenas instaladas	928 (banda de 3,5 GHz)	Densidade recomendada: 40-60/km <sup>2</sup>
Uso industrial	Projetos-piloto em andamento	Alinhado à indústria 4.0

Fonte: Anatel, 2024.

#### 4.6.2 Análise Técnica Detalhada

A análise revela que, embora as velocidades médias de *download* estejam dentro do padrão esperado para o 5G, variando entre 400 e 900 Mbps, a latência ainda representa um gargalo, sobretudo para aplicações que exigem comunicações ultraconfiáveis e de baixa latência (URLLC). A meta da União Internacional de Telecomunicações (ITU) para essa categoria é inferior a 1 milissegundo, valor ainda não alcançado em Manaus.

A quantidade de antenas instaladas (82 unidades) também está aquém da densidade recomendada para uma cobertura efetiva em grandes centros urbanos, o que pode impactar diretamente na qualidade do sinal e na estabilidade da rede.

Outro fator crítico refere-se à distribuição desigual do sinal. As áreas periféricas de Manaus continuam com acesso extremamente limitado, o que vai de encontro às diretrizes de inclusão digital e universalização do acesso à internet de alta velocidade.

Contudo, há pontos positivos, como a realização de projetos-piloto voltados para a Indústria 4.0, especialmente no Polo Industrial de Manaus (PIM), que demonstram o interesse em integrar a infraestrutura 5G aos processos produtivos avançados.

#### 4.6.3 Análise da Cobertura da Tecnologia 5G em Manaus - AM

A Figura 28 apresenta uma tabela com dados referentes à cobertura da tecnologia 5G no município de Manaus-AM, considerando todas as operadoras de telecomunicações atuantes na região. Os dados exibem informações como o código do município (1302603), população, domicílios, área territorial, porcentagem de área coberta, moradores cobertos e domicílios cobertos.

Do ponto de vista técnico, é possível identificar uma baixa cobertura territorial da tecnologia 5G em Manaus. Apenas 6,98% da área total do município está coberta por esta tecnologia, o que representa uma pequena fração dos seus 11.401,06 km<sup>2</sup>. Em contrapartida, a cobertura populacional é bastante elevada, atingindo 99,38% dos moradores e 99,35% dos domicílios. Isso demonstra que a implementação do 5G está concentrada em regiões densamente povoadas, provavelmente nas zonas urbanas centrais.

Essa concentração urbana é uma estratégia comum adotada pelas operadoras na fase inicial de implantação de novas tecnologias, uma vez que permite maior retorno sobre o

investimento com menor infraestrutura necessária. Contudo, tal estratégia também evidencia uma disparidade no acesso ao 5G em áreas rurais e periféricas do município, o que pode acentuar a exclusão digital nessas regiões.

Em suma, a Figura 28 permite identificar o avanço da cobertura 5G em Manaus, especialmente entre a população urbana. No entanto, limitações como a duplicação de dados, ausência de contextualização temporal e segmentação geográfica reduzem seu potencial analítico. A inclusão de mapas temáticos, gráficos de cobertura e dados por operadora seriam melhorias significativas para uma análise mais completa e eficaz.

A baixa cobertura territorial da tecnologia 5G em Manaus, apesar da alta cobertura populacional, é um reflexo dos desafios geográficos, econômicos e estruturais da região.

A seguir, serão apresentadas sugestões de melhoria da cobertura territorial considerando aspectos técnicos, econômicos, geográficos e de políticas públicas.

#### 1. Aspecto Técnico

a) Implantação de *small cells* híbridas com macro células: A combinação de antenas de longo alcance com pequenas células em áreas urbanas e de difícil acesso pode aumentar a cobertura territorial sem exigir grandes torres.

b) Uso de frequências mais baixas (sub-1 GHz): Essas frequências possuem maior alcance e melhor penetração em áreas com vegetação densa e terrenos irregulares, comuns na região amazônica.

c) Backhaul via satélite ou rádio de alta capacidade: Considerando a dificuldade de acesso por fibra óptica em áreas remotas, alternativas como enlaces via rádio ou satélite podem ampliar a conectividade da infraestrutura.

#### 2. Aspecto Econômico

a) Incentivos fiscais para operadoras: A criação de incentivos fiscais (redução de ICMS, por exemplo) para expansão em áreas de baixa densidade pode estimular os investimentos privados.

b) Parcerias público-privadas (PPPs): Projetos de cooperação entre operadoras, governos estadual e municipal podem viabilizar a instalação de infraestrutura em regiões onde o retorno financeiro é baixo.

c) Criação de fundos específicos: Destinar recursos do Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações (FUST) para coberturas 5G em regiões de difícil acesso é uma estratégia viável.

### 3. Aspecto Geográfico

a) Mapeamento de zonas prioritárias de expansão: Utilizar geoprocessamento para identificar áreas com demanda potencial (comunidades, polos industriais e turísticos) e priorizar a cobertura.

b) Implantação de torres em regiões estratégicas: Em Manaus, o posicionamento em comunidades ribeirinhas, distritos industriais e zonas de fronteira urbana-rural pode maximizar a cobertura com menos infraestrutura.

### 4. Aspecto Político e Regulatório

a) Desburocratização de licenças para instalação de antenas: Processos mais ágeis nas prefeituras para a liberação de *sites* de telecomunicações são fundamentais.

b) Planejamento urbano com foco em conectividade: Inserir metas de expansão de infraestrutura 5G em planos diretores municipais.

c) Criação de leis municipais de incentivo à conectividade: Assim como ocorre com leis de zoneamento, legislações específicas podem facilitar a instalação de antenas e equipamentos.

### 5. Aspecto Social e Educacional

a) Capacitação de mão de obra local: Investir em cursos técnicos e programas de formação voltados para instalação e manutenção de redes 5G nas comunidades, reduzindo custos operacionais e gerando empregos locais.

b) Inclusão digital como política pública: Ampliar o acesso territorial ao 5G com foco em serviços essenciais, como educação à distância, telemedicina e agricultura digital em áreas rurais.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal analisar o processo de implantação da tecnologia 5G na cidade de Manaus-AM, por meio de um estudo de caso fundamentado em bases técnicas, dados oficiais e literatura científica. A pesquisa abordou aspectos técnicos, estruturais, sociais e econômicos da implementação dessa nova geração de conectividade móvel, confrontando a realidade local com as diretrizes internacionais e as expectativas nacionais em torno do 5G.

### 5.1 SÍNTESE DOS RESULTADOS

A análise evidenciou que, embora Manaus tenha aderido ao cronograma nacional de ativação da rede 5G, a implantação ainda se encontra em estágio intermediário. A cobertura inicial concentra-se em zonas centrais e áreas industriais, enquanto bairros periféricos e comunidades ribeirinhas permanecem com acesso restrito ou inexistente.

Os dados levantados indicam que a cidade apresenta desempenho técnico satisfatório em termos de velocidade e latência nas áreas cobertas, aproximando-se das diretrizes internacionais da ITU para aplicações eMBB. Contudo, aspectos como URLLC e mMTC ainda não foram plenamente explorados localmente, o que limita o aproveitamento integral do potencial do 5G.

No contexto industrial, destacam-se iniciativas promissoras no Polo Industrial de Manaus (PIM), com foco em automação, IoT e aplicações em tempo real, compatíveis com os pilares da Indústria 4.0. Tais projetos apontam para a relevância estratégica do 5G na modernização econômica da região.

Por outro lado, foram identificados obstáculos significativos, como a escassez de infraestrutura óptica, a logística regional desafiadora, os custos elevados de implantação e a carência de políticas públicas específicas para inclusão digital na região Norte. Tais fatores reforçam a necessidade de atuação conjunta entre Estado, operadoras e instituições de pesquisa para garantir a universalização do acesso à nova tecnologia.

A ampliação da cobertura territorial do 5G em Manaus requer uma abordagem multifatorial, que combine inovação tecnológica, investimentos públicos e privados, planejamento urbano inteligente e compromisso social. O contexto amazônico impõe desafios únicos, mas

também oferece oportunidades estratégicas para o desenvolvimento sustentável da conectividade na região.

## 5.2 CONTRIBUIÇÕES DO ESTUDO

Este trabalho contribui para o campo da Tecnologia em Sistemas de Telecomunicações ao oferecer uma análise detalhada, contextualizada e atualizada sobre a implantação do 5G em uma região estratégica e desafiadora como a Amazônia.

Ao articular dados técnicos com aspectos sociais e econômicos, a pesquisa amplia a compreensão sobre os fatores que condicionam o sucesso ou fracasso da difusão de tecnologias emergentes em cenários urbanos complexos.

Além disso, a abordagem metodológica utilizada pode servir como modelo para estudos semelhantes em outras cidades da Região Norte, promovendo comparações e diagnósticos regionais sobre a conectividade de última geração no Brasil.

## 5.3 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Como limitações, destaca-se o fato de a pesquisa ter sido realizada com base em dados secundários, sem a realização de entrevistas ou coleta de dados primários diretamente com operadoras ou usuários da tecnologia. Ainda, o foco na cidade de Manaus restringe a generalização dos resultados para outros contextos urbanos, que podem apresentar características e desafios distintos.

Devido à LGPD teve-se algumas restrições com relação ao fornecimento de informações atualizadas e detalhadas junto às operadoras.

Além disso, a rápida evolução tecnológica do setor pode tornar algumas informações obsoletas em curto prazo, exigindo atualizações constantes.

## 5.4 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para aprofundar o tema, sugerem-se os seguintes caminhos para investigações futuras:

- Realização de pesquisas empíricas com usuários finais do 5G em Manaus, para verificar percepções de qualidade, usabilidade e impacto cotidiano;
- Estudos comparativos entre Manaus e outras capitais da Região Norte para identificar padrões regionais de implantação;
- Avaliação do impacto socioeconômico do 5G em setores específicos como saúde, educação e segurança pública;
- Análises da efetividade de políticas públicas e incentivos regulatórios para ampliação do acesso em áreas remotas da Amazônia Legal;
- Investigações sobre modelos de negócios sustentáveis para operação do 5G em regiões de baixa densidade populacional.

Ao final desta pesquisa, conclui-se que a implantação do 5G em Manaus é um processo promissor, mas ainda desigual e dependente de múltiplos fatores estruturais, políticos e econômicos. O sucesso dessa nova etapa tecnológica exigirá não apenas infraestrutura de ponta, mas também uma articulação estratégica entre inovação, inclusão e sustentabilidade, especialmente em contextos como a Amazônia.

## REFERÊNCIAS

ANATEL. **Leilão do 5G: Documentação oficial e cronograma**. Brasília: Agência Nacional de Telecomunicações, 2023. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ANATEL. **Regulamentação**. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br>. Acesso em: 03 de maio 2025

ANATEL. **Cobertura 5G no Brasil – Dados municipais**. Brasília, 2024. Acesso em: 20 abr. 2025

ANATEL. **Painel 5G – Dados por município**. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.anatel.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2025.

ANATEL. **Relatório de Acompanhamento da Implantação do 5G no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Telecomunicações, 2024.

ANATEL. **Relatórios de Expansão da Telefonia Móvel**. Brasília: Agência Nacional de Telecomunicações, 2023.

ANATEL. **Relatórios Setoriais: Banda Larga Móvel 4G no Brasil**. Brasília: Agência Nacional de Telecomunicações, 2023.

ANATEL. **Relatórios Técnicos de Telefonia Móvel**. Brasília: Agência Nacional de Telecomunicações, 2023. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel>.

CASTELLS, M. **A Sociedade em Rede**. 6. ed. São Paulo: Paz e Terra, 2003.

CICCONETTI, Claudio; VANNI, Luca; LAMMANA, Davide. **Quality of Service in the IP Radio Access Network (IPRAN)**. Springer, 2015.

CLARO. **Projetos educacionais com 5G em universidades brasileiras**. São Paulo, 2023.

CLARO S.A. **Arquitetura da rede 4G: elementos da rede de dados**. São Paulo: Claro, 2023. Disponível em: <https://www.claro.com.br/tecnologia/4g>. Acesso em: 16 abr. 2025.

COSTA, R. B.; NASCIMENTO, A. L. **Infraestrutura e desafios para a implementação do 5G no Brasil**. Revista Brasileira de Engenharia de Telecomunicações, v. 14, n. 2, p. 45-58, 2022.

DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKÖLD, Johan. **4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband**. 1. ed. Oxford: Academic Press, 2011.

ERICSSON. **5G for Smart Cities: Transforming urban life**. White Paper, 2023. Disponível em: <https://www.ericsson.com>. Acesso em: 08 abr. 2025.

European Commission (2020). **5G for Europe: An Action Plan**. Brussels: European Commission.

FERREIRA, C. A.; DIAS, T. R. **Indústria 4.0 na Amazônia: desafios e oportunidades para o PIM com a chegada do 5G**. Revista Brasileira de Inovação Tecnológica, v. 6, n. 2, p. 41-53, 2021.

FERREIRA, C. A. et al. **Arquitetura e desafios do 5G no contexto brasileiro**. Cadernos Técnicos de Engenharia, v. 11, n. 1, p. 30-42, 2021.

FURHT, B.; AHMAD, S. **Handbook of Mobile Systems Applications and Services**. Springer, 2014.

GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2017.

GOMES, J. L.; PEREIRA, M. T. **A evolução das redes móveis: do 1G ao 5G**. Revista Tecnologia em Foco, v. 18, n. 1, p. 9-18, 2020.

GOMES, L. et al. **Indústria 4.0 no Brasil: o papel do 5G**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2023.

GOMES, L.; SILVEIRA, V.; ARAÚJO, M. P. **Indústria 4.0 no Brasil: o papel do 5G**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2023.

GSMA. **5G and the Future of Connectivity**. Londres: GSMA Intelligence, 2022.

GSMA. **History of Mobile Networks**. Londres: GSMA, 2020. Disponível em: [www.gsma.com](http://www.gsma.com).

GSMA. **The Mobile Economy: Latin America 2024**. GSMA Intelligence, 2024.

GSMA. Disponível em: <https://www.gsma.com/>. Acesso em: fev. 2025.

IBGE. **Censo 2022: Manaus-AM**. Rio de Janeiro, 2023.

IEEE. **5G and Beyond: Enabling the Internet of Everything**. IEEE Communications Society, 2021. Disponível em: <https://www.comsoc.org>.

ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **IMT-Advanced: Developing a Global Standard for 4G**. Genebra: ITU, 2017.

ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **IMT-2000: Third Generation Mobile Systems**. Genebra: ITU, 2019. Disponível em: <https://www.itu.int>.

ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **IMT-2020: Requirements and Evaluation Criteria**. Genebra: ITU, 2020.

ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond**. Recommendation ITU-R M.2083-0. Genebra, 2021.

ITU – INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Setting the Scene for 5G: Opportunities & Challenges**. Geneva: ITU Publications, 2022.

KUMAR, N. et al. **A comprehensive survey on 5G architecture, technologies, applications, and challenges**. IEEE Access, v. 9, p. 49715-49756, 2021.

KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. **Redes de Computadores e a Internet: Uma abordagem Top-Down**. 7. ed. São Paulo: Pearson, 2017.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. A. **Fundamentos de metodologia científica**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2003.

MUKHERJEE, B. **Optical WDM Networks**. Springer, 2007. Acesso em: JAN. 2025.

Nokia. **Padrão de Instalação LTE AirScaleSRAN e 5G DSS**, 2022.

NPERF. **Cobertura 3G/4G/5G em Manaus, Brasil**. Disponível em: <https://www.nperf.com>. Acesso em: 10 abr. 2025.

NPERF. Disponível em: <https://www.nperf.com/pt/map/BR/-/169094.Claro-Mobile/signal?ll=-3.225528784074657&lg=-59.80819702148438&zoom=9>. Acesso em: fev. 2025.

OLIVEIRA, R. (2022). **Telecommunications in Remote Regions: The Challenges of 5G Implementation**. Journal of Engineering and Technology.

RIBEIRO, J. C. **Sistemas de Comunicação Móvel Celular**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

ROHDE-SCHWARZ. Disponível em: [https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/overview/embb\\_232150.html](https://www.rohde-schwarz.com/br/solucoes/test-and-measurement/wireless-communication/wireless-5g-and-cellular/5g-test-and-measurement/embb/overview/embb_232150.html). Acesso em: fev. 2025.

RODRIGUES, D. F.; SOUZA, R. A.; MARTINS, A. L. **Políticas públicas para inclusão digital**. Brasília: IPEA, 2024.

SANTOS, M. **A globalização e os desafios da rede 5G**. Rio de Janeiro: Editora Campus, 2020.

SANTOS, R. M. dos. **Redes Móveis: Fundamentos e Evolução Tecnológica**. São Paulo: Érica, 2020.

SAUTER, Martin. **From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband**. 3. ed. Chichester: Wiley, 2014.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2016.

SILVA, J. S.; ALMEIDA, F. R.; GOMES, T. F. **Telecomunicações no Brasil: desafios e perspectivas**. São Paulo: Editora Atlas, 2021.

SMITH, J. (2020). **The Impact of 5G on Global Connectivity**. Tech Insights.

SOUZA, D. P. de. **Sistemas de Comunicação Móvel Celular: Fundamentos e Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

SOUZA, R. **Desafios e oportunidades do 5G na Região Norte**. Manaus: UFAM, 2022.

STALLINGS, W. **Fundamentals of Network Security**. 2. ed. Upper Saddle River: Pearson, 2014.

STALLINGS, W. **Wireless communications & networks**. 2. ed. New Jersey: Pearson, 2005.

TANENBAUM, Andrew S.; WETHERALL, David J. **Redes de Computadores**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2011.

TIM. **Implantação do 5G no Polo Industrial de Manaus**. Relatório Técnico, 2023.

TIM. **Resultados de rede 5G – Norte do Brasil**. Brasília, 2024.

3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **HSPA Evolution for Mobile Broadband**. 2020. Disponível em: <https://www.3gpp.org>.

3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **5G NR (New Radio) Technical Overview**. Release 15, 16 e 17. 2022. Disponível em: <https://www.3gpp.org>.

3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **LTE and LTE-Advanced Technology Overview**. 2020. Disponível em: <https://www.3gpp.org>.

3GPP. **Release 16 – 5G specifications**. 2020.

3GPP. **Release 17: 5G specifications**. 2020. Disponível em: <https://www.3gpp.org>.

3GPP. Disponível em: <https://www.3gpp.org/technologies/5g-system-overview> Acesso em: fev. 2025.

3GPP. Disponível em: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/browse-our-technologies> Acesso em: fev. 2025.

VIVO. **Relatório de cobertura 5G por estado – Amazonas**. São Paulo, 2023.

VIVO. **Relatório de desempenho da rede 5G em Manaus**. São Paulo, 2023.

YIN, R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.