

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

BRUNO FERNANDES MACEDO FERREIRA

Desenvolvimento das Redes Móveis: História e Perspectivas Futuras no Brasil:

São João da Boa Vista

2025

Bruno Fernandes Macedo Ferreira

Desenvolvimento das Redes Móveis: História e Perspectivas Futuras no Brasil:

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações .

Orientador: Prof^a Dr^a. Rita de Cássia Domingos

Coorientador: Prof^o Dr. Plínio Santini Dester

São João da Boa Vista

2025

F383d

Ferreira, Bruno Fernandes Macedo

Desenvolvimento das redes móveis: história e perspectivas futuras no Brasil / Bruno Fernandes Macedo Ferreira. -- São João da Boa Vista, 2025

87 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista

Orientadora: Prof Dr^a Rita de Cássia Domingos

Coorientador: Prof Dr^o Plínio Santini Dester

1. Telecomunicações. 2. Sistemas de telecomunicações. 3. Telefonia celular. 4. Sistemas de comunicação sem fio. 5. Telecomunicações Equipamento e acessórios. I. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**DESENVOLVIMENTO DAS REDES MÓVEIS:
HISTÓRIA E PERSPECTIVAS FUTURAS NO BRASIL**

Aluno: Bruno Fernandes Macedo Ferreira
Orientador: Prof.^a Dr.^a Rita de Cássia Domingos

Banca Examinadora:

- Rita de Cássia Domingos (Orientadora)
- Ivan Aritz Aldaya Garde (Examinador)
- Edgar Eduardo Benitez Olivo (Examinador)

Os formulários de avaliação e a ata da defesa, na qual consta a aprovação do trabalho, devidamente assinados pela banca encontram-se no prontuário eletrônico do aluno.

Dedico este trabalho a minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante em minha vida, pela proteção e pela força concedida nos momentos de maior desafio. Agradeço pela fé que me guia e pela esperança que me impulsiona a seguir em frente com determinação.

Aos meus amados pais, Pêrsio Romel Macedo Ferreira e Patrícia Costa Fernandes Ferreira, por terem me proporcionado um lar abençoado, repleto de amor e bênçãos, onde sempre encontrei motivação para sonhar e buscar meus objetivos. Serei eternamente grato por todo o apoio, dedicação e ensinamentos que me inspiram diariamente.

Aos meus irmãos, Livia Fernandes Macedo Ferreira e Hugo Fernandes Macedo Ferreira, pelo apoio, incentivo e amizade em todas as etapas da vida, que sempre me fortaleceram na minha caminhada acadêmica e pessoal.

À minha amada namorada, Michelle Silveira, por estar ao meu lado em todos os momentos, compartilhando alegrias, oferecendo apoio nas adversidades e sendo fonte de motivação e parceria nesta caminhada.

À Profa. Dra. Rita de Cássia Domingos, minha orientadora, pela competência, paciência e valiosas contribuições acadêmicas indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Plínio Santini Dester, pela dedicação, pelo apoio acadêmico e pelo conhecimento compartilhado, que enriqueceram minha trajetória.

À empresa Behive e ao meu antigo gestor, Renan Prince, pela abertura e confiança ao disponibilizarem os dados técnicos permitidos sobre as Estações Rádio Base e equipamentos de telecomunicações, informações fundamentais para a fundamentação prática deste estudo.

*“O Senhor é meu pastor; nada me faltará.
Ele me guia por caminhos de justiça e paz.”
(Salmos 23:1-3)*

RESUMO

Este trabalho examina a evolução das redes móveis do 1G ao 5G, com foco no contexto brasileiro e nas perspectivas do 6G. O 1G introduziu a voz analógica, seguido pelo 2G, que permitiu a digitalização, que popularizou os SMS e os cartões SIM. O 3G possibilitou a internet móvel, enquanto o 4G consolidou o streaming em alta definição. O 5G representa uma ruptura de paradigma, projetado não apenas para conectar pessoas, mas também para servir como infraestrutura para a Internet das Coisas (IoT), para a Indústria 4.0 e para comunicações críticas. Um ponto central da análise é o processo de implementação no Brasil, com ênfase no papel fundamental da ANATEL, a agência reguladora do país, e na evolução dos leilões de frequência, que passaram de um modelo arrecadatário para um instrumento de política pública, promovendo investimentos em infraestrutura e inclusão digital, culminando no leilão do 5G em 2021. O trabalho também explora as pesquisas atuais sobre o 6G, abordando inovações como frequências de terahertz e inteligência artificial nativa na rede, assim como os desafios e oportunidades para que o Brasil passe de um mero adotante de tecnologia a um contribuinte ativo na próxima revolução das comunicações.

Palavras-Chave: redes móveis; implementação no Brasil; regulação de telecomunicações, política pública digital.

ABSTRACT

This work examines the evolution of mobile networks from 1G to 5G, with a focus on the Brazilian context and the prospects for 6G. The 1G introduced analog voice, followed by 2G, which popularized SMS and SIM cards. The 3G-enabled mobile internet, while 4G solidified high-definition streaming. The 5G represents a paradigm shift, designed not only to connect people but also to serve as the infrastructure for the Internet of Things (IoT), Industry 4.0, and critical communications. A central point of the analysis is the implementation process in Brazil, with a particular emphasis on the pivotal role of ANATEL, the country's regulatory agency, and the evolution of frequency auctions, which shifted from a revenue-generating model to a public policy instrument, promoting infrastructure investment and digital inclusion, culminating in the 5G auction in 2021. The paper also explores current research on 6G, addressing innovations such as terahertz frequencies and native artificial intelligence in the network, as well as the challenges and opportunities for Brazil to move from being merely a technology adopter to an active contributor in the next communications revolution.

Keywords: mobile networks, implementation in Brazil, telecommunications regulation, digital public policy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Esquema de células hexagonais onde o centro é o Centro de Comutação e Controle (CCC) que passa a informação para a Estação Radio Base (ERB) que repassa a informação para o usuário (UE) e o usuário também envia informação ERB que repassa para o CCC.	20
Figura 2	Representação de dois usuários representados por 1 e 2 em cada canal de 30kHz divididos através do FDMA no domínio da frequência.	32
Figura 3	Representação de dois usuários definidos com 1 e 2 em um canal de 30kHz transmitidos em intervalos diferentes no tempo através do TDMA.	36
Figura 4	Representação de quatro usuários definidos com 1,2,3 e 4 em cada canal de 200kHz no domínio da frequência transmitidos em intervalos diferentes no domínio do tempo através do GSM.	39
Figura 5	Diagrama de constelação para modulação QPSK, onde o eixo horizontal representa a componente em fase e o eixo vertical a componente em quadratura onde cada ponto representa um par de bit.	47
Figura 6	Estrutura da rede de acesso E-UTRAN destacando as principais interfaces de comunicação como X2, responsável pela troca de sinalização e dados diretamente entre os eNBs.	55
Figura 7	Comparação entre as técnicas de múltiplo acesso do LTE, à esquerda o OFDMA onde a banda de 180kHz é dividida em 12 portadoras, à direita, o SC-FDMA onde todas as portadoras são enviadas ao mesmo tempo.	57
Figura 8	Diagrama esquemático da polarização de canal para um bloco de tamanho $N = 2$, a estrutura mostra a combinação de duas cópias independentes do canal W para criar o canal vetorial W_2 , transformando as entradas u_1 e u_2 através de operações lógicas (XOR) antes da transmissão.	64
Figura 9	Arquiteturas de rede 5G, à esquerda a Arquitetura NSA com Dupla Conectividade (EN-DC), onde o dispositivo se conecta simultaneamente ao 4G e ao 5G, à direita a Arquitetura SA, onde toda a sinalização e tráfego de dados trafegam exclusivamente pela rede 5G.	67
Figura 10	Equipamento <i>Remote Radio Unit Huawei</i> 4G. Este equipamento recebe os dados digitais da <i>baseband</i> e realiza a conversão para rádio frequência e envia à antena.	69
Figura 11	Equipamento Placa de banda Huawei para 2G a 5G. Realiza toda a "inteligência" do sinal (codificação, modulação e correção de erros) antes de enviar para a RRU	69
Figura 12	<i>Diplexer</i> - Dispositivo passivo que combina ou separa bandas de frequências distintas, representado na imagem o equipamento que opera em 1020-2170Hz e 1710-1880Hz Permitindo o uso compartilhado de antenas (multi-bandas) e cabos.	70

Figura 13	Modelo de Antena passiva com setores fixos de 1.5metros utilizada nas redes 2G a 4G.	71
Figura 14	Modelo Antena Ativa com controle dinâmico de feixes 0.7metros AQQA Nokia 5G / Massive MIMO.	71
Figura 15	Modelo <i>Greenfield</i> torre autoportante triangular de 60metros, o qual exige fundações complexas e maior área de implementação.	72
Figura 16	Modelo de Site <i>Rooftop</i> instalado no topo de um prédio em área urbana, solução fundamental para garantir cobertura em área de alta densidade populacional. . .	73
Figura 17	Modelo poste metálico <i>BIOSITE</i> de 18 metros com <i>radome</i> que contém três antenas passivas setorizadas para 2G a 4G, o qual se camufla como poste de iluminação para se integrar harmonicamente ao ambiente urbano, os equipamentos, <i>basebands</i> e RRUs são instalados internamente.	74
Figura 18	Modelo <i>small cell</i> Nokia com antena 4G e 5G com <i>baseband</i> com aproximadamente 5metros, focando em capacidade para suprir necessidade de conexões com os usuários em locais de alto tráfego, essenciais para densificação do 5G. . . .	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Evolução das Tecnologias LTE e LTE-Advanced.	60
Tabela 2 – Resumo dos Requisitos Essenciais dos Pilares 5G	62
Tabela 3 – Quadro comparativo da evolução tecnológica (1G ao 5G).	67
Tabela 4 – Prazos e status de liberação e ativação da faixa de 3,5 GHz no Brasil	77
Tabela 5 – Comparativo de Métricas de Desempenho: 5G vs. 6G (Pico Teórico)	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
BG	<i>Base Graph</i>
BG1	<i>Base Graph 1</i>
BG2	<i>Base Graph 2</i>
CBIM	<i>Common Baseline Information Model</i>
DEGA	<i>Density Evolution with Gaussian Approximation</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
ERB	Estação Rádio Base
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
FSPL	<i>Free-Space Path Loss</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
Gbps	Gigabits por segundo
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
LDPC	<i>Low-Density Parity-Check Code</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>LTE-Advanced</i>
LTE-A Pro	<i>LTE-Advanced Pro</i>
NR	<i>New Radio</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PL	<i>Path Loss</i>

QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
QC-LDPC	<i>Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check Code</i>
RF	Radiofrequência
RRU	<i>Remote Radio Unit</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier - Frequency Division Multiple Access</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UDC	<i>User Data Convergence</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
NBFM	<i>Narrowband Frequency Modulation</i>
WBFM	<i>Wideband Frequency Modulation</i>
PCCC	<i>Parallel Concatenated Convolutional Codes</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$Pr(d)$	Potência recebida a uma distância d
P_t	Potência transmitida
G_t	Ganho da antena transmissora
G_r	Ganho da antena receptora
λ	Comprimento de onda
d	Distância entre transmissor e receptor
L	Fator de perda do sistema (não relacionado à propagação)
S	Densidade de potência
A	Área (como em $A = 4\pi d^2$)
A_e	Área efetiva da antena
L_{fs}	Perda de percurso em espaço livre (FSPL)
f	Frequência da portadora
c	Velocidade da luz
PL	Perda de percurso (Path Loss)
n	Expoente de perda de percurso (path loss exponent)
k_{perda}	Constante de proporcionalidade da perda de percurso
d_0	Distância de referência
$a(h_m)$	Fator de correção da altura da antena móvel (modelo Hata)
h_b	Altura efetiva da antena da estação base
h_m	Altura da antena móvel
L_{50}	Perda de percurso mediana no modelo de Okumura–Hata
$\phi_1(t), \phi_2(t)$	Funções de base ortonormais do QPSK
$d_I(t)$	Componente em fase do símbolo (I)
$d_Q(t)$	Componente em quadratura do símbolo (Q)
f_c	Frequência da portadora

T_s	Período do símbolo
$s(t)$	Sinal modulado no tempo
θ_i	Fases discretas do QPSK
X_k	Símbolo de dados complexo na k -ésima subportadora
N	Número total de subportadoras em OFDM
f_k	Frequência da k -ésima subportadora ($f_k = k\Delta f$)
Δf	Espaçamento entre subportadoras
PAPR	<i>Peak-to-Average Power Ratio</i>
$I(W_N^{(i)})$	Capacidade do i -ésimo subcanal polar
$C(W)$	Capacidade do canal original
K	Número de bits de informação
N	Comprimento total do bloco do código polar
	$E[\cdot]$ Valor esperado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	REVISÃO CONCEITUAL	19
2.1	Células e o Mosaico Hexagonal	19
2.1.1	Reutilização de Frequência e <i>Clusters</i>	20
2.1.2	Capacidade do Sistema e Suas Equações Fundamentais	20
2.1.3	Interferência e a Relação de Reuso Co-canal (Q)	21
2.1.4	O Processo de Handoff (ou Handover)	22
2.1.5	Arquitetura Funcional de uma Rede Móvel	22
2.2	Propagação de sinal	23
2.2.1	A Natureza das Ondas Eletromagnéticas nas Comunicações Móveis	23
2.2.2	Difração	23
2.2.3	Reflexão	24
2.2.4	Espalhamento	24
2.3	Múltiplos Percursos	24
2.3.1	Outros Modos de Propagação	25
2.4	Modelagem Macroscópica do Canal	25
2.4.1	O Modelo Fundamental de Propagação em Espaço Livre	26
3	PRIMEIRA GERAÇÃO (1G)	31
3.1	A Primeira Geração (1G): O Início da Mobilidade Analógica	31
3.1.1	FDMA	32
3.1.2	Padrão AMPS	32
3.1.3	Modulação em frequência	33
3.1.4	Infraestrutura	34
4	SEGUNDA GERAÇÃO (2G)	35
4.1	Códigos Convolucionais	35
4.2	A Segunda geração (2G): O início da digitalização	35
4.2.1	Time Division Multiple Access	36
4.3	Capacidade	40
5	TERCEIRA GERAÇÃO (3G)	42
5.1	UMTS	43
5.2	Turbo Códigos	43
5.2.1	CDMA	44
5.2.2	WCDMA	44
5.2.2.1	Modulação QPSK	47

6	QUARTA GERAÇÃO (4G)	52
6.1	<i>Long-Term Evolution</i>	52
6.2	Interface de Rádio E-UTRAN	54
6.3	OFDMA	55
6.4	LTE-Advanced	58
6.5	LTE-Advanced Pro	59
7	QUINTA GERAÇÃO (5G)	61
7.1	O 5G Core	62
7.2	Network Slicing	63
7.3	5G New Radio	63
7.4	Códigos Polares	64
7.5	Código LDPC	65
7.6	Arquiteturas de Implantação	66
8	ERBS NO CONTEXTO BRASILEIRO	68
8.1	Arquitetura Moderna Distribuída	68
8.2	<i>Site Greenfield</i>	71
8.3	<i>Site Rooftop</i>	72
8.4	<i>BIOSITE</i>	73
8.5	<i>Small Cells</i>	74
9	DISCUSSÕES	76
10	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

A conectividade sem fio emergiu como um dos pilares fundamentais da sociedade contemporânea, estabelecendo uma rede intrínseca que conecta indivíduos, organizações e uma vasta gama de dispositivos (D’Aprile, 2007). No Brasil, essa evolução tecnológica tem sido um motor crucial para o desenvolvimento, embora permeada por desafios únicos de um país de dimensões continentais e de complexidades socioeconômicas. Desde as suas primeiras iterações, as redes móveis têm passado por um processo contínuo de aprimoramento, resultando em avanços notáveis na telefonia, chegando a picos de velocidade 1Gbps com a quinta geração, permitindo a proliferação da *Internet of Things* (Internet das coisas, IoT), essenciais para a concretização do conceito de cidades inteligentes (Sauter, 2017).

A trajetória tecnológica da comunicação móvel, que se estende da primeira geração (1G) à quinta geração (5G), reflete uma busca incessante por melhorias de conectividade e pela ampliação das aplicações possíveis (Trovão, 2023). Cada nova geração não apenas elevou a capacidade e a velocidade de transmissão de dados, mas também reconfigurou modelos de negócios, impulsionou inovações e habilitou serviços que antes eram inimagináveis. O advento do 5G, por exemplo, evidenciou o potencial de novas aplicações e modelos de negócios, consolidando a era da banda larga móvel (Conceição, Lima e Silva, 2023). Contudo, a implementação dessas tecnologias em um país como o Brasil envolve uma série de desafios, desde a expansão da infraestrutura até a superação de barreiras regulatórias e de custo, o que influencia diretamente a forma como a população acessa e se beneficia dessas inovações.

Nesse cenário de constante transformação, o horizonte tecnológico aponta para a *Sixth generation* (6G) de redes móveis. A rede móvel 6G está prevista para 2030 com a promessa de velocidades que podem alcançar até 1 terabyte por ERB, segundo a União Internacional de Telecomunicações. Para usuários finais, as projeções apontam velocidades entre 10 e 100 gigabits por segundo, variando conforme o espectro utilizado, especialmente em faixas sub-THz (100-300 GHz) (Lemos, 2025). No entanto, para o Brasil, a jornada rumo ao 6G não se limita aos avanços tecnológicos globais. O desafio para a evolução contínua da tecnologia wireless no país envolve, crucialmente, o desenvolvimento de seus pilares de sustentação, incluindo investimentos em pesquisa e melhorias significativas na infraestrutura existente (Saad, Bennis e Chen, 2019). A pesquisa sobre o 6G já identifica 12 desafios de implementação, sendo oito deles diretamente relacionados a tópicos fundamentais para sua concretização e para garantir uma conectividade global com sustentabilidade integrada (Huang, 2019).

Diante deste panorama, o presente trabalho tem como objetivo principal descrever a evolução das redes de comunicação móvel, contextualizando sua implementação e seus impactos no Brasil a cada geração, mostrando as perspectivas e os desafios específicos que a tecnologia 6G representa para a realidade do país. Para tal, será realizado um estudo teórico sobre a evolução das tecnologias de transmissão de dados móveis, desde as primeiras gerações (1G e 2G) até as mais recentes (3G, 4G e 5G), destacando suas características e avanços. Adicionalmente, será realizada uma análise comparativa entre essas gerações, abordando aspectos como capacidade de transmissão, latência, cobertura e os principais equipamentos de infraestrutura. O estudo também explorará aplicações

e impactos das tecnologias de radiofrequência em diversos setores estratégicos brasileiros, como a Internet das Coisas (IoT), a Inteligência Artificial e a automação. Por fim, serão discutidas as perspectivas do 6G no Brasil, com foco em seus potenciais benefícios, desafios técnicos, econômicos e sociais, bem como no impacto esperado no desenvolvimento tecnológico e na transformação digital do país. Este trabalho está estruturado da seguinte forma. No Capítulo 2, serão apresentados os fundamentos básicos de radiofrequência e de redes celulares. Tais conceitos são importantes para a compreensão do presente trabalho. Nos capítulos 3, 4, 5, 6 e 7 são descritas as trajetórias evolutivas das gerações de telefonia móvel, analisando as tecnologias 1G, 2G, 3G, 4G e 5G, respectivamente, com foco em suas implementações e impactos no Brasil. O Capítulo 8 destina-se a apresentar um panorama das estações rádio-base em operação no Brasil. O Capítulo 9 é dedicado à discussão na qual se analisam os desafios atuais e as tendências futuras do desenvolvimento tecnológico brasileiro no contexto do 6G. Por fim, o Capítulo 10 apresenta a conclusão, sintetizando os principais pontos abordados ao longo do trabalho.

2 REVISÃO CONCEITUAL

Uma rede móvel é um sistema de telecomunicações avançado que permite a comunicação sem fio entre dispositivos de usuários móveis. Seu objetivo principal é fornecer conectividade contínua, independentemente da localização ou do movimento do usuário na área de cobertura (Ordenez-Lucena, 2017). A capacidade de oferecer comunicação de voz e dados de forma ubíqua e em movimento transformou fundamentalmente a sociedade, mas essa capacidade depende de uma solução engenhosa para um desafio central da comunicação móvel, a congestão espectral no *downlink*.

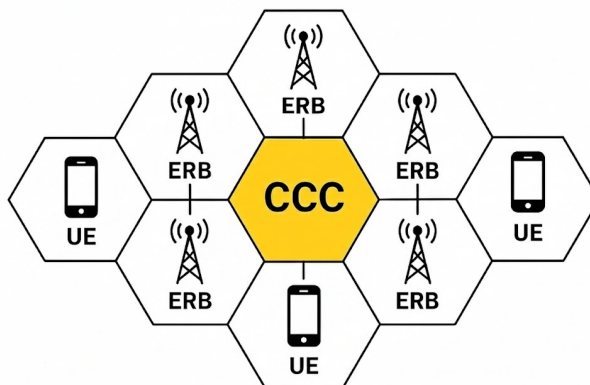
Os primeiros sistemas de rádio móvel utilizavam um único transmissor de alta potência para cobrir uma vasta área geográfica, de forma análoga a uma estação de rádio contemporânea. Esta abordagem era intrinsecamente não escalável. Com um número limitado de canais de frequência disponíveis, o número de usuários simultâneos era severamente limitado. Este fenômeno, conhecido como "congestão espectral", foi a principal barreira à adoção em massa da telefonia móvel (Rappaport, 2002). A solução, desenvolvida nos *Bell Laboratories*, foi o "conceito celular". Em vez de um único transmissor de alta potência, a área de serviço é dividida em múltiplas áreas menores, chamadas "células", cada uma servida por um transmissor de baixa potência. Esta mudança de paradigma permitiu um aumento significativo da capacidade do sistema por meio do princípio da reutilização de frequência.

A viabilidade do conceito celular não foi apenas uma questão de gestão de frequência, mas também uma solução economicamente sustentável que se escalou em simbiose com o progresso tecnológico. A utilização de transmissores de baixa potência significava que os componentes necessários, como amplificadores e antenas, eram menos complexos e, portanto, menos dispendiosos. Isso criou um ciclo de *feedback* positivo: à medida que as tecnologias de fabricação digital e de radiofrequência (RF) melhoravam, os componentes tornavam-se menores, mais baratos e mais eficientes em termos energéticos (Rappaport, 2002). Essa miniaturização e a redução de custos tornaram economicamente viável a implantação de uma rede densa de estações-base de baixa potência. Por sua vez, essa densificação da rede aumentou ainda mais a capacidade do sistema, reduzindo o custo por usuário e incentivando a adoção em massa. A receita gerada financiou mais desenvolvimento tecnológico e implantações ainda mais densas.

2.1 CÉLULAS E O MOSAICO HEXAGONAL

Cada célula representa uma área geográfica servida por uma Estação Rádio Base (ERB). Para fins de planejamento e análise do sistema, a forma ideal de uma célula é o hexágono. A geometria hexagonal é preferida porque os hexágonos podem cobrir um plano sem sobreposição nem lacunas (um processo chamado tesselação), o que simplifica os cálculos de projeto e de modelagem de cobertura. É importante notar que o uso de hexágonos é uma abstração geométrica; a cobertura de rádio real de uma célula, conhecida como sua *footprint*, é amorfa e fortemente influenciada pelo terreno, por obstáculos (edifícios, vegetação) e pelas características da antena da estação base. A Figura 1 ilustra o esquema de células hexagonais.

Figura 1 – Esquema de células hexagonais onde o centro é o Centro de Comutação e Controle (CCC) que passa a informação para a Estação Radio Base (ERB) que repassa a informação para o usuário (UE) e o usuário também envia informação ERB que repassa para o CCC.



Fonte: elaborado pelo autor.

O interessante do esquema de células é que várias delas podem utilizar as mesmas frequências, desde que não sejam adjacentes.

2.1.1 Reutilização de Frequência e *Clusters*

O espectro total alocado a um sistema móvel é um recurso finito. Para maximizar o uso, o conceito celular emprega a reutilização de frequências. O espectro total é dividido em grupos de canais. A cada célula é atribuído um grupo único de canais, e as células vizinhas recebem grupos distintos de canais para evitar interferência.

Um *cluster* é um grupo de N células, em que cada célula utiliza um conjunto diferente de frequências, e o conjunto completo de frequências disponíveis é utilizado exatamente uma vez por *cluster*. A cobertura completa do sistema é formada pela repetição contínua deste *cluster*. O tamanho do *cluster*, N , é um parâmetro de projeto crítico, com valores comuns de 4, 7 ou 12. O valor de N não é arbitrário; ele é determinado por restrições geométricas e segue a fórmula:

$$N = i^2 + ij + j^2. \quad (1)$$

onde i e j são inteiros não negativos que definem os passos para encontrar a célula co-canal mais próxima.

2.1.2 Capacidade do Sistema e Suas Equações Fundamentais

A capacidade de um sistema celular é definida como o número total de usuários que podem ser atendidos simultaneamente, ou seja, o número de dispositivos que a célula consegue atender simultaneamente. É uma função direta da reutilização de frequência. As equações fundamentais que governam esta relação foram descritas por teóricos como Rappaport (Rappaport, 2002) como veremos a seguir.

Seja S o número total de canais *duplex* disponíveis no sistema. Estes canais são divididos entre as N células de um cluster. Se k for o número de canais alocados para cada célula, então a relação fundamental é:

$$S = kN. \quad (2)$$

Esta equação demonstra como S é dividido entre as células de um cluster, de modo que um cluster maior (N maior) resulta em menos canais por célula (k menor).

Se o *cluster* for repetido M vezes para cobrir toda a área de serviço, a capacidade total do sistema de comportar canais é

$$C = M \cdot S = M \cdot k \cdot N. \quad (3)$$

A Equação (3) é central ao conceito de célula. Ela revela que a capacidade do sistema C não é limitada pelo número total de canais disponíveis S , mas pode ser aumentada teoricamente, de forma ilimitada, ao aumentar o número de repetições do cluster M . Na prática, isso é alcançado reduzindo o tamanho das células, o que permite que mais clusters M se encaixem em uma determinada área geográfica, aumentando, assim, a capacidade de atender a uma maior densidade de usuários.

2.1.3 Interferência e a Relação de Reuso Co-canal (Q)

A principal limitação de desempenho em um sistema celular não é o ruído térmico, mas sim a interferência causada por outros usuários na rede. A fonte mais significativa de interferência é a interferência cocanal (*Co-Channel Interference*, CCI), que emana de usuários e ERBs que utilizam o mesmo conjunto de frequências (Goldsmith, 2005).

O nível de CCI é determinado pela Relação de Reuso Co-canal, indicada por Q . É definida como a razão entre a distância D entre os centros das células cocanais mais próximas e o raio R de uma célula:

$$Q = \frac{D}{R}. \quad (4)$$

Para uma geometria hexagonal, pode-se provar que esta razão está diretamente relacionada ao tamanho do cluster N :

$$Q = \sqrt{3N} \quad (5)$$

A Equação (5) é crucial porque conecta a geometria do sistema N à qualidade do sinal, quantificada pela Relação Sinal-Interferência (*Signal-to-Interference Ratio*, S/I). Um valor maior Q implica que as células cocanais estão mais distantes, o que resulta em menor interferência e, consequentemente, em melhor qualidade de sinal. No entanto, um Q maior exige um N maior. De acordo com a equação 2, um N maior implica um k menor, ou seja, menos canais por célula. O que reduz a capacidade do sistema.

Esta interdependência revela uma tensão fundamental no projeto de redes celulares: o conflito entre capacidade e qualidade. Um operador não pode maximizar simultaneamente a capacidade (que requer um N pequeno) e a qualidade (que requer um N grande) com uma quantidade fixa de espectro. Adicionalmente, a capacidade pode ser aumentada por meio da redução do raio da célula R (Rappaport,

2002), o que aumenta o número de repetições M . No entanto, isso exige a implantação de mais estações-base, o que aumenta drasticamente o custo de capital (CAPEX) da rede. Portanto, qualquer decisão de projeto, como a escolha do tamanho de cluster N ou do raio de célula R , representa um compromisso estratégico entre os objetivos concorrentes de capacidade, cobertura e qualidade.

2.1.4 O Processo de Handoff (ou Handover)

Como os usuários são móveis, é necessário um mecanismo para transferir uma chamada de voz ou sessão de dados ativa de uma célula para outra à medida que o usuário se move através das fronteiras celulares. Este processo é chamado de *handoff* ou *handover*.

O processo de handover é iniciado quando a força do sinal da estação base servidora cai abaixo de um limiar, enquanto o sinal de uma estação base vizinha se torna mais forte (3GPP, 2023). A decisão é gerenciada pela rede para ser o mais transparente e imperceptível possível para o usuário.

2.1.5 Arquitetura Funcional de uma Rede Móvel

A arquitetura de uma rede móvel moderna é, logicamente, dividida em três domínios principais, cada um com funções distintas que colaboram para fornecer conectividade de ponta a ponta.

Os três domínios fundamentais são:

- **User Equipment (UE)**: O dispositivo do usuário final, como um smartphone ou um dispositivo IoT.
- **Radio Access Network (RAN)**: A rede de acesso via rádio, que gerencia a interface sem fio com o UE.
- **Core Network (CN)**: A rede central, que gerencia os serviços, a conectividade com redes externas e a mobilidade do usuário em nível de sistema.

Conforme definido pelo vocabulário do *3rd Generation Partnership Project* (3GPP), o *User Equipment* (Equipamento do Usuário, UE) é o dispositivo utilizado pelo usuário para acessar os serviços da rede (3GPP, 2006; 3GPP, 2020; 3GPP, 2023). O UE não é um dispositivo monolítico; ele consiste em duas partes principais: a *Mobile Termination* (Terminação Móvel, MT), que lida com as funções de rádio (transmissão, recepção, etc.), e o *Terminal Equipment* (Equipamento Terminal, TE), que é a interface com o usuário (por exemplo, o sistema operacional, a tela e os aplicativos de um smartphone). A identidade do assinante e as credenciais de segurança são gerenciadas por um módulo seguro, como o *Subscriber Identity Module* (Módulo de Identidade do Assinante, SIM), o *Universal Subscriber Identity Module* (Módulo Universal de Identidade do Assinante, USIM) ou o *Radio Access Network* (Rede de Acesso Rádio, RAN).

O *Core Network* (Rede Principal, CN) é o cérebro da rede móvel. Ele é responsável por funções críticas de alto nível que são essenciais para a operação do serviço (Afif, 2017). Suas principais responsabilidades incluem:

- **Autenticação e Autorização**: Verificar a identidade do usuário e determinar a quais serviços ele tem acesso.

- **Gerenciamento de Sessão:** Estabelecer, manter e encerrar as conexões de dados do usuário, incluindo a alocação de endereços *Internet Protocol* (IP).
- **Gerenciamento de Mobilidade:** Rastrear a localização do usuário em escala macro (entre diferentes grupos de células) para garantir que as chamadas e os dados possam ser roteados para ele.
- **Tarifação e Cobrança:** Coletar dados de uso para fins de faturamento.
- **Interconexão:** fornecer o *gateway* para redes externas, como a Internet e a *Public Switched Telephone Network* (Rede Telefônica Pública Comutada, RTPC).

2.2 PROPAGAÇÃO DE SINAL

A comunicação móvel sem fio depende inteiramente da propagação de ondas eletromagnéticas, por meio do espaço físico. A capacidade de projetar, implantar e otimizar redes celulares robustas e eficientes está intrinsecamente ligada a uma compreensão profunda de como essas ondas interagem com o ambiente complexo e dinâmico entre o transmissor e o receptor. Esta seção estabelece os princípios físicos fundamentais que governam a propagação de rádio, servindo de alicerce aos modelos matemáticos e estatísticos discutidos posteriormente.

2.2.1 A Natureza das Ondas Eletromagnéticas nas Comunicações Móveis

As ondas de rádio são uma forma de radiação eletromagnética, caracterizada por propriedades fundamentais como frequência (f), período (T), comprimento de onda (λ) e velocidade de propagação (v) (Balanis, 1989). A relação fundamental $v = f \cdot \lambda$ dita que, para uma velocidade de propagação constante (aproximadamente a velocidade da luz no vácuo), a frequência e o comprimento de onda são inversamente proporcionais. No contexto das redes móveis, a propagação dessas ondas ocorre dentro de faixas específicas do espectro eletromagnético, atribuídas pelas agências reguladoras. Cada geração de rede móvel utiliza diferentes bandas de frequência. A segunda geração utiliza a faixa de 900–1800 MHz, o 3G está na faixa de 1.9–2.1 GHz, a quarta geração utiliza frequências entre 700MHz a 3.5GHz e o 5G utiliza ondas milimétricas dentro do espectro de 24–100 GHz.

2.2.2 Difração

A difração é um fenômeno de propagação de ondas de rádio que permite que o sinal se curve ao redor das bordas afiadas de um obstáculo, como um edifício, um morro ou a copa de árvores, e se propague para regiões que, de outra forma, estariam na sombra geométrica, ou seja, bloqueadas. Em termos de redes celulares, a difração é um mecanismo crucial, pois é o principal meio pelo qual o serviço é provido a usuários que não possuem linha de visada direta com a estação base (eNode B/gNode B). A magnitude do campo difratado e a intensidade do sinal recebido decrescem com o aumento das dimensões do obstáculo e da frequência da onda, tornando a difração menos pronunciada em frequências mais altas (Rappaport, 2002).

2.2.3 Reflexão

A reflexão ocorre quando uma onda eletromagnética incide sobre um obstáculo cujas dimensões são significativamente maiores do que o comprimento de onda. Quando a superfície é irregular, a reflexão das ondas eletromagnéticas se torna difusa, espalhando o sinal em múltiplas direções ao invés de um único ângulo definido. Em ambientes de comunicação móvel, exemplos onipresentes incluem as fachadas de edifícios, o solo, paredes internas, janelas e grandes veículos. O mecanismo é análogo à reflexão da luz em um espelho, em que a onda "ricocheteia" na superfície (Sklar, 2001). Para superfícies lisas, o ângulo de reflexão é igual ao ângulo de incidência. No entanto, mesmo em superfícies que não são perfeitamente lisas, a reflexão permanece um mecanismo dominante. A principal consequência da reflexão é a criação de múltiplos percursos (*multipath*) para o sinal, em que cópias da onda original chegam ao receptor em instantes de tempo distintos e com fases distintas, gerando interferências.

2.2.4 Espalhamento

O espalhamento (*scattering*) ocorre quando um átomo ou partícula muda a trajetória da onda eletromagnética. Diferentemente da reflexão, que redireciona a energia em uma direção previsível, o espalhamento difunde a energia em múltiplas direções (Sklar, 2001). Em um ambiente urbano, o espalhamento é causado por uma infinidade de objetos, como postes de iluminação, placas de trânsito, folhagem de árvores e irregularidades nas superfícies dos edifícios. Este fenômeno enriquece o ambiente de múltiplos percursos, garantindo que a energia do sinal penetre em áreas profundamente sombreadas, onde nem a reflexão nem a difração são eficazes.

O tipo de interação entre a onda do sinal e as dimensões dos objetos no ambiente é o fator que determina qual desses três fenômenos será predominante, a reflexão, difração ou espalhamento. As redes móveis estão evoluindo para operar em uma gama cada vez maior de frequências, desde bandas sub-GHz (e.g., 700 MHz, com $\lambda \approx 43$ cm) até ondas milimétricas para quinta geração (e.g., 28 GHz, com $\lambda \approx 1.07$ cm). Um objeto como um poste de luz, com diâmetro de aproximadamente 20 cm, atua como espalhador do sinal de 700 MHz, pois suas dimensões são comparáveis ao comprimento de onda. No entanto, para o sinal de 28 GHz, o mesmo poste é um obstáculo muito grande em relação ao comprimento de onda, causando forte reflexão e uma sombra de difração bem definida atrás dele. Esta transição no comportamento da interação explica por que a propagação em mmWave é frequentemente descrita como "quase-óptica". A maioria dos objetos urbanos comuns é muito maior que o comprimento de onda do mmWave, resultando em um ambiente dominado por reflexões especulares e bloqueios abruptos, com difração muito menos eficaz para contornar obstáculos. Esta realidade física impulsiona diretamente a necessidade de implantações de células muito mais densas e o uso de tecnologias como o *beamforming* (formação de feixe) em redes 5G de alta frequência (Rappaport, 2017).

2.3 MÚLTIPLOS PERCURSOS

O fenômeno da propagação por múltiplos percursos, ou *multipath*, constitui um dos aspectos físicos mais determinantes no *design* e desempenho das redes móveis ao longo de suas gerações. Em cenários

reais de comunicação sem fio, especialmente em ambientes urbanos densos, o sinal eletromagnético transmitido pela Estação Rádio Base (ERB) raramente alcança o receptor por meio de uma única linha de visada direta. Em vez disso, a onda de rádio interage com o meio físico, sofrendo fenômenos de reflexão em edifícios, difração em arestas de obstáculos e espalhamento em folhagens ou superfícies irregulares. Como consequência dessa interação complexa, múltiplas réplicas do sinal original chegam à antena do receptor em instantes distintos, cada uma com sua própria amplitude, fase e ângulo de chegada (Rappaport, 2002).

A superposição dessas ondas no receptor gera efeitos que variam de acordo com a tecnologia empregada. O resultado mais imediato é o desvanecimento em pequena escala, causado pela interferência construtiva ou destrutiva entre as componentes do sinal, o que pode levar a flutuações severas na potência recebida em curtos intervalos de tempo ou espaço. Além disso, o atraso temporal entre a chegada da primeira e da última componente significativa do sinal, conhecido como espalhamento de atraso, pode ocasionar a interferência intersimbólica, onde um símbolo digital se sobrepõe ao subsequente, degradando a taxa de erro de bits e comprometendo a integridade da comunicação.

Nas primeiras gerações de telefonia móvel, o multipath era tratado predominantemente como um distúrbio a ser mitigado por meio de margens de potência ou equalizadores complexos. No entanto, a evolução para o 4G e o 5G trouxe uma mudança de paradigma fundamental na forma como esse fenômeno é abordado. Com a introdução de técnicas de modulação robustas ao atraso, como o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, e principalmente com o advento da tecnologia *Multiple Input Multiple Output*, as redes modernas passaram a explorar o ambiente de múltiplos percursos como um recurso. Ao utilizar múltiplas antenas na transmissão e recepção, os sistemas atuais aproveitam a diversidade espacial proporcionada pelo multipath para criar múltiplos caminhos de dados independentes, aumentando a capacidade do canal e a eficiência espectral sem a necessidade de aumentar a largura de banda, um conceito central para o desempenho das redes de quinta geração.

2.3.1 Outros Modos de Propagação

Embora a reflexão, a difração e o espalhamento sejam os mecanismos dominantes na propagação móvel terrestre, outros modos também existem e são relevantes em contextos específicos. A propagação por espalhamento troposférico, por exemplo, utiliza irregularidades na troposfera para permitir comunicações além do horizonte em distâncias de até centenas de quilômetros, tipicamente em faixas de *Very High Frequency* (Frequência Muito Alta, VHF) e *Ultra High Frequency* (Frequência Ultra Alta, UHF). A propagação de ondas celestes (*skywave*), que depende da reflexão na ionosfera, é fundamental para a radiodifusão de longa distância em frequências mais baixas, como *High Frequency* (Alta Frequência, HF), mas não é um mecanismo primário para redes celulares modernas (Seybold, 2005).

2.4 MODELAGEM MACROSCÓPICA DO CANAL

Enquanto os mecanismos físicos descrevem as interações fundamentais da onda, os modelos de propagação em larga escala (ou macroscópicos) buscam prever a atenuação média da potência do sinal em função da distância entre o transmissor e o receptor. Esses modelos são ferramentas essenciais para

o planejamento de cobertura de rede, a determinação do raio celular e a análise de interferência. Eles representam uma progressão lógica, partindo de um ideal teórico e passando por modelos empíricos cada vez mais complexos e específicos do ambiente.

2.4.1 O Modelo Fundamental de Propagação em Espaço Livre

O ponto de partida para qualquer análise de enlace de rádio é o modelo de propagação em espaço livre, que descreve a atenuação do sinal em um meio idealmente uniforme, homogêneo e isotrópico, onde existe uma linha de visada direta entre transmissor e receptor, livre de quaisquer obstruções, reflexões ou espalhamento (Leite, 2016). Ele estabelece o limite inferior teórico da perda de percurso, a menor atenuação possível para uma dada distância e frequência.

A relação fundamental é descrita pela equação de transmissão de Friis:

$$P_r(d) = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi d)^2 L}, \quad (6)$$

sendo:

- $P_r(d)$ é a potência recebida a uma distância d .
- P_t é a potência transmitida.
- G_t e G_r são os ganhos da antena de transmissão e de recepção, respectivamente.
- λ é o comprimento de onda do sinal.
- d é a distância de separação entre as antenas.
- L é um fator de perda do sistema, não relacionado à propagação (geralmente, $L \geq 1$).

A *Path Loss* (Perda de Percurso, PL), que representa a atenuação decorrente apenas do meio de propagação, é a razão entre a potência transmitida e a recebida. A derivação começa com o conceito de um radiador isotrópico, uma fonte pontual teórica que irradia intensidade de radiação uniformemente em todas as direções. A uma distância d , a potência se distribui sobre a superfície de uma esfera, de área $A = 4\pi d^2$. A densidade de potência (S) a essa distância é:

$$S = \frac{P_t}{4\pi d^2}. \quad (7)$$

A potência recebida (P_r) por uma antena é o produto da densidade de potência pela **área de abertura efetiva** (A_e) da antena:

$$P_r = S \cdot A_e = \left(\frac{P_t}{4\pi d^2} \right) A_e. \quad (8)$$

Para uma antena transmissora com ganho G_t , a densidade de potência na direção do receptor é:

$$S = \frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \quad (9)$$

Existe uma relação fundamental entre o ganho de uma antena e sua área efetiva, dependente do comprimento de onda λ :

$$A_e = \frac{G\lambda^2}{4\pi}. \quad (10)$$

Substituindo 7 e 10 (com o ganho da receptora, G_r) na equação da potência recebida 8, obtemos a Equação de Transmissão de Friis:

$$P_r = \left(\frac{P_t G_t}{4\pi d^2} \right) \left(\frac{G_r \lambda^2}{4\pi} \right) = P_t G_t G_r \left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2. \quad (11)$$

A Perda de Percurso no Espaço Livre (FSPL), denotada por L_{fs} , é definida como a perda que ocorreria entre duas antenas isotrópicas ideais, com $G_t = G_r = 1$. A perda é a razão P_t/P_r . Usando a Equação de Friis com ganhos unitários:

$$L_{fs} = \frac{P_t}{P_r} \Big|_{G_t=G_r=1} = \frac{1}{\left(\frac{\lambda}{4\pi d} \right)^2} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2. \quad (12)$$

Em engenharia, é mais prático usar a escala logarítmica (em decibéis, dB). Aplicando $10 \log_{10}(\cdot)$:

$$L_{fs}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right). \quad (13)$$

A fórmula final é obtida substituindo o comprimento de onda λ pela frequência f (usando $\lambda = c/f$, onde c é a velocidade da luz) e ajustando as unidades para distância d em quilômetros (km) e frequência f em megahertz (MHz).

$$L_{fs}(\text{dB}) = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi df}{c} \right).$$

Usando a propriedade do logaritmo, expandimos a equação para unidades do SI (d em metros, f em hertz):

$$L_{fs}(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d_{[\text{m}]}) + 20 \log_{10}(f_{[\text{Hz}]}) + 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right)$$

As relações são $d_{[\text{m}]} = d_{[\text{km}]} \times 10^3$ e $f_{[\text{Hz}]} = f_{[\text{MHz}]} \times 10^6$. Convertemos cada termo:

$$\begin{aligned} 20 \log_{10}(d_{[\text{m}]}) &= 20 \log_{10}(d_{[\text{km}]} \times 10^3) = 20 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) + 20 \log_{10}(10^3) \\ &= 20 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) + 60 \\ 20 \log_{10}(f_{[\text{Hz}]}) &= 20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]} \times 10^6) = 20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]}) + 20 \log_{10}(10^6) \\ &= 20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]}) + 120. \end{aligned}$$

O termo constante original é:

$$20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) \approx 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{299792458} \right) \approx -147.55.$$

Substituindo os termos convertidos e a constante na Equação (9):

$$\begin{aligned} L_{fs}(\text{dB}) &= (20 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) + 60) + (20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]}) + 120) - 147.55 \\ &= 20 \log_{10}(d_{[\text{km}]}) + 20 \log_{10}(f_{[\text{MHz}]}) + (60 + 120 - 147.55) \\ &= 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.45. \end{aligned}$$

Isso resulta na fórmula final, em que d está em km e f em MHz:

$$L_{fs}(\text{dB}) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32.45. \quad (14)$$

A constante 32.45 é, portanto, um fator de conveniência que decorre da combinação de constantes físicas ($4\pi/c$) e da conversão de unidades.

A equação demonstra duas dependências cruciais: a perda de percurso aumenta tanto com o quadrado da distância quanto com o quadrado da frequência. A validade do modelo de Friis está restrita à região de campo distante da antena transmissora, onde a frente de onda pode ser considerada plana (Almeida, 2014).

Como visto na derivação da Equação de Friis, a potência recebida (P_r) no espaço livre decai com o quadrado da distância (d).

$$P_r \propto \frac{1}{d^2}. \quad (15)$$

Isso significa que a perda de percurso ($PL = P_t/P_r$) é proporcional ao quadrado da distância:

$$PL_{fs}(d) \propto d^2. \quad (16)$$

O expoente 2 é uma característica fundamental da propagação geométrica no espaço livre.

Em ambientes reais, a atenuação é maior devido à reflexão, à difração e à absorção por obstáculos. Para modelar isso, generalizamos a relação de perda de percurso, introduzindo um parâmetro empírico chamado expoente de perda de percurso n (Goldsmith, 2005).

A perda de percurso em um ambiente real é, portanto, proporcional a d^n :

$$PL(d) \propto d^n. \quad (17)$$

Sendo:

- $n = 2$ no espaço livre.
- $n > 2$ para ambientes com obstruções (ex.: n pode variar de 3 a 5 em um ambiente urbano).

Podemos escrever esta proporcionalidade como uma equação usando uma constante k_{perda} :

$$PL(d) = k_{perda} \cdot d^n. \quad (18)$$

O modelo log-distance é empírico. Em vez de calcular a constante k_{perda} , que depende de frequência, dos ganhos de antena e de outros fatores, medimos a perda de percurso $PL(d_0)$ a uma

curta distância de referência conhecida, d_0 . Esta referência d_0 deve estar na região de campo distante da antena. Aplicando nosso modelo para esta distância de referência, temos:

$$PL(d_0) = k \cdot d_0^n. \quad (19)$$

Agora, podemos encontrar o valor de k_{perda} a partir desta medição:

$$k_{perda} = \frac{PL(d_0)}{d_0^n}. \quad (20)$$

Substituindo k_{perda} de volta na Equação 4, obtemos a perda de percurso $PL(d)$ em qualquer distância $d > d_0$:

$$PL(d) = \left(\frac{PL(d_0)}{d_0^n} \right) d^n. \quad (21)$$

Rearranjando os termos, obtemos o modelo log-distance em sua forma linear (não-dB):

$$\frac{PL(d)}{PL(d_0)} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \implies PL(d) = PL(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^n. \quad (22)$$

Esta equação mostra que a perda de percurso aumenta com a n -ésima potência da distância, em relação a uma perda de referência conhecida, $PL(d_0)$. Para obter a fórmula prática, convertamos a Equação (22) para decibéis (dB) aplicando a operação $10 \log_{10}(\cdot)$ em ambos os lados:

$$10 \log_{10}(PL(d)) = 10 \log_{10} \left(PL(d_0) \left(\frac{d}{d_0} \right)^n \right). \quad (23)$$

O lado esquerdo é, por definição, a perda de percurso em dB. Para o lado direito, usamos a propriedade do logaritmo $\log(a \cdot b) = \log(a) + \log(b)$:

$$PL(\text{dB}) = 10 \log_{10}(PL(d_0)) + 10 \log_{10} \left(\left(\frac{d}{d_0} \right)^n \right) \quad (24)$$

O primeiro termo, $10 \log_{10}(PL(d_0))$, é simplesmente a perda de percurso de referência em decibéis, que chamamos de $PL(d_0)$ (com o dB implícito).

Para o segundo termo, usamos a propriedade $\log(x^a) = a \log(x)$:

$$10 \log_{10} \left(\left(\frac{d}{d_0} \right)^n \right) = n \cdot 10 \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) \quad (25)$$

Substituindo tudo de volta na Equação (24), obtemos a forma final do modelo Log-Distance:

$$PL(\text{dB}) = PL(d_0) + 10n \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right). \quad (26)$$

Esta equação é uma generalização direta do modelo de espaço livre e é amplamente utilizada na modelagem de canais sem fio para caracterizar diferentes ambientes, simplesmente ajustando o expoente de perda de percurso n (Molisch, 2011).

Para planejamentos de redes macrocelulares, modelos mais detalhados do que o *Log-Distance* são frequentemente necessários. O modelo Okumura-Hata foi um dos modelos empíricos mais amplamente utilizados e influentes para tecnologias da primeira, segunda e terceira geração. Ele não é derivado de primeiros princípios, mas sim de um conjunto de fórmulas matemáticas desenvolvidas por Masaharu Hata para se ajustarem às extensas curvas de medição de campo publicadas por Yoshihisa Okumura em Tóquio (Rappaport, 2002).

O modelo fornece fórmulas distintas para diferentes tipos de ambiente, começando com uma fórmula-base para áreas urbanas e aplicando fatores de correção para cenários suburbanos e rurais.

Para áreas urbanas utiliza-se a perda de percurso mediana (L_{50}) dada por:

$$L_U(\text{dB}) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) \quad (27)$$

Onde:

- f é a frequência da portadora em MHz.
- h_b é a altura efetiva da antena da estação base em metros.
- d é a distância entre a estação base e o terminal móvel em km.
- $a(h_m)$ é o fator de correção da altura da antena do terminal móvel (h_m), que depende do tamanho da cidade.

Para cidades pequenas e médias:

$$a(h_m) = (1.1 \log_{10}(f) - 0.7)h_m - (1.56 \log_{10}(f) - 0.8) \quad (28)$$

Para cidades grandes, o fator de correção difere e depende da frequência.

3 PRIMEIRA GERAÇÃO (1G)

Este capítulo apresenta uma análise das fundações da telefonia móvel, dissecando as arquiteturas, tecnologias e contextos históricos que definiram a primeira geração (1G) analógica. O objetivo é ir além de uma narrativa cronológica, explorando os princípios físicos, os desafios de engenharia e as decisões regulatórias que moldaram o início da comunicação móvel no país, estabelecendo o alicerce para as redes onipresentes da atualidade.

3.1 A PRIMEIRA GERAÇÃO (1G): O INÍCIO DA MOBILIDADE ANALÓGICA

A era pioneira da telefonia móvel foi caracterizada pela tecnologia analógica, por equipamentos robustos e por um serviço de acesso restrito, posicionando-a como uma prova de conceito tecnológica e um símbolo de status.

Antes da década de 1990, a comunicação móvel no Brasil era extremamente limitada, baseada em sistemas como o *Improved Mobile Telephone Systems* (Sistemas de Telefonia Móvel Aprimorados, IMTS), que possuíam capacidade para pouquíssimos usuários. O setor de telecomunicações era dominado pelo sistema estatal Telebrás, criado em 1972 com a missão de universalizar a telefonia fixa. Contudo, uma severa crise financeira na década de 1980 prejudicou os investimentos, levando à degradação da qualidade dos serviços e à estagnação da expansão da rede, o que gerou uma enorme demanda reprimida por comunicação.

Nesse cenário, a telefonia móvel celular foi oficialmente inaugurada no Brasil em 30 de dezembro de 1990, na cidade do Rio de Janeiro. A operação foi liderada pela Companhia Telefônica do Rio de Janeiro (TELERJ), uma das subsidiárias do sistema Telebrás. A primeira chamada, um marco simbólico, foi realizada do Aterro do Flamengo entre o então Secretário Nacional de Comunicações, Joel Marciano Rauber, e o Ministro da Infraestrutura, Osíris Silva.

Para sua rede de primeira geração, o Brasil adotou o padrão norte-americano *Advanced Mobile Phone System* (Sistema Avançado de Telefonia Móvel, AMPS). Desenvolvido nos laboratórios Bell Labs na década de 1970 e lançado comercialmente nos Estados Unidos em 1983, o AMPS era um sistema puramente analógico, concebido exclusivamente para a transmissão de voz.

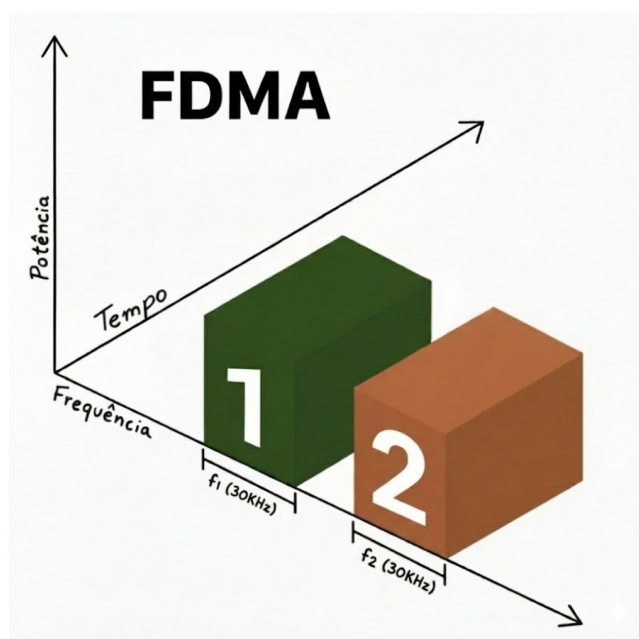
O princípio fundamental de operação do AMPS é a técnica de *Frequency Division Multiple Access* (Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência, FDMA) que utilizava a modulação em frequência. Neste método de acesso ao meio, o espectro de radiofrequência disponível é dividido em múltiplos canais distintos e não sobrepostos. Cada chamada telefônica recebia um par de canais de frequência dedicados e exclusivos durante toda a sua duração: um canal para o *uplink* (transmissão do celular para a estação base) e outro para o *downlink* (transmissão da estação base para o celular). Essa alocação de um par de canais permitia a comunicação *full-duplex*, em que o usuário podia falar e ouvir simultaneamente (Eberspächer et al, 2008).

Para compreender o FDMA em profundidade, é necessário ir além de sua definição teórica e explorar os mecanismos físicos e os componentes de hardware que permitem sua implementação.

3.1.1 FDMA

O conceito central do FDMA é a partição do espectro. A largura de banda total é subdividida em múltiplos subcanais de frequência não sobrepostos. Quando um usuário inicia uma comunicação, um par de canais (um para *uplink* e outro para *downlink*) é atribuído a ele sob demanda, permanecendo dedicado e exclusivo durante toda a chamada. A figura Figura 2 ilustra esta divisão.

Figura 2 – Representação de dois usuários representados por 1 e 2 em cada canal de 30kHz divididos através do FDMA no domínio da frequência.



Fonte: elaborado pelo autor.

A separação dos canais é realizada por filtros passa-faixa (BPFs), que permitem a passagem de sinais em uma faixa de frequência específica enquanto atenuam os demais. No transmissor, o BPF confina a energia ao canal alocado. No receptor, ele seleciona o sinal desejado e rejeita a interferência de canais adjacentes. O desempenho desses filtros, modelado por aproximações como as de Butterworth ou de Chebyshev, é determinante para a eficácia do sistema (Proakis e Selehi, 2007).

No sistema de primeira geração, exemplificado pelo padrão AMPS, a operação ocorria na faixa de 800 MHz utilizando o método de acesso FDMA. O espectro era fragmentado em canais contíguos de 30 kHz, em que a distinção entre usuários não era algorítmica, mas física, dependendo exclusivamente de filtros passa-faixa analógicos.

3.1.2 Padrão AMPS

O AMPS consolidou-se como o padrão predominante da primeira geração nas Américas, operando fundamentalmente sob o método de acesso FDMA na faixa de 800 MHz. Diferentemente dos sistemas digitais subsequentes, a interface aérea do AMPS é estritamente analógica, utilizando a Modulação em Frequência (FM) para o tráfego de voz e FSK binário para a sinalização de controle. A arquitetura do sistema baseia-se na divisão do espectro disponível em dois blocos de frequências para garantir a comunicação *full-duplex*. A faixa de 824 a 849 MHz é destinada ao enlace reverso (*uplink*), enquanto

a faixa de 869 a 894 MHz compõe o enlace direto (*downlink*), mantendo uma separação constante de 45 MHz entre os canais de transmissão e recepção.

A alocação de canais no espectro não ocorre de maneira aleatória, mas segue uma determinação matemática precisa baseada no número do canal atribuído ao usuário. Para um canal específico identificado pelo número inteiro N (onde $1 \leq N \leq 799$ para o espectro original), a frequência central da portadora de uplink, em MHz, é calculada pela função linear:

$$f_{uplink}(N) = 825,03 + 0,03 \cdot (N - 1) \quad (1)$$

Consequentemente, a frequência correspondente de downlink é obtida adicionando-se a separação *duplex* padrão do sistema à frequência base, resultando em $f_{downlink}(N) = f_{uplink}(N) + 45$. O fator multiplicativo de 0,03 na equação acima representa a largura de banda de 30 kHz destinada a cada canal, uma escolha de projeto que reflete as restrições físicas da modulação analógica.

A definição dessa largura de banda de 30 kHz é justificada analiticamente pela Regra de Carson, que estima a banda necessária para preservar a integridade de um sinal modulado em frequência. Considerando que o padrão AMPS define um desvio de frequência de pico $\Delta f = 12$ kHz e que a frequência máxima do sinal de voz humano transmitido é limitada a $f_m \approx 3$ kHz, a largura de banda total de transmissão B_T é dada por:

$$B_T \approx 2(\Delta f + f_m) = 2(12 \text{ kHz} + 3 \text{ kHz}) = 30 \text{ kHz} \quad (2)$$

Este resultado demonstra que a canalização do sistema 1G foi dimensionada no limite físico necessário para conter a energia espectral da voz humana modulada, exigindo, portanto, filtros passa-faixa de alta seletividade para mitigar a interferência de canal adjacente.

3.1.3 Modulação em frequência

Em continuidade à definição da largura de banda do canal, é fundamental categorizar o tipo de modulação empregada no interior dessa banda de 30 kHz. O sistema AMPS adota a Modulação em Frequência (FM), uma escolha arquitetural pautada na robustez desse formato contra variações de amplitude do sinal, conhecidas como desvanecimento rápido (*fast fading*), comuns em ambientes móveis. Para determinar se a modulação opera em regime de faixa estreita (*Narrowband Frequency Modulation*, NBFM) ou faixa larga (*Wideband Frequency Modulation*, WBFM), deve-se calcular o índice de modulação β , que expressa a relação entre o desvio de frequência máximo permitido e a frequência máxima do sinal de informação (voz).

Matematicamente, o índice de modulação é definido pela razão:

$$\beta = \frac{\Delta f}{f_m} \quad (3)$$

Substituindo os parâmetros padronizados do sistema AMPS, onde o desvio de pico Δf é de 12 kHz e a frequência máxima de áudio f_m é de 3 kHz, obtém-se:

$$\beta_{AMPS} = \frac{12 \text{ kHz}}{3 \text{ kHz}} = 4 \quad (4)$$

Na teoria de comunicações analógicas, um índice de modulação $\beta > 1$ classifica o sistema como FM de Faixa Larga (*Wideband FM*). Portanto, embora o canal de 30 kHz pareça estreito em comparação aos padrões de transmissão de rádio comercial (que utilizam 200 kHz), o AMPS opera tecnicamente como um sistema de banda larga em relação ao sinal de voz que transporta. Essa característica é crucial, pois, conforme demonstrado na teoria da informação, o uso de um β elevado permite trocar largura de banda por uma melhoria na relação sinal-ruído (SNR) demodulada, garantindo uma qualidade de voz aceitável mesmo nas bordas da célula, onde o sinal recebido é mais fraco.

3.1.4 Infraestrutura

A infraestrutura física consistia em ERBs conectadas à rede de telefonia pública (PSTN). Os primeiros aparelhos celulares eram grandes e pesados, como o icônico Motorola Dynatac 8000X, que pesava quase 1 kg e oferecia apenas 30 minutos de conversação.

O sistema AMPS no Brasil operava na faixa de 800 MHz, cujas frequências apresentam características de propagação vantajosas, como maior alcance e melhor penetração por obstáculos. O planejamento da cobertura da rede utilizava modelos de predição de perda de percurso, como o modelo empírico Okumura-Hata. A fórmula para ambientes urbanos é:

$$L_U(dB) = 69.55 + 26.16 \log_{10}(f) - 13.82 \log_{10}(h_b) - a(h_m) + (44.9 - 6.55 \log_{10}(h_b)) \log_{10}(d) \quad (5)$$

onde f é a frequência e h_b e h_m são as alturas das antenas da base e do móvel, respectivamente, d é a distância do enlace e $a(h_m)$ é um fator (Rappaport, 2002).

4 SEGUNDA GERAÇÃO (2G)

Este capítulo contém a análise do salto tecnológico mais significativo na história da telefonia móvel, a migração da rede analógica (1G) para a rede digital de segunda geração (2G). Esta transição não foi apenas uma melhoria de serviço, ela representou uma revolução fundamental na arquitetura de rede, nas técnicas de processamento de sinal e na capacidade de oferta de novos serviços.

4.1 CÓDIGOS CONVOLUCIONAIS

Os códigos convolucionais pertencem à classe de códigos de correção de erro conhecida como *Forward Error Correction* (FEC). Os códigos convolucionais operam sobre um fluxo contínuo de bits, onde a principal característica que os distingue é a presença de memória; a saída do codificador em um determinado instante depende não apenas do bit de entrada atual, mas também de uma sequência de m bits de entrada anteriores armazenados em registradores de deslocamento (Proakis e Selehi, 2007).

A estrutura de um codificador convolucional é geralmente descrita por três parâmetros inteiros (n, k, m) . Onde n é o número de bits de saída, k é o número de bits de entrada e m representa a memória do codificador. A eficiência do código, ou taxa de codificação, é definida pela razão $R = k/n$, indicando a proporção de informação útil em relação ao total transmitido. Uma medida fundamental para o desempenho desses códigos é o comprimento de restrição, denotado por $K = m + 1$, que define quantos bits de dados influenciam a geração de um símbolo de saída, impactando diretamente a capacidade de correção de erros do sistema.

Para a decodificação, o método mais amplamente utilizado é o Algoritmo de Viterbi, proposto por Andrew Viterbi em 1967. Este algoritmo baseia-se no princípio da máxima verossimilhança, analisando a sequência recebida por meio de um diagrama de treliça. O algoritmo calcula a "distância" entre o sinal recebido e todos os caminhos possíveis na treliça, selecionando o caminho com a menor métrica de erro acumulada como a sequência transmitida mais provável (Viterbi, 1967). Historicamente, os códigos convolucionais desempenharam um papel crucial no desenvolvimento das telecomunicações digitais.

4.2 A SEGUNDA GERAÇÃO (2G): O INÍCIO DA DIGITALIZAÇÃO

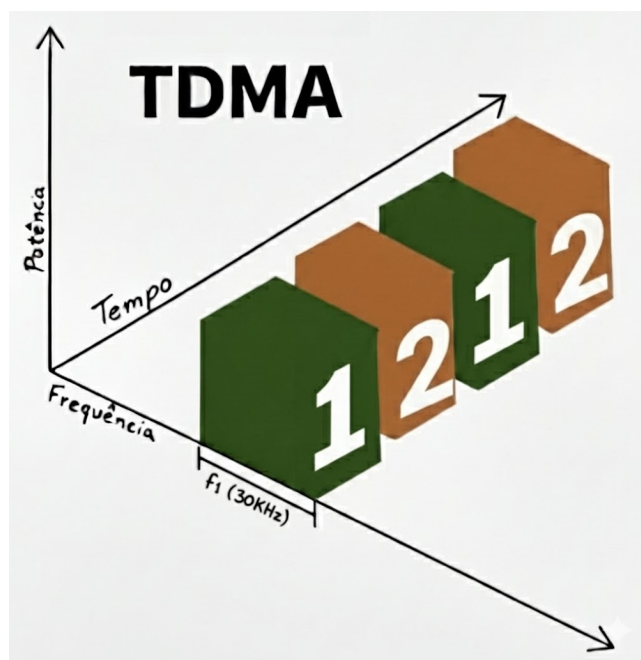
A transição para a segunda geração (2G) de sistemas móveis, no final da década de 1980 e no início da década de 1990, foi marcada por uma mudança de paradigma fundamental, a digitalização. A conversão de sinais de voz analógicos em fluxos de bits digitais abriu um leque de possibilidades para superar as deficiências da tecnologia 1G. A digitalização permitiu a aplicação de algoritmos sofisticados de processamento de sinais, codificação de voz para compressão de dados, codificação de canal para correção de erros por meio dos códigos convolucionais e criptografia para segurança. Foi nesse contexto que o Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (TDMA, do inglês *Time Division Multiple Access*) emergiu como uma das tecnologias de acesso dominantes, servindo de base para padrões de enorme sucesso como o *Global System for Mobile Communications* (GSM) na Europa,

o IS-136 na América do Norte e o *Personal Digital Cellular* (PDC) no Japão (Dahlman, Parkvall e Sköld, 2016).

4.2.1 Time Division Multiple Access

O TDMA é um método de acesso ao canal utilizado em redes de meio compartilhado que permite que vários usuários operem na mesma frequência portadora. O princípio fundamental reside na divisão do sinal em intervalos de tempo discretos, conhecidos como time slots. Os usuários transmitem em rápida sucessão, de forma cíclica, cada um utilizando exclusivamente o seu *slot* de tempo alocado. Esta abordagem digital foi crucial para a segunda geração (2G) de telefonia celular, oferecendo um aumento de capacidade de atendimento de usuários que podia ser até três vezes superior à tecnologia analógica anterior (1G, como o AMPS), mediante a conversão de sinais analógicos de voz em dados digitais. A Figura 3 ilustra o conceito do TDMA.

Figura 3 – Representação de dois usuários definidos com 1 e 2 em um canal de 30kHz transmitidos em intervalos diferentes no tempo através do TDMA.



Fonte: elaborado pelo autor.

A estrutura fundamental de um sistema TDMA é o quadro (*frame*). Um quadro TDMA é uma unidade de tempo fixa e recorrente, dividida em um número predeterminado de time slots. Por exemplo, em um sistema com N usuários, o quadro é dividido em K time slots. O usuário 1 transmite no time slot 1, o usuário 2 no time slot 2, e assim por diante, até o usuário N no time slot K . Após o término do time slot, o ciclo se repete, e o usuário 1 transmite novamente no time slot 1 do quadro seguinte. Cada usuário, portanto, tem acesso periódico ao canal, transmitindo seus dados em rajadas que se encaixam exatamente nos slots alocados. Essa natureza de transmissão em rajadas é uma característica definidora do TDMA e o diferencia fundamentalmente do FDMA, em que a transmissão é contínua no tempo, mas separada na frequência.

Para formalizar a estrutura de um quadro TDMA, consideremos um sistema que suporta N usuários

em um único canal de frequência. Seja T_f a duração total do quadro. Este quadro é dividido em N *time slots*, cada um com uma duração $T_s = \frac{T_f}{N}$. Durante seu *time slot* alocado, um usuário transmite uma rajada de dados, que consiste em bits de informação, bem como bits de sobrecarga (*overhead*) necessários para controle e sincronização.

Um dos componentes mais críticos do *overhead* em um sistema TDMA é o período de guarda (*guard period* ou *guard time*). Este é um pequeno intervalo de tempo inserido no final de cada *time slot*, durante o qual nenhum usuário transmite. A função do período de guarda é multifacetada e essencial para a operação robusta do sistema. Primeiramente, ele acomoda as incertezas no tempo de chegada das rajadas dos diferentes usuários na estação base. Como os usuários móveis estão localizados a diferentes distâncias da estação base, seus sinais sofrem atrasos de propagação distintos. Sem um período de guarda, a rajada de um usuário mais distante poderia chegar atrasada e se sobrepor ao início da rajada do usuário seguinte, causando interferência interusuário. Em segundo lugar, o período de guarda ajuda a mitigar os efeitos do espalhamento de atraso por multicaminho, onde reflexões do sinal chegam ao receptor com atrasos adicionais, podendo causar interferência intersímbolo (ISI) entre rajadas adjacentes. A inclusão desses períodos de guarda, no entanto, representa um custo em termos de eficiência, pois é tempo em que o canal não é utilizado para a transmissão de dados úteis.

A performance de um sistema de comunicação pode ser quantificada por meio de várias métricas de eficiência. Seja R_{ch} a taxa de bits bruta total do canal físico (em bits por segundo). Em um sistema TDMA com N *time slots* por quadro, essa taxa de bits é compartilhada entre os N usuários. A taxa de bits bruta alocada a um único usuário, R_u , é dada por:

$$R_u = \frac{R_{ch}}{N}$$

Esta equação pressupõe uma alocação igualitária de recursos.

A eficiência do quadro, η_{frame} , mede a fração do tempo do quadro efetivamente utilizado para a transmissão de bits (informação e *overhead* da rajada), em oposição ao tempo perdido nos períodos de guarda. Se cada um dos N *time slots* possui um período de guarda de duração T_g , a eficiência do quadro é:

$$\eta_{frame} = \frac{T_f - N \cdot T_g}{T_f} = 1 - \frac{N \cdot T_g}{T_f}$$

Esta métrica destaca o *trade-off* inerente ao *design* do sistema: períodos de guarda mais longos aumentam a robustez contra atrasos de propagação, mas diminuem a eficiência geral do sistema.

A eficiência espectral, $\eta_{spectral}$, é talvez a métrica mais importante para avaliar sistemas de acesso múltiplo, pois relaciona a taxa de dados transmitida à largura de banda do espectro consumida. É tipicamente expressa em unidades de bits por segundo por hertz (bps/Hz). Para um sistema TDMA operando em um canal com largura de banda B_c , a eficiência espectral é:

$$\eta_{spectral} = \frac{N \cdot R_{u,efetiva}}{B_c}$$

onde $R_{u,efetiva}$ é a taxa de bits de informação útil por usuário (descontando todo o *overhead*, incluindo bits de sincronização, codificação de canal, etc.).

A estação base mede continuamente o tempo de chegada das rajadas de cada estação móvel. Se uma rajada chega atrasada, a estação base envia um comando à estação móvel, instruindo-a a transmitir suas futuras rajadas um pouco mais cedo. Se a rajada chegar adiantada, a estação móvel é instruída a adiar sua transmissão. Este processo de ajuste dinâmico garante que, da perspectiva da estação base, todas as rajadas cheguem como se tivessem sido transmitidas da mesma distância, alinhadas perfeitamente com a estrutura de quadros do sistema.

A duração do período de guarda está intrinsecamente ligada ao raio máximo que a célula pode suportar. Esta relação não é apenas uma correlação, mas uma limitação física direta imposta pelo *design* do sistema. O período de guarda deve ser longo o suficiente para acomodar a diferença de tempo de propagação de ida e volta entre o usuário mais próximo e o mais distante da célula. A incerteza máxima no tempo de chegada de uma rajada à estação base corresponde ao tempo que o sinal leva para viajar da estação base até o usuário na borda da célula e retornar ($2\tau_{max}$). Portanto, a duração do período de guarda, T_g , deve ser maior que este valor:

$$T_g > 2\tau_{max}$$

O atraso de propagação máximo, τ_{max} , está relacionado ao raio máximo da célula, R_{max} , pela velocidade da luz, c : $\tau_{max} = R_{max}/c$. Substituindo na inequação anterior, obtemos uma relação direta para o raio máximo da célula:

$$R_{max} < \frac{c \cdot T_g}{2}$$

Esta equação revela um *trade-off* de *design* fundamental: para suportar células maiores (*macrocélulas*), um sistema TDMA requer períodos de guarda mais longos, o que, por sua vez, reduz a eficiência do quadro (η_{frame}). No caso do GSM, a duração do período de guarda foi projetada para permitir um raio celular teórico máximo de aproximadamente 35 km, um valor adequado para a cobertura de áreas rurais e suburbanas.

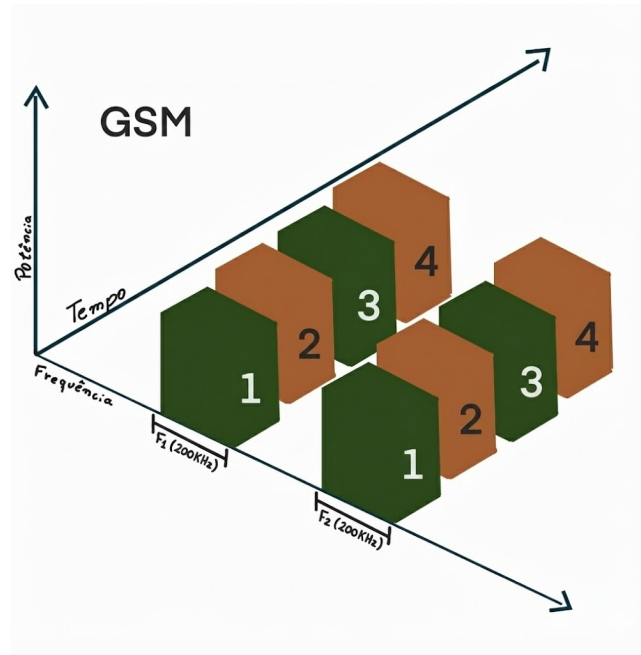
O GSM utiliza uma estratégia de acesso múltiplo híbrida:

1. **Primeira Etapa (FDMA):** O espectro é dividido em múltiplos canais de frequência de 200 kHz (portadoras de rádio).
2. **Segunda Etapa (TDMA):** Cada canal de 200 kHz é subdividido em 8 *time slots* no domínio do tempo, permitindo 8 usuários simultâneos por portadora.

Esta arquitetura híbrida resultou em maior capacidade de usuários em comparação com os sistemas 1G (FDMA puro), mantendo a complexidade do *hardware* móvel baixa.

Com esse salto tecnológico, permitiu-se a aplicação de modulações que geram maior robustez e segurança aos usuários. A modulação utilizada pelo GSM é o *Gaussian Minimum Shift Keying* (Deslocamento Mínimo com Filtragem Gaussiana, GMSK). Essa modulação pertence à classe de modulações conhecida como Modulação de Fase Contínua (CPM, do inglês *Continuous Phase Modulation*). A característica definidora das modulações CPM é que a fase da portadora varia continuamente, sem saltos abruptos, o que ajuda a limitar a largura de banda do sinal transmitido. A Figura 4

Figura 4 – Representação de quatro usuários definidos com 1,2,3 e 4 em cada canal de 200kHz no domínio da frequência transmitidos em intervalos diferentes no domínio do tempo através do GSM.



Fonte: elaborado pelo autor.

A inovação do GMSK é a introdução de um filtro gaussiano passa-baixas antes do modulador de frequência. Em um sinal *Non-Return-to-Zero* (NRZ, Não-Retorno-a-Zero), cada bit é representado por um nível de tensão constante durante todo o período do bit, sendo 1 o nível alto e 0 o nível baixo. Esse fluxo de dados digitais é primeiro passado por este filtro. A filtragem gaussiana suaviza as transições retangulares abruptas do sinal de dados, transformando-as em pulsos suaves e arredondados. Quando esses pulsos suaves modulam a frequência da portadora, as transições de fase resultantes são ainda mais graduais do que no MSK, o que tem o efeito desejável de suprimir significativamente os lóbulos laterais do espectro do sinal, tornando-o mais compacto.

Matematicamente, a fase instantânea $\phi(t, \alpha)$ de um sinal GMSK pode ser representada como:

$$\phi(t, \alpha) = \frac{1}{2} \pi \sum_{i=-\infty}^n \alpha_i q(t - iT),$$

onde:

- $\alpha_i \in \{-1, 1\}$ é a sequência de bits de dados;
- T é a duração de um bit;
- $q(t) = \int_{-\infty}^t g(\tau) d\tau$ é a resposta de fase, que é a integral do pulso de frequência $g(t)$;
- $g(t)$ é a resposta ao impulso do filtro, que, no caso do GMSK, é a resposta de um pulso retangular de duração T convoluído com a função de resposta ao impulso do filtro gaussiano.

O comportamento do filtro gaussiano e, consequentemente, as características do sinal GMSK, são controlados por um único parâmetro de *design* adimensional: o produto banda-tempo, ou BT . Este

parâmetro é o produto da largura de banda 3dB do filtro gaussiano, B , e da duração do símbolo (ou bit), T .

O valor de BT governa um *trade-off* fundamental no design do sistema, em que um valor de BT pequeno, como 0,2, corresponde a um filtro gaussiano com banda passante estreita. Um valor de BT grande, como 0,5 ou maior, corresponde a um filtro com banda passante ampla, que apresenta um efeito de filtragem mais fraco. O espectro do sinal resultante é mais amplo, o que, por sua vez, gera menor eficiência espectral.

Para o padrão GSM, foi escolhido o valor $BT = 0,3$. Este valor representa um compromisso cuidadosamente otimizado entre obter um espectro de sinal suficientemente estreito para caber nos canais de 200 kHz com mínima interferência adjacente e manter a *ISI* em um nível que pudesse ser efetivamente combatido pelos equalizadores práticos da época.

4.3 CAPACIDADE

Com a digitalização da interface aérea, a modelagem da largura de banda necessária altera-se em relação aos sistemas analógicos. A largura de banda de um canal digital, B_{ch} , passa a ser governada pela taxa de transmissão de símbolos e pelo design do filtro formatador de pulso, modelada pela fórmula:

$$B_{ch} = \frac{(1 + \beta)R_b}{\log_2 M} \quad (1)$$

onde R_b é a taxa de bits bruta, M é o número de níveis da modulação (simbologia) e β é o fator de *roll-off* do filtro (no caso do GSM, relacionado ao produto BT do filtro Gaussiano). O fator de *roll-off* indica em que medida a largura de banda do sinal filtrado excede a largura de banda mínima teórica (Nyquist) necessária para transmissão livre de Interferência Intersimbólica (ISI) (Nyquist, 1928).

Considerando o aspecto FDMA do sistema híbrido (a divisão em portadoras), a largura de banda total B_T para N canais de frequência, incluindo as bandas de guarda B_g necessárias para separá-los fisicamente, é:

$$B_T = N \cdot B_{ch} + (N - 1) \cdot B_g \quad (2)$$

Dessa relação, deduz-se que o número máximo de canais de frequência, N , que uma alocação de espectro B_T pode acomodar é limitado por:

$$N < \frac{B_T + B_g}{B_{ch} + B_g} \quad (3)$$

Esta formulação evidencia que, mesmo em sistemas digitais, as bandas de guarda (B_g) continuam sendo um fator de redução da eficiência espectral global no domínio da frequência.

Fundamentalmente, a capacidade máxima teórica de transmissão de dados nesses canais é definida pelo Teorema de Shannon-Hartley. Para um canal sujeito a ruído Gaussiano Branco Aditivo (AWGN), a capacidade C (em bits por segundo) é:

$$C = B_{ch} \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N_0} \right) \quad (4)$$

Onde B_{ch} é a largura de banda do canal e S/N_0 é a relação sinal-ruído. No contexto do TDMA/FDMA, essa capacidade total do sistema é a soma das capacidades dos canais individuais. Contudo, diferentemente do 1G, onde a capacidade era fixa por canal de voz, no domínio digital a capacidade C representa um "tubo" de dados que pode ser subdividido em *time slots* (como feito no GSM), permitindo flexibilidade na alocação de recursos para múltiplos usuários ou serviços de dados.

5 TERCEIRA GERAÇÃO (3G)

Reconhecendo as limitações do 2G, a União Internacional de Telecomunicações (UIT) iniciou um esforço global de padronização no final da década de 1980 e no início da década de 1990, conhecido como *International Mobile Telecommunications-2000* (IMT-2000). O objetivo era definir uma família de padrões para sistemas 3G que pudesse oferecer um salto na capacidade e nos serviços, facilitando o *roaming* global e promovendo economia de escala. *Roaming* é o serviço que permite que o celular continue funcionando fora da área da operadora, por exemplo, quando alguém viaja para outro país e ainda mantém cobertura de sinal.

Os objetivos do IMT-2000 eram ambiciosos e centrados em dados, marcando uma mudança decisiva em relação à filosofia do 2G. As principais metas incluíam altas taxas de dados, suporte a novos serviços, eficiência espectral, redução de custos e uma arquitetura baseada em pacotes. Para atingir esses objetivos, a terceira geração introduziu os Turbos Códigos. Esta classe de códigos representou um marco na engenharia de telecomunicações, permitindo pela primeira vez que sistemas práticos operassem muito próximos do limite teórico de capacidade de canal estabelecido por Claude Shannon (Berrou, Glavieux e Thitimajshima, 1993).

A transição do 2G para o 3G não foi apenas uma atualização tecnológica, mas também uma mudança filosófica na concepção da rede móvel. As redes 2G foram projetadas para resolver o problema da comunicação de voz móvel, com os dados como capacidade secundária e limitada. Em contrapartida, as redes 3G foram concebidas desde o início para resolver o problema da internet móvel, tratando a voz simplesmente como mais uma aplicação a ser transportada sobre uma infraestrutura de dados robusta. Essa mudança de foco é evidente em todos os aspectos do projeto 3G.

No cenário brasileiro, a implementação das diretrizes do IMT-2000 ocorreu com um descompasso temporal significativo em relação aos mercados pioneiros, como Japão e Europa. Enquanto as primeiras redes 3G comerciais entravam em operação globalmente no início dos anos 2000, a introdução efetiva da terceira geração no Brasil consolidou-se apenas no final daquela década. Esse processo foi marcado pelo leilão de frequências realizado pela Agência Nacional de Telecomunicações em dezembro de 2007, que licitou faixas do espectro de 1.9 e 2.1, reservadas especificamente para a expansão da capacidade e cobertura de dados móveis.

A chegada do 3G ao Brasil representou também um momento de convergência tecnológica. Durante a era 2G, o mercado nacional encontrava-se fragmentado entre as tecnologias TDMA (em processo de descontinuação) e GSM. Com a adoção do 3G, houve uma decisão estratégica maciça das operadoras brasileiras em seguir a trilha de evolução da família GSM, adotando o padrão *Universal Mobile Telecommunications System / Wideband Code Division Multiple Access* (Sistema Universal de Telecomunicações Móveis / Acesso Múltiplo por Divisão de Código de Banda Larga, UMTS/WCDMA).

Essa escolha foi determinante para alinhar o Brasil ao ecossistema global dominante, facilitando o *roaming* internacional e o acesso a uma maior variedade de dispositivos móveis. O padrão WCDMA estabeleceu-se como o padrão hegemônico no país, servindo como a infraestrutura base para a posterior implementação do *High Speed Packet Access* (Acesso de Pacote de Alta Velocidade, HSPA), que

finalmente popularizou o acesso à internet móvel em território nacional.

O UMTS não foi apenas uma evolução, mas uma reestruturação que introduziu novos elementos de rede, interfaces abertas e uma distribuição de inteligência mais adequada para o gerenciamento de uma interface de rádio nova e complexa. Esse conceito será abordado mais à frente neste trabalho.

5.1 UMTS

A arquitetura geral do UMTS é composta por três domínios principais: o UE, que é o terminal do usuário; a *Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), que gerencia todos os aspectos da interface de rádio; e o *Core Network* (CN), que lida com o chaveamento, o roteamento e o gerenciamento de serviços. Uma decisão estratégica crucial foi basear o CN na evolução do núcleo GSM/GPRS. Isso permitiu que as operadoras aproveitassem parte da infraestrutura existente, facilitando a migração.

A UTRAN é estruturada hierarquicamente e composta por dois elementos principais: o *Node B* e o *Radio Network Controller* (RNC). Essa divisão espelha a separação entre a BTS e a BSC no GSM, mas com funções muito mais avançadas.

O Node B é o equivalente à BTS. Suas funções principais são a transmissão e a recepção RF, a modulação, a demodulação, a codificação do canal físico e o controle de potência.

O RNC é o cérebro da UTRAN, equivalente à BSC, mas com escopo muito maior. Um único RNC controla vários Node Bs.

5.2 TURBO CÓDIGOS

Tecnicamente, os Turbo Códigos utilizados no 3G são definidos como Códigos Convolucionais Concatenados Paralelamente (PCCC). A arquitetura do codificador baseia-se em três componentes principais: dois codificadores convolucionais idênticos, do tipo Sistemático Recursivo (RSC), um entrelaçador interno. O funcionamento do codificador ocorre quando o fluxo de dados original é enviado diretamente para o primeiro codificador RSC e, simultaneamente, transmitido. Uma cópia desse fluxo passa pelo entrelaçador, que reordena os bits de maneira pseudoaleatória antes de entrar no segundo codificador RSC. O resultado final transmitido é composto pelos bits de informação original somados aos bits de paridade gerados por ambos os codificadores (Vucetic e YUAN, 2000).

A função do entrelaçador é crucial; ele garante que os dois codificadores operem sobre versões "descorrelacionadas" da mesma informação. Se o canal sofrer uma rajada de erros que corrompa uma sequência de bits vizinhos, o processo de desentrelaçamento no receptor espalhará esses erros, transformando-os em erros isolados, que são matematicamente mais fáceis de corrigir.

No lado do receptor, a inovação reside no processo de decodificação iterativa. Ao contrário dos decodificadores convencionais que tomam uma decisão entre 0 ou 1, o Turbo Decodificador utiliza decisões "suaves", ou seja, quando o sinal chega no decodificador, o grau de certeza é maior. O sistema emprega dois decodificadores SISO (*Soft-Input Soft-Output*) conectados em série. O primeiro decodificador analisa os dados e gera uma estimativa de probabilidade para cada bit, expressa matematicamente como uma Razão de Verossimilhança Logarítmica (LLR - *Log-Likelihood Ratio*). Essa estimativa, chamada de "informação extrínseca", é passada para o segundo decodificador, que

a utiliza como informação a priori para refinar sua própria análise. Esse ciclo se repete por várias iterações, refinando progressivamente a confiabilidade dos dados até convergir para a mensagem correta (Hagenauer, Offer e Papke, 1996).

5.2.1 CDMA

O *Code Division Multiple Access* (Acesso Múltiplo por Divisão de Código, CDMA) representa uma mudança de paradigma em relação às tecnologias anteriores (FDMA e TDMA). Enquanto o 1G e o 2G separavam usuários por frequência ou tempo, o CDMA permite que múltiplos usuários transmitam simultaneamente, ocupando toda a largura de banda disponível na mesma frequência portadora. A separação dos sinais não ocorre no domínio físico, mas no domínio lógico, por meio da atribuição de códigos matemáticos únicos a cada usuário.

A base tecnológica do CDMA é o Espalhamento Espectral de Sequência Direta (*Direct Sequence Spread Spectrum* - DSSS). Neste processo, o sinal de informação de banda estreita (voz ou dados) é multiplicado por um sinal de código de taxa muito elevada, conhecido como sequência de espalhamento ou *chipping sequence*. O resultado é um sinal que ocupa uma largura de banda muito maior do que a necessária para transmitir a informação original.

Matematicamente, se o sinal de informação possui uma taxa de bits R_b e o código de espalhamento possui uma taxa de *chips* R_c (onde $R_c \gg R_b$), o sistema obtém um Ganho de Processamento (G_p), definido por:

$$G_p = \frac{B_{\text{espalhada}}}{B_{\text{sinal}}} \approx \frac{R_c}{R_b} \quad (1)$$

O efeito desse espalhamento é duplo: primeiramente, dilui a densidade espectral de potência do sinal, fazendo com que ele se assemelhe a um ruído branco de fundo para qualquer receptor que não possua o código correto de desespalhamento. Em segundo lugar, confere ao sistema uma robustez inerente contra interferências de banda estreita e dificulta a interceptação não autorizada. No receptor, a aplicação do mesmo código, perfeitamente sincronizado, "recolhe" o sinal desejado de volta à sua banda original, enquanto os sinais de outros usuários (que utilizam códigos ortogonais ou pseudoaleatórios diferentes) permanecem espalhados como ruído de fundo.

5.2.2 WCDMA

O coração da tecnologia 3G UMTS é sua interface de rádio, o *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA). Diferentemente do TDMA/FDMA do 2G, o WCDMA permite que todos os usuários transmitam simultaneamente na mesma banda larga de 5 MHz. O acesso dos usuários ao meio é feito através de códigos únicos, por meio do *Direct-Sequence Spread Spectrum* (DSSS). Esta seção detalha os fundamentos do DSSS, o sistema de dupla codificação do UMTS e a modulação utilizada na transmissão de sinais.

A tecnologia DSSS é a base do WCDMA. Ela opera por meio de dois processos complementares: espalhamento no transmissor e desespalhamento no receptor.

O processo de espalhamento ocorre no transmissor, onde o sinal de banda estreita de um usuário é multiplicado por um sinal de espalhamento de altíssima taxa, conhecido como código de ruído pseudoaleatório. Cada pulso neste código é chamado de "*chip*". A taxa de *chips* é 3.84Mcps no WCDMA que é muito maior que a taxa de bits do sinal de informação original. O resultado dessa multiplicação é um sinal de banda larga, cuja potência é distribuída por toda a largura de banda de 5MHz. Já o processo de desespalhamento ocorre no receptor, onde o sinal de banda larga é recebido e multiplicado pela mesma sequência de espalhamento, sincronizada com o transmissor. Este processo tem um duplo efeito notável. Ele colapsa a energia do sinal desejado de volta à sua banda estreita original, concentrando sua potência, enquanto simultaneamente pega qualquer interferência de banda estreita que tenha sido adicionada no canal e a espalha pela largura de banda de 5MHz, fazendo com que ela se assemelhe a ruído de baixo nível.

A eficácia com que um sistema DSSS pode recuperar um sinal em meio à interferência é quantificada pelo ganho de processamento e pode ser calculada pela equação:

$$G_p = \frac{\text{Taxa de Chips}}{\text{Taxa de Bits}} = \frac{W}{R}$$

em que W é a largura de banda do canal e R é a taxa de bits do usuário. No WCDMA, como a taxa de bits pode variar dependendo do serviço, o ganho de processamento (G_p) também é variável. Um serviço de baixa taxa de dados (como voz) terá um ganho de processamento elevado, tornando-o muito robusto à interferência, enquanto um serviço de alta taxa de dados terá um ganho de processamento menor.

Para gerenciar múltiplos usuários e múltiplos canais de forma eficiente dentro de uma célula e para distinguir entre células adjacentes, o WCDMA emprega um sofisticado sistema de codificação de duas camadas.

O primeiro nível de codificação utiliza os Códigos de Fator de Espalhamento Variável Ortogonal (*Orthogonal Variable Spreading Factor* - OVSF). O propósito fundamental desses códigos é separar os diferentes canais físicos transmitidos a partir do mesmo setor de um *Node B*.

A estrutura dos códigos OVSF é gerada a partir de uma árvore de códigos hierárquica. Esta árvore possui uma propriedade matemática crucial: quaisquer dois códigos retirados da árvore são perfeitamente ortogonais entre si, desde que um código não seja um ancestral direto do outro. A ortogonalidade significa que a correlação cruzada entre dois códigos é zero. Na prática, isso implica que, em um ambiente ideal sem multipercurso, o receptor de um usuário pode usar seu código OVSF para desespalhar perfeitamente o sinal desejado, enquanto os sinais de outros usuários na mesma célula, que usam códigos OVSF diferentes, são completamente rejeitados.

O fator de espalhamento é essencial para suportar múltiplos serviços com diferentes taxas de dados. Códigos em níveis mais altos da árvore são mais curtos e usados para serviços de alta taxa de dados. Códigos em níveis mais baixos são mais longos e usados para serviços de baixa taxa de dados. A alocação de um código em um determinado nível da árvore bloqueia todos os códigos em seu ramo descendente e em seu ramo ascendente, o que exige um gerenciamento cuidadoso por parte do RNC.

A modulação utilizada para atender às necessidades do WCDMA é a *Quadrature Phase Shift Keying* (QPSK, Chaveamento de Deslocamento de Fase em Quadratura).

Um sinal QPSK pode ser matematicamente descrito como a soma de duas ondas senoidais em quadratura, uma cossenoide (componente em fase, I) e uma senoide (componente em quadratura, Q). A expressão geral do sinal QPSK é:

$$s(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} \cos(2\pi f_c t + \phi_i(t)) \quad (2)$$

Onde:

- E_s é a energia por símbolo.
- T_s é a duração do símbolo.
- f_c é a frequência da portadora.
- $\phi_i(t)$ é a fase da portadora, que assume um dos quatro valores possíveis dependendo do dabit (par de bits binários) a ser transmitido.

De forma mais explícita, utilizando as componentes I e Q , o sinal pode ser expresso como:

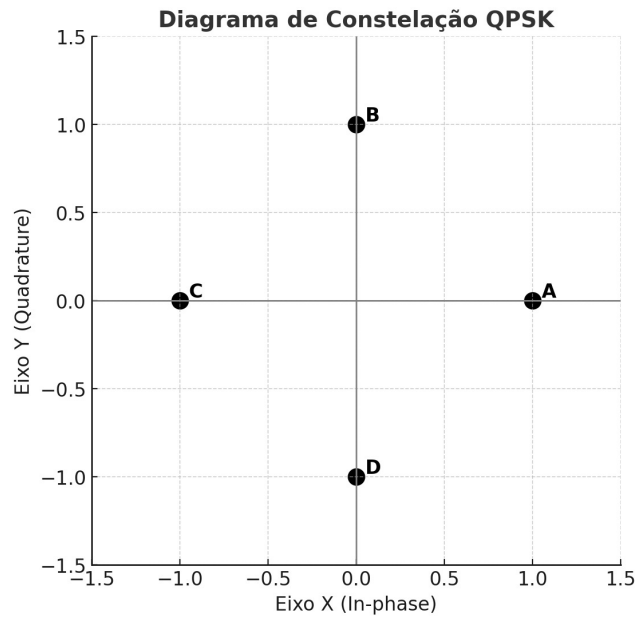
$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f_c t) - Q(t) \sin(2\pi f_c t) \quad (3)$$

Aqui, $I(t)$ e $Q(t)$ são as amplitudes das componentes em fase e em quadratura, respectivamente, e determinam o ponto específico na constelação de sinais.

O diagrama de constelação é uma representação gráfica dos símbolos de uma modulação digital no plano complexo. Para a QPSK, o diagrama de constelação consiste em quatro pontos equidistantes da origem e espaçados angularmente por 90° . Cada ponto representa um símbolo único, correspondente a um *bit* específico.

O eixo horizontal do diagrama representa a componente em fase (I), enquanto o eixo vertical representa a componente em quadratura (Q). A distância de cada ponto à origem está relacionada à amplitude do sinal, que é constante na modulação QPSK. A fase de cada símbolo é o ângulo formado com o eixo I . A Figura 5 ilustra um diagrama de constelação QPSK.

Figura 5 – Diagrama de constelação para modulação QPSK, onde o eixo horizontal representa a componente em fase e o eixo vertical a componente em quadratura onde cada ponto representa um par de bit.



Fonte: elaborado pelo autor.

O processo de modulação QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) inicia-se com o fluxo de bits de entrada sendo dividido em dois fluxos paralelos: um para a componente I (em fase) e outro para a componente Q (em quadratura). Cada um desses fluxos modula uma portadora. A portadora do ramo I está em fase (cosseno) e a do ramo Q está em quadratura (seno). Os dois sinais resultantes são, então, somados para formar o sinal QPSK final.

Esta técnica é um pilar das comunicações digitais, amplamente utilizada em padrões como 4G e 5G. A sua vantagem fundamental é a eficiência espectral: é capaz de transmitir dois bits por símbolo. Em contraste, a modulação BPSK (Binary Phase Shift Keying) transmite apenas um bit por símbolo. O QPSK, portanto, duplica a taxa de dados em relação ao BPSK, sem exigir qualquer aumento na largura de banda do canal.

5.2.2.1 Modulação QPSK

Para formalizar a descrição conceitual, a modulação QPSK é melhor compreendida como um problema de mapeamento de espaço de sinal. A modulação digital consiste em mapear grupos de bits de entrada, conhecidos como símbolos, para um conjunto finito de sinais analógicos distintos. No QPSK, o fluxo de bits de entrada é agrupado em pares, ou "dibits" (b_I, b_Q). Cada dígito representa um dos quatro símbolos possíveis (por exemplo, 00, 01, 10, 11).

O pilar da modulação em quadratura é o uso de duas funções de base ortonormais, $\phi_1(t)$ e $\phi_2(t)$. Estas funções são as próprias portadoras de cosseno e seno, normalizadas pela energia durante um período símbolo, T_s .

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t), \quad (4)$$

$$\phi_2(t) = -\sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t). \quad (5)$$

A escolha de $\phi_2(t)$ como um seno negativo é uma convenção de engenharia comum. Como será demonstrado na Seção 2.1, esta convenção garante que, após a demodulação, o sinal recuperado no ramo Q, $y_Q(t)$, corresponde diretamente ao fluxo de dados $d_Q(t)$, sem a necessidade de uma inversão de sinal adicional, o que simplifica o design do receptor.

O fluxo de bits de entrada (serial) é convertido para o paralelo e mapeado para as amplitudes $d_I(t)$ e $d_Q(t)$. Para um mapeamento NRZ (Non-Return-to-Zero) padrão, estes sinais assumem valores de ± 1 (ou $\pm A$) durante o período de símbolo T_s . O sinal QPSK final, $s(t)$, é uma combinação linear destas funções de base:

$$s(t) = A_c d_I(t) \phi_1(t) + A_c d_Q(t) \phi_2(t). \quad (6)$$

Substituindo as Equações (4) e (5) na equação acima, e assimilando a constante de normalização $\sqrt{2/T_s}$ na amplitude A para simplificar a notação, obtemos a representação canônica do sinal QPSK:

$$s(t) = A d_I(t) \cos(2\pi f_c t) - A d_Q(t) \sin(2\pi f_c t). \quad (7)$$

Esta forma, conhecida como representação I/Q, é matematicamente equivalente a representar o sinal QPSK como uma única portadora com quatro fases distintas, isto é, $s(t) = A' \cos(2\pi f_c t + \theta_i)$. A equivalência é demonstrada pela identidade trigonométrica $\cos(A + B) = \cos(A) \cos(B) - \sin(A) \sin(B)$.

Por exemplo, muitas implementações de QPSK usam um conjunto de fases $\theta_i \in \{\frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4}\}$. Este mapeamento específico, frequentemente de $\pi/4$ -QPSK, é vantajoso na prática. Ao garantir que as transições de fase nunca cruzam a origem (o ponto zero de amplitude) da constelação, evitam-se grandes flutuações de amplitude no sinal modulado. Isso permite que os amplificadores de potência no transmissor operem com maior eficiência e menor distorção.

No receptor, o processo é invertido. O sinal QPSK recebido é multiplicado pelas mesmas portadoras, em fase e em quadratura, utilizadas na modulação.

O resultado de cada multiplicação é passado por um filtro passa-baixas (LPF) para extrair as componentes I e Q . Um circuito de decisão, então, determina os bits originais com base nos níveis de tensão de I e Q . A demodulação coerente, que exige a recuperação da fase da portadora no receptor, é a técnica mais comum, embora seja mais complexa do que a demodulação não coerente.

A complexidade, como apontado em várias análises, reside na necessidade de gerar, no receptor, um sinal de oscilador local (LO) perfeitamente síncrono em frequência e fase com a portadora do transmissor. Esta sincronização é tipicamente alcançada por meio de um Circuito de Malha de Captura de Fase (PLL - Phase-Locked Loop), que rastreia a fase da portadora de entrada e ajusta o oscilador local de acordo.

Vamos derivar matematicamente como o receptor recupera $d_I(t)$ e $d_Q(t)$ a partir do sinal recebido $r(t)$. Num cenário ideal, sem ruído, o sinal recebido $r(t)$ é idêntico ao sinal transmitido $s(t)$ da Equação (7).

O receptor divide $r(t)$ em dois ramos paralelos para processar as componentes I e Q. Para simplificar a notação, usaremos $\omega_c = 2\pi f_c$.

Na fase, o sinal $r(t)$ é multiplicado pelo oscilador local em fase, isto é, por $\cos(\omega_c t)$. O sinal resultante antes da filtragem, $v_I(t)$, é:

$$v_I(t) = r(t) \cdot \cos(\omega_c t). \quad (8)$$

Substituindo $s(t)$ da Equação (7):

$$v_I(t) = [Ad_I(t) \cos(\omega_c t) - Ad_Q(t) \sin(\omega_c t)] \cdot \cos(\omega_c t), \quad (9)$$

$$v_I(t) = Ad_I(t) \cos^2(\omega_c t) - Ad_Q(t) \sin(\omega_c t) \cos(\omega_c t). \quad (10)$$

Aplicamos agora as identidades trigonométricas de produto-para-soma:

- $\cos^2(x) = \frac{1}{2}(1 + \cos(2x))$;
- $\sin(x) \cos(x) = \frac{1}{2} \sin(2x)$.

Substituindo estas identidades na expressão de $v_I(t)$:

$$v_I(t) = Ad_I(t) \left[\frac{1}{2}(1 + \cos(2\omega_c t)) \right] - Ad_Q(t) \left[\frac{1}{2} \sin(2\omega_c t) \right], \quad (11)$$

$$v_I(t) = \underbrace{\frac{A}{2} d_I(t)}_{\text{Banda Base (DC)}} + \underbrace{\frac{A}{2} d_I(t) \cos(2\omega_c t) - \frac{A}{2} d_Q(t) \sin(2\omega_c t)}_{\text{Alta Frequência (2f_c)}}. \quad (12)$$

Este sinal $v_I(t)$ é então passado por um filtro passa-baixa (LPF). O LPF é projetado para remover todos os componentes de alta frequência, especificamente os termos centrados no dobro da frequência da portadora ($2f_c$). A saída do LPF, $y_I(t)$, é, portanto, apenas o termo de banda base (DC):

$$y_I(t) = \text{LPF}[v_I(t)] = \frac{A}{2} d_I(t). \quad (13)$$

O sinal de dados original $d_I(t)$ é recuperado com sucesso, escalado por uma amplitude constante.

Análise do Ramo em Quadratura (Q):

De forma análoga, o sinal $r(t)$ é multiplicado pelo oscilador local em quadratura. Conforme a nossa convenção de portadora (5) e as arquiteturas de receptor, usamos $-\sin(\omega_c t)$:

$$v_Q(t) = r(t) \cdot [-\sin(\omega_c t)]. \quad (14)$$

Substituindo $s(t)$:

$$v_Q(t) = [Ad_I(t) \cos(\omega_c t) - Ad_Q(t) \sin(\omega_c t)] \cdot [-\sin(\omega_c t)]. \quad (15)$$

$$v_Q(t) = -Ad_I(t) \cos(\omega_c t) \sin(\omega_c t) + Ad_Q(t) \sin^2(\omega_c t). \quad (16)$$

Aplicamos as identidades trigonométricas relevantes:

- $\cos(x) \sin(x) = \frac{1}{2} \sin(2x)$;
- $\sin^2(x) = \frac{1}{2}(1 - \cos(2x))$.

Substituindo:

$$v_Q(t) = -Ad_I(t) \left[\frac{1}{2} \sin(2\omega_c t) \right] + Ad_Q(t) \left[\frac{1}{2} (1 - \cos(2\omega_c t)) \right]. \quad (17)$$

$$v_Q(t) = \underbrace{\frac{A}{2} d_Q(t)}_{\text{Banda Base (DC)}} - \underbrace{\frac{A}{2} d_I(t) \sin(2\omega_c t) - \frac{A}{2} d_Q(t) \cos(2\omega_c t)}_{\text{Alta Frequência (2f_c)}}. \quad (18)$$

Após a filtragem passa-baixas (LPF), os termos de alta frequência $2f_c$ são novamente removidos, isolando o componente de banda base:

$$y_Q(t) = \text{LPF}[v_Q(t)] = \frac{A}{2} d_Q(t). \quad (19)$$

O sinal de dados original, $d_Q(t)$, também é recuperado. As saídas $y_I(t)$ e $y_Q(t)$ são então enviadas para um circuito de decisão, que compara os níveis de tensão recuperados com um limiar (tipicamente 0 volts) para decidir se o bit transmitido foi '1' (tensão positiva) ou '0' (tensão negativa).

A derivação anterior assumiu um "Caso Ideal" em que o oscilador local do receptor está perfeitamente sincronizado. Na prática, quase sempre há um erro de fase, ϵ , entre a portadora recebida e o oscilador local gerado. Esta análise demonstra matematicamente por que a demodulação coerente é considerada "mais complexa".

Vamos assumir que os osciladores locais do receptor têm um erro de fase ϵ , sendo, portanto, $\cos(\omega_c t + \epsilon)$ e $-\sin(\omega_c t + \epsilon)$.

O sinal no ramo I antes do LPF é:

$$v_I(t) = s(t) \cdot \cos(\omega_c t + \epsilon) \quad (20)$$

$$v_I(t) = [Ad_I \cos(\omega_c t) - Ad_Q \sin(\omega_c t)] \cdot \cos(\omega_c t + \epsilon). \quad (21)$$

Expandindo este produto:

$$v_I(t) = Ad_I \cos(\omega_c t) \cos(\omega_c t + \epsilon) - Ad_Q \sin(\omega_c t) \cos(\omega_c t + \epsilon). \quad (22)$$

Utilizamos as identidades de produto-para-soma:

- $\cos(A) \cos(B) = \frac{1}{2} [\cos(A - B) + \cos(A + B)]$;
- $\sin(A) \cos(B) = \frac{1}{2} [\sin(A + B) + \sin(A - B)]$.

Aplicando-as (com $A = \omega_c t$ e $B = \omega_c t + \epsilon$):

$$v_I(t) = Ad_I \cdot \frac{1}{2} [\cos(-\epsilon) + \cos(2\omega_c t + \epsilon)] - Ad_Q \cdot \frac{1}{2} [\sin(2\omega_c t + \epsilon) + \sin(-\epsilon)]. \quad (23)$$

Após a aplicação do LPF, todos os termos que contêm $2\omega_c t$ são eliminados. A saída $y_I(t)$ é:

$$y_I(t) = \frac{A}{2} [d_I \cos(-\epsilon) - d_Q \sin(-\epsilon)] . \quad (24)$$

Usando as identidades de ângulo par/ímpar, $\cos(-\epsilon) = \cos(\epsilon)$ e $\sin(-\epsilon) = -\sin(\epsilon)$, simplificamos para:

$$y_I(t) = \frac{A}{2} (d_I \cos(\epsilon) + d_Q \sin(\epsilon)) \quad (25)$$

Seguindo um processo idêntico para o ramo Q (multiplicando $s(t)$ por $-\sin(\omega_c t + \epsilon)$), a saída pós-LPF resultante é:

$$y_Q(t) = \frac{A}{2} (d_Q \cos(\epsilon) - d_I \sin(\epsilon)) . \quad (26)$$

As Equações (25) e (26) são a prova matemática da complexidade da demodulação coerente. Elas demonstram que, quando há um erro de fase ϵ ($\epsilon \neq 0$), a ortogonalidade entre os canais I e Q é perdida.

A saída do ramo I ($y_I(t)$) já não contém apenas os dados desejados d_I . Contém o sinal d_I atenuado por um fator de $\cos(\epsilon)$ e, criticamente, contém "vazamento" ou "*crosstalk*" do canal Q (d_Q), escalado por $\sin(\epsilon)$. Da mesma forma, o ramo Q é contaminado pelos dados d_I .

Se o erro de fase ϵ for pequeno, $\cos(\epsilon) \approx 1$ e $\sin(\epsilon) \approx \epsilon$. A saída é o sinal desejado com uma pequena interferência. No entanto, se o erro de fase for significativo por exemplo, $\epsilon = 45^\circ$, $\cos(\epsilon) = \sin(\epsilon)$, a interferência torna-se tão forte quanto o sinal desejado, o que leva a erros de bit catastróficos. Isto prova matematicamente por que o PLL no receptor é absolutamente crítico. A sua função é estimar continuamente ϵ e forçá-lo ativamente para zero, garantindo que $\cos(\epsilon) \rightarrow 1$ e $\sin(\epsilon) \rightarrow 0$, de modo a que as equações de *crosstalk* se reduzam ao caso ideal.

6 QUARTA GERAÇÃO (4G)

A transição da terceira para a quarta geração de redes móveis representou uma redefinição fundamental da arquitetura de comunicação sem fio, impulsionada pela incapacidade das redes 3G em suportar a demanda exponencial por dados. Em resposta, a União Internacional de Telecomunicações (UIT) definiu as diretrizes do *IMT-Advanced*, estabelecendo requisitos técnicos rigorosos para classificar uma rede como "4G". Entre as principais metas, exigia-se uma arquitetura baseada inteiramente em comutação de pacotes (*All-IP*), alta eficiência espectral e taxas de pico de transferência de dados da ordem de 100 para alta mobilidade e até 1s para baixa mobilidade. O padrão desenvolvido para atender a esses requisitos foi o *Long-Term Evolution* (LTE), cuja implementação no Brasil ocorreu em fases estratégicas distintas, moldadas pela disponibilidade espectral e regulação governamental.

No cenário brasileiro, a introdução comercial do LTE iniciou-se efetivamente em 2012, motivada pela necessidade de infraestrutura para os grandes eventos esportivos da década. A primeira fase de implementação baseou-se no leilão da faixa de 2,5, que, embora permitisse altas taxas de transferência e grande capacidade devido à largura de banda disponível, apresentava limitações físicas de propagação, restringindo a cobertura a áreas urbanas densas e exigindo uma malha maior de estações base.

Para superar as deficiências de cobertura da faixa de 2,5, uma segunda etapa crucial da implementação do 4G no Brasil ocorreu a partir de 2014, com o leilão da faixa de 700. A liberação deste espectro, contudo, dependia do desligamento do sinal de TV analógica, um processo gradual conhecido como *switch-off*, que se estendeu até meados de 2018 em diversas regiões. A faixa de 700 foi determinante para a "interiorização" do 4G, pois suas características de propagação permitem maior alcance e melhor penetração em ambientes *indoor*. Posteriormente, com a evolução para o LTE-Advanced, as operadoras brasileiras passaram a utilizar técnicas de Agregação de Portadoras, combinando o espectro de 700, 1800 e 2,5 para atingir as velocidades de gigabit preconizadas originalmente pelo IMT-Advanced.

6.1 LONG-TERM EVOLUTION

O LTE foi projetado pelo 3GPP para suprir a necessidade do *IMT-Advanced*. Sua concepção representou uma ruptura radical com as arquiteturas legadas do 2G/3G, introduzindo uma rede de acesso de rádio E-UTRAN e um núcleo de rede EPC totalmente novos, ambos otimizados para o transporte eficiente de pacotes IP com baixa latência. No entanto, embora as arquiteturas das gerações anteriores tenham sido colocadas de lado, o 4G LTE utilizou os Turbo Códigos para alcançar seus requisitos. A primeira versão do padrão estabeleceu as fundações, enquanto sua evolução, o *LTE-Advanced*, introduziu tecnologias-chave para cumprir e exceder plenamente as metas da 4G (Sesia, Toufik e Baker, 2011).

O Evolved Packet Core (EPC, Núcleo de Pacote Evoluído) é o coração da rede 4G LTE. Sua arquitetura foi projetada com base em três princípios fundamentais: ser plana, baseada em pacotes *All-IP* e com separação entre os planos de controle e de usuário, visando simplificar a rede, reduzir a latência e facilitar a escalabilidade.

A inovação mais disruptiva do EPC foi a adoção de uma arquitetura de rede "plana". Em contraste direto com a estrutura hierárquica do UMTS, na qual o RNC gerenciava múltiplos NodeBs, a arquitetura LTE eliminou completamente o RNC. Suas funções de gerenciamento de recursos de rádio e de mobilidade foram distribuídas: parte foi transferida para a própria estação base, que passou a ser chamada de *Evolved NodeB* (eNodeB), e parte foi absorvida por novas entidades no núcleo de rede.

Essa mudança arquitetônica trouxe benefícios imediatos e transformadores. Ao eliminar um nó intermediário no caminho dos dados, a latência de ponta a ponta foi drasticamente reduzida. O tráfego do usuário agora flui diretamente do eNodeB para o *Serving Gateway* (S-GW) no núcleo da rede, sem a necessidade de processamento em um controlador centralizado. Isso não apenas atendeu ao requisito de latência de $< 10ms$ do *IMT – Advanced*, mas também acelerou significativamente os procedimentos de estabelecimento de conexão e de *handover*. A simplificação da rede, com menos nós e interfaces, também resultou em custos operacionais e de capital mais baixos para as operadoras, além de maior flexibilidade para implantar e escalar a rede.

As desvantagens, na verdade, são os novos desafios que surgiram dessa decisão, com a necessidade de eNodeBs mais potentes e a complexidade de fazer com que esses nós coordenem a mobilidade e a interferência entre si sem um controle central.

O procedimento de *attach* é o processo fundamental pelo qual um UE se registra na rede LTE e estabelece a conexão IP. Este processo envolve uma sequência complexa de mensagens de sinalização entre o UE, o eNodeB e os vários nós do EPC para autenticar o usuário, estabelecer o contexto de segurança e estabelecer um caminho de dados, conhecido como EPS *bearer* padrão. O fluxo simplificado é o seguinte:

- **Iniciação do UE:** Após sincronizar com um eNodeB, o UE envia uma mensagem RRC *Connection Setup Complete* que encapsula a primeira mensagem do plano de não acesso (NAS), a *Attach Request*. Esta mensagem contém a identidade do UE e a solicitação de conectividade a uma rede de dados.
- **Encaminhamento ao MME:** O eNodeB seleciona um MME e encaminha a *Attach Request* a ele.
- **Autenticação e Segurança:** O MME inicia o processo de autenticação, recuperando os vetores de autenticação do banco de dados. Em seguida, estabelece um contexto de segurança NAS com o UE para criptografar e proteger a integridade da sinalização subsequente.
- **Registro de Localização:** O MME informa ao HSS sua identidade, registrando-se como o MME que está servindo o UE, por meio de uma mensagem *Update Location Request*. O HSS responde com o perfil de assinatura do usuário.
- **Criação do Bearer:** O *Mobility Management Entity* (MME, Entidade de Gerenciamento de Mobilidade) inicia a criação do caminho de dados, enviando uma mensagem *Create Session Request* (CSR, Requisição de Criação de Sessão) ao *Serving Gateway* (S-GW, Gateway de Serviço). O S-GW, por sua vez, encaminha a solicitação para o *Packet Data Network Gateway* (P-GW, Gateway de Rede de Dados por Pacote).

- O P-GW aloca um endereço IP, para o UE e estabelece os parâmetros de *Quality of Service* (QoS, Qualidade de Serviço) para o bearer. Ele responde ao S-GW com uma *Create Session Response*, que inclui o endereço IP alocado. O S-GW encaminha essa resposta ao MME.
- Estabelecimento do Contexto de Rádio: O MME envia uma mensagem *Initial Context Setup Request* ao eNodeB. Esta mensagem contém a *Attach Accept* (a ser encaminhado ao UE), que inclui o endereço IP e os parâmetros de QoS, além de informações de segurança para o plano de usuário. O eNodeB então configura os radio bearers com o UE por meio de mensagens *Connection Reconfiguration* (RRC, Reconfiguração da Conexão).
- Confirmação e Finalização: O UE confirma o estabelecimento do radio bearer e, em seguida, envia a mensagem *Attach Complete* ao MME, finalizando o procedimento. O MME e o S-GW trocam uma mensagem final para informar ao S-GW o endereço do eNodeB, completando o caminho do plano de usuário.

Ao final deste processo, o UE está registrado na rede, possui um endereço IP e um *bearer* ativo para enviar e receber dados via rede LTE.

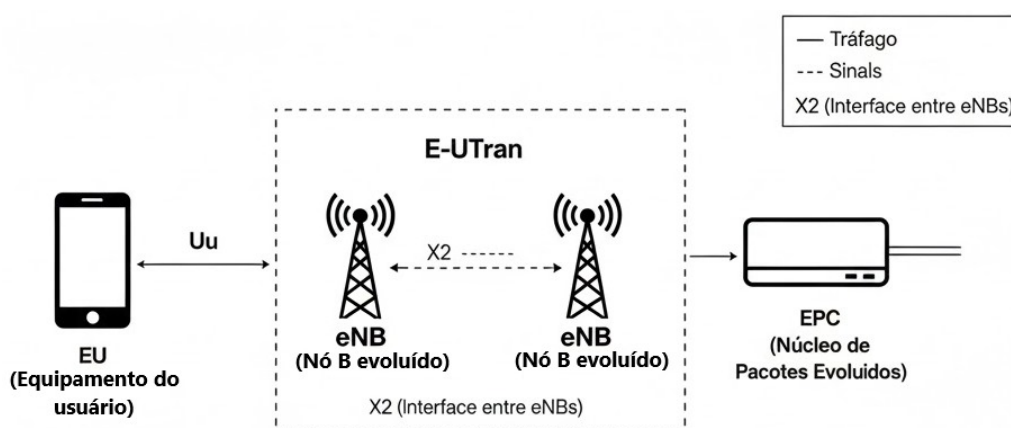
6.2 INTERFACE DE RÁDIO E-UTRAN

A *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN, Rede de Acesso de Rádio Terrestre Universal Evoluída) é a interface de rádio do LTE, composta exclusivamente por eNodeBs. Ela foi projetada do zero para maximizar a eficiência espectral, a taxa de dados e minimizar a latência, utilizando um conjunto de tecnologias avançadas na camada física, resolvendo as limitações da arquitetura UTRAN utilizada na terceira geração.

A mudança mais transformadora foi a integração de todas as funções de controle que antes residiam no RNC diretamente no eNodeB. Cada eNodeB na E-UTRAN é uma entidade inteligente e autônoma, responsável pelo próprio gerenciamento de recursos de rádio, agendamento, controle de admissão e gerenciamento de mobilidade.

Essa arquitetura plana conecta o eNodeB diretamente à rede core do LTE, o *Evolved Packet Core*, por meio da interface S1. Além disso, os eNodeBs podem se comunicar diretamente entre si por meio da interface X2. Essa estrutura reduz drasticamente o número de saltos na rede, o que é a principal razão pela qual o LTE alcança latências significativamente mais baixas do que o 3G. A E-UTRAN, como parte do *Evolved Packet System*, foi projetada desde o início como uma rede puramente de comutação de pacotes, otimizada para o tráfego IP e que abandona o suporte nativo à comutação de circuitos. A imagem a seguir ilustra a arquitetura E-UTRAN (Dahlman, Parkvall e Sköld, 2016).

Figura 6 – Estrutura da rede de acesso E-UTRAN destacando as principais interfaces de comunicação como X2, responsável pela troca de sinalização e dados diretamente entre os eNBs.



Fonte: elaborado pelo autor.

A descentralização da inteligência da rede, deslocando-a do RNC centralizado para a borda (o eNodeB), foi um passo estratégico fundamental. Esta decisão não apenas resolveu o problema da latência, mas também estabeleceu as bases para tecnologias futuras. Ao tornar cada estação base uma entidade autônoma capaz de tomar decisões locais e cooperar diretamente com seus vizinhos (via X2), a E-UTRAN pavimentou o caminho para conceitos como *Self-Organizing Networks* (SON, redes auto-organizadas), em que a rede pode se autoconfigurar e auto otimizar sem intervenção centralizada. Conceitualmente, essa filosofia de empurrar a inteligência e o processamento para a borda da rede pode ser vista como uma precursora do *Mobile Edge Computing* (MEC, Computação de borda), uma tecnologia pilar do 5G que aproxima a computação do usuário final para permitir aplicações de latência ultrabaixa.

6.3 OFDMA

Para o enlace *downlink*, do eNB para o UE, a E-UTRAN utiliza o *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA, Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal). O OFDMA é a versão multiusuária do OFDM, em que o sistema não apenas divide o canal em subportadoras, mas também aloca simultaneamente subconjuntos dessas subportadoras a diferentes usuários.

No LTE, o espectro é dividido em subportadoras com um espaçamento fixo de 15. Essas subportadoras são agrupadas em unidades mínimas de alocação de recursos chamadas *Resource Blocks* (RBs, Blocos de Recursos). Um RB consiste em 12 subportadoras no domínio da frequência e em um *slot* (0.5ms) no domínio do tempo. O agendador do eNB, localizado na camada *Medium Access Control* (Controle de Acesso ao Meio, MAC), tem a flexibilidade de alocar dinamicamente um ou mais RBs a diferentes usuários a cada Intervalo de Tempo de Transmissão (*Transmission Time Interval*, TTI) de 1ms. Essa alocação granular nos domínios do tempo e da frequência permite uma multiplexação eficiente de múltiplos usuários com diferentes requisitos de dados e condições de canal, sendo a chave para a alta eficiência espectral do LTE (Dahlman, Parkvall e Sköld, 2016).

A geração de um símbolo OFDM pode ser representada matematicamente pela Transformada Inversa Discreta de Fourier (IDFT) dos símbolos de dados. Para um símbolo no tempo t , a forma de

onda é uma soma de subportadoras moduladas:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi f_k t}, \quad (1)$$

onde N é o número total de subportadoras, X_k é o símbolo de dados complexo (p. ex., QPSK, 16-QAM, 64-QAM) na k -ésima subportadora, e $f_k = k \cdot \Delta f$ é a frequência da k -ésima subportadora, com Δf sendo o espaçamento de 15.

Enquanto o OFDMA é ideal para o *downlink*, ele apresenta um desafio significativo para o enlace do *uplink*, do UE para o eNB: a alta *Peak-to-Average Power Ratio* (PAPR, Taxa de Potência Pico-Média). O PAPR é a razão entre a potência de pico instantânea e a potência média de uma forma de onda. Matematicamente, é definido como:

$$\text{PAPR} = \frac{\max |s(t)|^2}{E[|s(t)|^2]}, \quad (2)$$

onde $s(t)$ é o sinal no domínio do tempo e $E[\cdot]$ denota o valor esperado. Em um sistema OFDM, a soma coerente de um grande número de subportadoras pode, ocasionalmente, resultar em picos de amplitude muito elevados, o que leva a um alto PAPR. Sinais com alto PAPR exigem amplificadores de potência (PAs) com uma faixa de operação linear ampla para evitar a distorção do sinal. PAs com alta linearidade são caros, consomem muita energia e são ineficientes.

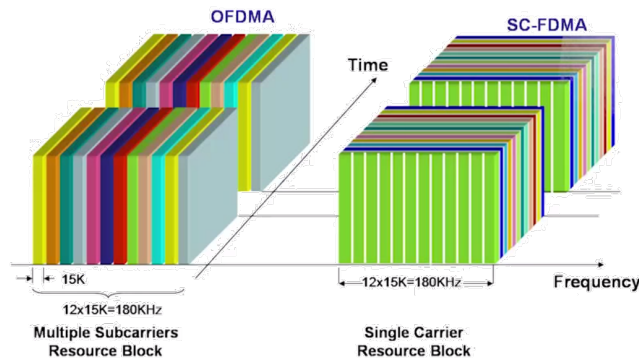
Essa ineficiência energética é uma grande preocupação para dispositivos móveis (UEs), que são alimentados por bateria e têm restrições severas de custos e dissipação de calor. A necessidade de um PA caro e ineficiente em cada *smartphone* seria impraticável.

Para resolver o problema do PAPR no *uplink*, a E-UTRAN adota o *Single-Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA, Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência de Portadora Única). O SC-FDMA, também conhecido como OFDMA pré-codificado por DFT (*DFT-spread-OFDM*), combina a flexibilidade de alocação de frequência do OFDMA com as propriedades de baixo PAPR de uma transmissão de portadora única. Em um transmissor SC-FDMA, os símbolos de dados passam por uma Transformada Discreta de Fourier antes do mapeamento para as subportadoras e da subsequente IDFT. Esse passo adicional de DFT espalha a informação de cada símbolo por todas as subportadoras alocadas, mas o resultado é uma forma de onda no tempo que se assemelha a uma transmissão de uma única portadora modulada, com flutuações de amplitude muito menores e, consequentemente, um PAPR significativamente mais baixo (Dahlman, Parkvall e Sköld, 2014).

A escolha assimétrica de OFDMA para o *downlink* e de SC-FDMA para o *uplink* é um exemplo de otimização de sistema de ponta a ponta. Ela reflete uma profunda compreensão das assimetrias fundamentais entre a estação base e o terminal móvel. O eNB, conectado à rede elétrica e com menos restrições de custo e complexidade, pode arcar com um PA mais sofisticado para lidar com o alto PAPR do OFDMA, aproveitando a flexibilidade de agendamento para múltiplos usuários. O UE, por outro lado, beneficia-se imensamente do baixo PAPR do SC-FDMA, que permite o uso de PAs mais simples, baratos e eficientes, maximizando a autonomia da bateria. A imagem a seguir ilustra o espalhamento espectral do OFDMA e do SC-FDMA. A Figura 7 ilustra o conceito da arquitetura LTE utilizando o

esplendor OFDMA e o SC-FDMA.

Figura 7 – Comparação entre as técnicas de múltiplo acesso do LTE, à esquerda o OFDMA onde a banda de 180kHz é dividida em 12 portadoras, à direita, o SC-FDMA onde todas as portadoras são enviadas ao mesmo tempo.



Fonte: (Reis, 2014).

O sucesso da E-UTRAN em habilitar a era da banda larga móvel pode ser quantificado por meio de um conjunto de *Key Performance Indicators* (KPIs, indicadores-chave de desempenho). Esses KPIs não apenas medem o desempenho da rede em operação, mas também refletem o quão bem o design da E-UTRAN atingiu seus objetivos fundamentais de alta eficiência, baixa latência e altas taxas de dados. Ao mesmo tempo, é crucial entender os limites teóricos da comunicação, estabelecidos pelas leis fundamentais da física, para avaliar o quão perto a tecnologia chega desses limites.

A eficiência espectral é talvez o KPI mais importante para avaliar a eficiência de uma tecnologia de rádio. Ela mede a taxa de dados que pode ser transmitida por unidade de espectro de radiofrequência, e é tipicamente expressa em bits por segundo por Hertz (bit/s/Hz) (Goldsmith, 2005). Um valor SE mais alto indica um uso mais eficiente do espectro, um recurso escasso e valioso. A fórmula fundamental para a SE é

$$SE = \frac{R}{B}, \quad (3)$$

onde R é a taxa de dados (throughput) em bit/s e B é a largura de banda do canal em Hz .

No LTE, a SE é influenciada por vários fatores dinâmicos:

- **Esquema de Modulação e Codificação (MCS):** O uso de modulações de ordem superior (como 64-QAM em vez de QPSK) e de taxas de codificação mais baixas aumenta a SE , mas exige um *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) mais alto.
- **Tecnologia MIMO:** O uso de multiplexação espacial multiplica a SE , mantém a diversidade e melhora a robustez.
- **Condições do Canal:** A qualidade do canal de rádio (medida pelo SNR) determina qual MCS e qual modo MIMO podem ser utilizados.

A latência mede o tempo de atraso que um pacote de dados leva para atravessar a rede. A redução drástica da latência foi um dos principais objetivos de design do LTE. Distingue-se entre:

- **Latência do Plano de Usuário (*User Plane Latency*):** O tempo para um pacote IP viajar do UE para o EPC (ou vice-versa). O objetivo de design do LTE era uma latência de ida (*one-way*) inferior a $5ms$ em condições ideais.
- **Latência do Plano de Controle (*Control Plane Latency*):** O tempo de transição de um estado de baixo consumo de energia para um estado ativo. O objetivo era de menos de 50 ms, permitindo uma experiência de usuário "sempre conectado".

As taxas de pico representam a taxa máxima teórica de dados que um único usuário pode alcançar em condições ideais (proximidade do eNB, sem outros usuários na célula). Para o LTE original, as metas eram:

- *Downlink*: Aproximadamente $300Mbit/s$.
- *Uplink*: Aproximadamente $75Mbit/s$.

Essas taxas são alcançadas combinando a maior largura de banda de canal ($20MHz$), a configuração MIMO mais complexa suportada (4×4 no downlink) e a modulação de ordem mais alta ($64 - QAM$).

Toda comunicação sem fio está sujeita a um limite de desempenho fundamental, imposto pelas leis da física. Este limite é descrito pelo Teorema de Shannon-Hartley, já citado anteriormente. Ele estabelece a capacidade máxima teórica de um canal de comunicação em função da largura de banda e da relação sinal-ruído.

6.4 LTE-ADVANCED

O *LTE-Advanced*, padronizado a partir do *Release 10* do 3GPP, foi a resposta do LTE aos requisitos da ITU para o IMT-Advanced, o que lhe valeu a designação de "Verdadeiro 4G". Seu foco principal era aumentar significativamente as taxas de pico, a capacidade da rede e o desempenho na borda da célula (Holma e Toskala, 2012). As funcionalidades-chave introduzidas foram:

- **Agregação de Portadoras (*Carrier Aggregation - CA*):** Permite que um UE utilize simultaneamente múltiplos blocos de espectro, chamados de *Component Carriers* (CCs). Ao agregar até 5 CCs de $20MHz$ cada, o *LTE-Advanced* pode alcançar uma largura de banda total de até $100MHz$, permitindo taxas de pico de *downlink* que se aproximam de 100 Mbps e ultrapassam 1Gbit/s.
- **MIMO Avançado (*Enhanced MIMO*):** expandiu o suporte a configurações MIMO, padronizando até 8×8 no downlink e 4×4 no *uplink*. Isso permitiu um aumento adicional na eficiência espectral e no *throughput*.
- **Coordinated *Multi-Point* (*CoMP*):** técnica sofisticada para mitigar a interferência na borda da célula. Múltiplos eNBs coordenam suas transmissões para que a célula vizinha se torne uma fonte de sinal útil, resultando em uma melhoria significativa na qualidade do sinal e no *throughput*.

- Nós de Retransmissão (*Relay Nodes*): Estações base de baixa potência que se conectam sem fio a um eNB doador para preencher áreas de sombra ou aumentar a capacidade em *hotspots* de tráfego.

6.5 LTE-ADVANCED PRO

O *LTE-Advanced Pro*, também conhecido como 4.5G ou 4.9G a partir do *Release 13*, representa o estágio final da evolução do 4G, introduzindo tecnologias e conceitos que se tornariam fundamentais para o 5G. Se o *LTE-Advanced* focou em mais velocidade, o *LTE-Advanced Pro* focou em mais espectro além da velocidade (Sesia, Toufik, e Baker, 2011). As inovações mais impactantes incluem:

- *Massive Carrier Aggregation*: O número de CCs que podem ser agregados foi expandido para até 32, permitindo larguras de banda teóricas de até 640 MHz e taxas de pico acima de 3 Gbps ;
- *Licensed-Assisted Access* (LAA): Reconhecendo a escassez de espectro licenciado, o LAA permite a agregação de portadoras em espectro não licenciado (principalmente na faixa de 5 GHz) a uma portadora em espectro licenciado. A portadora licenciada atua como uma "âncora", garantindo a robustez, o controle e a mobilidade, enquanto a(s) portadora(s) não licenciada(s) fornece(m) um grande impulso na capacidade de dados. Para coexistir de forma justa com o Wi-Fi, o LAA implementa um mecanismo de "*Listen-Before-Talk*" (LBT, "Escuta-Antes-Fala").
- *Full-Dimension MIMO* (FD-MIMO): Esta tecnologia representa um salto na área de antenas. Em vez de *arrays* lineares de até 8 antenas, o FD-MIMO utiliza *arrays* bidimensionais com um grande número de elementos de antena (por exemplo, 32, 64 ou mais portas). Isso permite o *beamforming* 3D, que pode direcionar a energia do sinal não apenas horizontalmente, mas também verticalmente. Essa capacidade é crucial para atender usuários em diferentes andares de edifícios altos e melhora drasticamente a capacidade e a eficiência espectral da célula;
- *Internet of Things* (IoT): O *LTE-Advanced Pro* adaptou a plataforma LTE para o emergente mercado de IoT em massa, que tem requisitos opostos aos da banda larga móvel (baixo custo, baixo consumo de energia, baixa taxa de dados). Foram introduzidas duas novas categorias de dispositivos;
- LTE-M: Otimizado para uma ampla gama de aplicações IoT, oferecendo taxas de dados moderadas (até 1 Mbps), suporte à mobilidade e a voz (VoLTE), com custo e consumo de energia reduzidos em comparação com o LTE convencional;
- NB-IoT (*Narrowband-IoT*): Projetado para aplicações de IoT em larga escala com requisitos mínimos. Opera em uma largura de banda muito estreita (200 kHz), o que permite uma cobertura extremamente profunda, oferece um custo de módulo ultrabaixo e uma vida útil da bateria que pode exceder 10 anos.

A evolução do LTE para *LTE-Advanced Pro* demonstra uma mudança estratégica notável. A plataforma evoluiu de um foco singular em banda larga móvel para uma arquitetura multifacetada, capaz de atender

a casos de uso radicalmente diferentes, desde o streaming de vídeo 4K até o sensor de umidade do solo. Essa diversificação transformou o LTE de uma autoestrada de dados em um "sistema nervoso" de conectividade, garantindo sua relevância e coexistência a longo prazo como uma camada de serviço fundamental e complementar na era 5G.

Tabela 1 – Evolução das Tecnologias LTE e LTE-Advanced.

Fase	Release 3GPP	Taxa de Pico (DL)	Tecnologias-Chave Introduzidas
LTE	Rel-8 / Rel-9	300 Mbps	OFDMA/SC-FDMA, MIMO (até 4x4), Arquitetura Plana
LTE-Advanced	Rel-10 / Rel-11 / Rel-12	1 Gbps	Carrier Aggregation (até 5 CCs), MIMO Avançado (até 8x8), CoMP, Relay Nodes
LTE-Advanced Pro	Rel-13 / Rel-14	>3 Gbps	LAA, Massive CA (até 32 CCs), Massive MIMO/FD-MIMO, NB-IoT, eMTC

Fonte: Elaborado pelo autor.

7 QUINTA GERAÇÃO (5G)

Diferentemente das gerações anteriores, que se concentraram principalmente em fornecer um serviço principal mais rápido, voz para 2G, dados para 3G e banda larga móvel para 4G. O 5G foi concebido desde o início como uma plataforma unificada para suportar um conjunto heterogêneo e, por vezes, conflitante de serviços. Esta visão "de cima para baixo", partindo dos casos de uso para a tecnologia, exigiu uma reinvenção completa tanto do núcleo da rede quanto da interface de rádio.

A quinta geração foi formalizada pela UIT no padrão IMT-2020, que definiu não apenas metas de desempenho quantitativas, mas também três categorias de casos de uso fundamentais que a nova arquitetura deveria suportar nativamente (ITU, 2015).

- *Enhanced Mobile Broadband*: A evolução natural da banda larga móvel 4G, focada em fornecer taxas de dados extremas, alta densidade de usuários e capacidade massiva de tráfego. Os casos de uso incluem streaming de vídeo em 4K/8K, Realidade Virtual (VR), Realidade Aumentada (AR) e acesso fixo sem fio (*Fixed Wireless Access - FWA*).
- *Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC)*: Um novo paradigma focado em aplicações de missão crítica que não podem tolerar falhas ou atrasos. Os requisitos são de altíssima confiabilidade e latência de ponta a ponta na ordem de milissegundos. Aplicações incluem comunicação *Vehicle-to-Everything (V2X)*, veículo-para-tudo) para carros autônomos, controle de robôs industriais em tempo real, redes elétricas inteligentes e cirurgia remota.
- *Massive Machine-Type Communications (mMTC)*: Focada em habilitar a Internet das Coisas em escala massiva. O objetivo é conectar um número gigantesco de dispositivos de baixo custo, baixo consumo de energia e que transmitem pequenos volumes de dados de forma esporádica. Os principais requisitos são a alta densidade de conexão, a longa vida útil da bateria e o baixo custo por dispositivo. Aplicações incluem sensores em cidades inteligentes, monitoramento agrícola e logística.

Esses três pilares impõem requisitos de rede fundamentalmente diferentes e, muitas vezes, contraditórios, como ilustrado na Tabela (2). Por exemplo, a alta taxa de dados do eMBB contrasta com a baixa taxa do mMTC, e a baixa latência do URLLC contrasta com a tolerância a atrasos do mMTC. A genialidade da 5G reside em sua capacidade de atender a todos esses requisitos em uma única infraestrutura física. No contexto brasileiro, essa flexibilidade é operacionalizada por meio de uma estratégia espectral diversificada, em que a faixa de 3,5GHz consolida-se como o núcleo para o eMBB ao oferecer equilíbrio entre capacidade e alcance, enquanto a banda de 700MHz garante a ampla cobertura e penetração necessárias ao mMTC, e as ondas milimétricas na frequência de 26GHz viabilizam o desempenho extremo exigido pelas aplicações de URLLC.

Para a visão do IMT-2020, o núcleo de rede 4G (EPC) foi completamente redesenhado. O resultado é o *5G Core (5GC)*, uma arquitetura nativa da nuvem, baseada em serviços, que abraça os princípios mais modernos de desenvolvimento de software e de operações de TI.

Tabela 2 – Resumo dos Requisitos Essenciais dos Pilares 5G

Pilar	Descrição Completa	Requisitos Essenciais dos Pilares 5G)
eMBB	Banda Larga Móvel Avançada	Taxa de Dados Altíssima (20 Gbit/s) e Alta Mobilidade (até 500 km/h).
URLLC	Comunicações Ultra-Confiáveis e de Baixa Latência	Latência Ultra-Baixa (~ 1 ms) e Confiabilidade Extrema ($1 - 10^{-5}$).
mMTC	Comunicações Massivas Tipo Máquina	Densidade Massiva (10^6 disp./km ²) e Eficiência Energética Extrema (anos de bateria).

Fonte: Elaborado pelo autor.

7.1 O 5G CORE

O 5GC abandona a arquitetura de interfaces ponto a ponto do EPC em favor de uma Arquitetura Baseada em Serviços (*Service-Based Architecture*, SBA). Neste modelo, as *Networking Functions* (NFs), análogas aos nós do EPC, como o MME, não se comunicam por meio de protocolos e interfaces rígidos, mas pelo *Hypertext Transfer Protocol version 2* (Protocolo de Transferência de Hipertexto versão 2, HTTP/2). É a segunda grande atualização do protocolo fundamental da *World Wide Web*, projetado especificamente para tornar a navegação mais rápida, eficiente e robusta do que seu antecessor, o HTTP/1.1 (3GPP, 2023).

A principal melhoria do HTTP/2 é a multiplexação, que permite ao navegador enviar e receber múltiplos pedidos de recursos (como imagens e scripts) simultaneamente por meio de uma única conexão de rede, eliminando um grande gargalo da versão anterior. Além disso, ele utiliza um protocolo binário em vez de texto, o que torna a comunicação mais leve e menos suscetível a erros. O protocolo também introduz a compressão de cabeçalho (HPACK), que reduz drasticamente as informações repetitivas enviadas em cada requisição, e o recurso de *Server Push*, que permite ao servidor enviar proativamente os recursos necessários (como CSS e JavaScript) antes mesmo que o navegador os solicite.

Logo, em vez da comunicação rígida da sua antecessora, cada NF expõe suas capacidades como um conjunto de "serviços" que outras NFs autorizadas podem descobrir e consumir por meio de APIs padronizadas, tipicamente baseadas em REST sobre HTTP/2.

Essa arquitetura é viabilizada por duas tecnologias fundamentais:

- *Network Functions Virtualization* (NFV): Desacopla o software da função de rede (como um *firewall* ou um *gateway*) do *hardware* proprietário. Isso permite que as NFs rodem como software, seja como máquinas virtuais (VMs), ou como contêineres em servidores comerciais, geralmente em um ambiente de nuvem, como o *Amazon Web Services* (AWS);
- *Software-Defined Networking* (SDN): Separa o plano de controle da rede do plano de dados. Isso

permite que a rede seja gerenciada e programada de forma centralizada e dinâmica, facilitando a automação e a orquestração de serviços complexos.

A combinação de SBA, NFV e SDN transforma o núcleo da rede, de uma coleção de caixas de *hardware* inflexíveis, em uma plataforma de *software* flexível, ágil e programável. As NFs podem ser instanciadas, escaladas e atualizadas dinamicamente para atender à demanda, em uma abordagem conhecida como *cloud-native* (ou nativa em nuvem). Um princípio-chave deste modelo é o uso de NFs sem estado, em que os dados de sessão e o estado do usuário são armazenados em um banco de dados centralizado, permitindo que qualquer instância de uma NF processe uma transação, aumentando drasticamente a resiliência e a escalabilidade do sistema.

7.2 NETWORK SLICING

O *Network Slicing* é talvez a capacidade mais revolucionária que a arquitetura 5GC habilita. É o mecanismo que permite que uma única infraestrutura física seja particionada em múltiplas redes lógicas, virtuais e isoladas de ponta a ponta, conhecido como *end-to-end*, cada uma otimizada para um caso de uso específico. Cada fatia de rede é uma coleção autocontida de recursos e NFs que são configuradas e orquestradas para atender aos requisitos de um serviço ou cliente. Por exemplo, uma fatia eMBB pode ser configurada com alta largura de banda e as NFs do plano de usuário centralizadas para um acesso eficiente à rede (Foukas, 2017).

O *Network Slicing* permite que as operadoras ofereçam *Network-as-a-Service* (Rede como Serviço), criando redes virtuais personalizadas para diferentes indústrias verticais, como automotiva, saúde e manufatura, sobre uma infraestrutura comum, o que abre novos modelos de negócios e fluxos de receita.

7.3 5G NEW RADIO

A interface de rádio da 5G, chamada de *New Radio* (Novo Rádio, NR), foi projetada para ser tão flexível e escalável quanto o 5GC. Ela introduz novas bandas de espectro, técnicas de antena avançadas e uma forma de onda adaptável para atender aos diversos requisitos do IMT-2020, além de métodos de polarização de canais que permitem uma maior eficiência com uma taxa de erro baixa.

Para alcançar as taxas de dados de multi-gigabits por segundo exigidas pelo eMBB, a 5G NR explora novas faixas de espectro, notadamente as ondas milimétricas (*millimeter waves* - mmWave), em frequências acima de 24 GHz. No entanto, esta exploração de espectro é apenas um dos vários pilares tecnológicos sobre os quais a NR foi construída.

Diferentemente das interfaces de rádio anteriores, a 5G *New Radio* (NR) foi projetada desde o início para ser uma interface de rádio tão flexível, escalável e programável quanto o 5G Core (5GC) que ela serve. Para cumprir os requisitos do IMT-2020 de suportar serviços heterogêneos numa única plataforma, a NR reinventa a camada física por meio de quatro inovações tecnológicas fundamentais.

A estratégia inicial adota o espectro duplo para equilibrar cobertura e capacidade, utilizando bandas de frequência radicalmente diferentes de forma simultânea. O sistema combina a faixa sub-6 GHz, exemplificada pelas frequências de 700MHz e 3,5GHz, com as ondas milimétricas (mmWave)

que operam em 26 GHz e 28 GHz, unindo assim o alcance das frequências mais baixas com a velocidade das mais altas. Em seguida são utilizadas antenas mais tecnológicas com *Massive MIMO* e *beamforming* como componentes centrais para gerir a propagação de rádio e aumentar a eficiência espectral. A terceira inovação foi a utilização do OFDMA juntamente com essas antenas que permitem o beamforming, ou seja, a transmissão do sinal direcionada ao usuário, ao invés de clusters. E, por último, temos a codificação que utiliza códigos LDPC (*Low-Density Parity-Check*, Verificação de Paridade de Baixa Densidade) e códigos polares para otimizar a fiabilidade e a eficiência na decodificação.

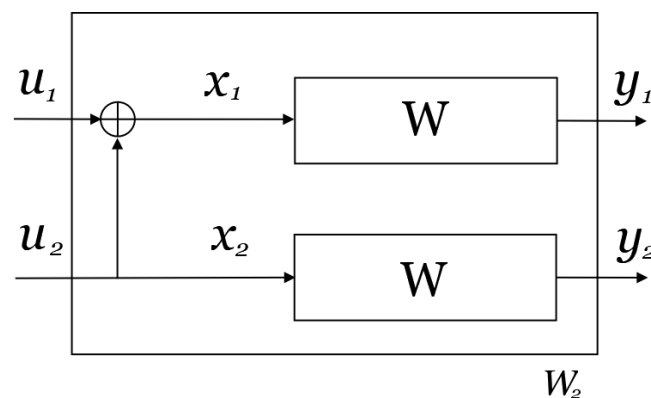
Neste novo paradigma, os códigos polares foram selecionados como técnica obrigatória para os canais de controle. Isso inclui o *Broadcast Channel* (BCH), a *Downlink Control Information* (DCI) e a *Uplink Control Information* (UCI). Em contrapartida, os códigos LDPC foram padronizados para os canais de dados, como o *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH) e o *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH).

7.4 CÓDIGOS POLARES

Introduzidos por Erdal Arikan em (Arikan, 2009), os códigos polares são uma classe de códigos de bloco lineares. Sua importância teórica deriva do fato de serem a primeira e única classe de códigos capazes de atingir a capacidade de canal de Shannon, ou seja, o limite teórico máximo de transmissão de dados confiável sobre um canal ruidoso.

O mecanismo central por trás dos códigos polares é um fenômeno da polarização de canal. Este é um processo recursivo que combina e divide N cópias de um canal ruidoso simétrico e sem memória para criar N subcanais virtuais (ou sintetizados) distintos, $W_N^{(i)}$. A Figura 8 ilustra a combinação dos canais para $N = 2$.

Figura 8 – Diagrama esquemático da polarização de canal para um bloco de tamanho $N = 2$, a estrutura mostra a combinação de duas cópias independentes do canal W para criar o canal vetorial W_2 , transformando as entradas u_1 e u_2 através de operações lógicas (XOR) antes da transmissão.



Fonte: elaborado pelo autor.

À medida que o comprimento do bloco N aumenta (teoricamente, $N \rightarrow \infty$), as capacidades desses subcanais virtuais polarizam-se. Elas tendem a se tornar perfeitamente confiáveis (sem ruído, com capacidade $I(W_N^{(i)}) \rightarrow 1$) ou completamente ruidosas (inúteis, com capacidade $I(W_N^{(i)}) \rightarrow 0$). A

fração de canais confiáveis aproxima-se da capacidade do canal original, $C(W)$, enquanto a fração de canais ruidosos aproxima-se de $1 - C(W)$.

A estratégia de codificação é, então, elegantemente simples:

- Bits de Informação: Os K bits de dados úteis são alocados e transmitidos por meio dos K subcanais virtuais identificados como os mais confiáveis.
- Bits Congelados (*Frozen Bits*): Os $(N - K)$ bits restantes são fixados em valores conhecidos (geralmente "0" e transmitidos pelos subcanais ruins).

O problema de engenharia prática, no entanto, decorre do fato de que a polarização perfeita (canais puramente 0 ou 1) só ocorre quando $N \rightarrow \infty$. Em sistemas reais como o 5G, são usados comprimentos de bloco finitos (por exemplo, $N = 512$, $N = 1024$ ou $N = 2048$). Em N finito, a polarização é imperfeita. Em vez de uma dicotomia binária, há um espectro de confiabilidade que inclui muitos canais “medíocres”.

Isso cria o desafio central da construção do código. Como identificar e ordenar com precisão quais dos N subcanais são os K melhores para alocar os bits de informação? O trabalho (Barros, 2024) analisa e compara dois métodos de polarização mais proeminentes para resolver esse problema: o Parâmetro de Bhattacharyya e a Evolução de Densidade com Aproximação Gaussiana (DEGA).

7.5 CÓDIGO LDPC

Enquanto os códigos polares foram a escolha estratégica do 3GPP para os canais de controle no 5G NR, os códigos de Verificação de Paridade de Baixa Densidade foram selecionados para a tarefa de maior volume de dados. Os canais de dados compartilhados.

Esta decisão foi o resultado de uma avaliação rigorosa, focada nos requisitos do cenário de uso de eMBB, que exige *throughput* elevado e baixa latência.

Os códigos LDPC superaram os Turbo Códigos e os Códigos Polares nesta área específica por três razões principais. Primeiramente, suas vantagens mais significativas são o alto *throughput* e o paralelismo. Diferentemente de abordagens cuja decodificação pode ser inerentemente serial, os algoritmos de decodificação LDPC são adequados ao processamento paralelo, permitindo que grandes blocos de dados sejam processados simultaneamente. Isso possibilita implementações de hardware que atingem as velocidades de Gbps exigidas pelo eMBB. Em segundo lugar, isso resulta em baixa latência em blocos longos, pois, para os grandes volumes de dados usados para transmitir vídeo e outros dados de eMBB, a decodificação paralela do LDPC oferece uma latência geral mais baixa em comparação com os códigos turbo. Finalmente, os códigos LDPC apresentam um desempenho superior para blocos grandes, sendo conhecidos por sua performance excepcional especificamente em regimes de blocos de comprimento longo e taxas de código altas, que é exatamente o cenário dos canais de dados 5G (Ji, 2019).

Os códigos LDPC do 5G NR não apresentam comportamento aleatório; são altamente estruturados, o que permite implementações de *hardware* eficientes e flexíveis. O padrão 3GPP especifica uma família de códigos *Quasi-Cyclic* (QC-LDPC) (Rochol, 2012).

A construção de um código QC-LDPC no 5G é um processo de duas etapas. A primeira etapa envolve os Grafos Base (*Base Graphs*, BG). O padrão define duas matrizes relativamente pequenas, chamadas de Grafos Base. O Grafo Base 1 (BG1), usado para blocos de dados maiores e taxas de código mais altas, possui dimensões de 46×68 , enquanto o Grafo Base 2 (BG2), otimizado para blocos de dados menores e taxas de código mais baixas, possui dimensões de 42×52 . A seleção entre BG1 e BG2 é determinada pelo tamanho do bloco de transporte e pela taxa de código.

A segunda etapa é o *Lifting*, ou levantamento, no qual a matriz de paridade H final, de tamanho real, é criada a partir do Grafo Base selecionado por meio deste processo. Cada entrada no Grafo Base é substituída por uma matriz de permutação cíclica de tamanho $Z \times Z$. O valor Z , conhecido como tamanho de levantamento, é escolhido de um conjunto de valores padronizados para definir o comprimento do bloco desejado.

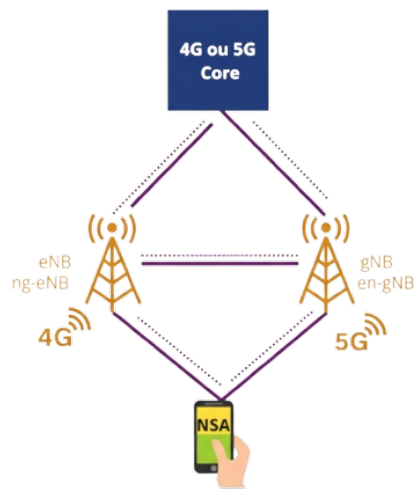
7.6 ARQUITETURAS DE IMPLANTAÇÃO

A interface de rádio 5G NR requer uma conexão a um núcleo de rede, existindo duas vias de implantação fundamentais, a Não-Autônoma (*Non-Standalone*, NSA) e a Autônoma (*Standalone*, SA).

A NSA é uma arquitetura de transição em que a estrutura do 5G é adicionada à infraestrutura 4G existente, conectando-se ao Core 4G. Neste modelo, o 4G atua como mestre, gerenciando todo o plano de controle, enquanto o 5G funciona apenas como um *booster* de dados. Essa configuração cria uma dependência estrutural do gNB em relação ao eNB, pois a sinalização fundamental continua ancorada no EPC, e o gNB só pode operar em conjunto com o LTE. Embora o usuário experimente maiores velocidades devido ao uso do NR no plano de usuário, a rede permanece limitada pelas capacidades do núcleo 4G, que não foi projetado para suportar a Arquitetura Baseada em Serviços nem o fatiamento de rede de ponta a ponta. Assim, o NSA permite uma introdução rápida e economicamente viável do 5G, mas não habilita funcionalidades avançadas como URLLC, mMTC em alta densidade ou o verdadeiro *network slicing*. Trata-se, portanto, de uma solução intermediária cuja principal função é acelerar o acesso inicial ao 5G, ao mesmo tempo em que evidencia a necessidade de migração futura para o modelo SA, no qual o 5GC assume integralmente o controle e possibilita o uso pleno das capacidades da nova geração.

Em contraste, a arquitetura SA é a arquitetura final, na qual o rádio 5G (gNB) conecta-se diretamente ao novo Core 5G, gerindo tanto o plano de controle quanto o de utilizador. A distinção é crítica porque o conjunto completo de serviços 5G, incluindo capacidades revolucionárias como Network Slicing, URLLC e mMTC, em escala, não é suportado pelo NSA. Isso ocorre porque o NSA ainda depende do núcleo da rede 4G, uma arquitetura monolítica que não foi desenhada para a Arquitetura Baseada em Serviços (*Service-Oriented Architecture*, SBA) ou para o fatiamento de rede ponta a ponta. Apenas o 5G SA permite que os slices virtuais definidos no 5GC sejam mapeados diretamente aos recursos flexíveis do rádio NR, tornando-o um pré-requisito para as verdadeiras capacidades 5G. A lenta adoção do SA evidencia que a migração 5G, mais complexa e cara, não é a instalação de antenas, mas a substituição do "cérebro" da rede, o EPC, pelo 5GC. A Figura 9 ilustra a estrutura de rede nos modos Standalone e Non Standalone.

Figura 9 – Arquiteturas de rede 5G, à esquerda a Arquitetura NSA com Dupla Conectividade (EN-DC), onde o dispositivo se conecta simultaneamente ao 4G e ao 5G, à direita a Arquitetura SA, onde toda a sinalização e tráfego de dados trafegam exclusivamente pela rede 5G.



(a) Arquiteturas Non-Standalone.



(b) Arquitetura Standalone.

Fonte: elaborado pelo autor.

O 5G é a geração mais recente aplicada na prática, e a Tabela 3 mostra um comparativo entre as tecnologias empregadas no 1G até o 5G.

Tabela 3 – Quadro comparativo da evolução tecnológica (1G ao 5G).

Ger.	Início (BR)	Arquitetura / Acesso	Modulação	Taxa (Pico)	Latência	Foco
1G	1990	Analógica / FDMA	FM	N/A	Alta	Voz
2G	~1998	Digital / TDMA	GMSK	~64 Kbps	> 300ms	Voz + SMS
3G	~2007	UTRAN / WCDMA	QPSK	2 – 14 Mbps	100–200ms	Internet Móvel
4G	2012	E-UTRAN / OFDMA	64-QAM	1-3 Gbps	< 50ms	Banda Larga
5G	2022	5GC (SBA) / 5G NR	256-QAM	20 Gbps	< 10ms	IoT / Crítico

Fonte: Elaborado pelo autor.

8 ERBS NO CONTEXTO BRASILEIRO

No contexto da infraestrutura das redes celulares brasileiras, as Estações Rádio Base desempenham um papel central na conexão entre os usuários e o núcleo da rede. Então, esse capítulo apresenta os tipos de ERBs atualmente utilizados no Brasil.

8.1 ARQUITETURA MODERNA DISTRIBUÍDA

A mudança da arquitetura antiga para a moderna permitiu maior eficiência, flexibilidade de instalação e redução de custos. Os principais elementos dessa arquitetura são a *Baseband Unit* (BBU), a *Remote Radio Unit* (RRU) e a antena. Responsável pelo processamento digital, a BBU atua como o “cérebro” da estação, ela executa o processamento de sinais, gerencia os recursos da célula, controla a operação da ERB e estabelece a ligação com o *backhaul*, conectando a estação à rede central da operadora. A RRU fica próxima à antena e realiza a conversão entre os sinais digitais enviados pela BBU e os sinais de radiofrequência transmitidos ao ambiente. Também é responsável pela filtragem e amplificação de RF, influenciando diretamente a cobertura e a capacidade da célula. Tradicionalmente passiva, é o elemento que irradia e recebe as ondas eletromagnéticas. Permite a comunicação sem fio com os dispositivos dos usuários. No 5G, evolui para antenas ativas com beamforming, integrando funções antes realizadas pela RRU (Dahlman, Parkvall e Sköld, 2020).

A adoção da arquitetura distribuída BBU–RRU representou uma das otimizações de engenharia mais significativas na evolução das redes móveis. Nos sistemas 2G e 3G, a unidade de RF integrada à BTS ou ao Node B era instalada em um *shelter* no solo, enquanto a antena ficava no topo da torre. Para conectar ambos, utilizava-se um cabo coaxial longo, muitas vezes com 30 a 50 metros de extensão. Esse arranjo introduzia perdas consideráveis por atenuação, sobretudo em frequências mais altas, resultando em desperdício de potência e redução da eficiência da célula. Com a migração para a arquitetura distribuída, a unidade de RF passou a ser externalizada como RRU e instalada no topo da estrutura, imediatamente abaixo da antena. Dessa forma, o trecho coaxial foi reduzido a poucos metros, o que diminuiu drasticamente as perdas da linha de alimentação. O percurso mais longo, antes realizado por cabo coaxial, passou a ser realizado por fibra óptica, que apresenta perda digital praticamente nula. A Figura 10 mostra como é uma RRU da marca Huawei.

Para que um site de telefonia móvel opere adequadamente, não basta a presença da unidade de processamento BBU e da unidade de rádio RRU. A BBU, instalada na base da torre ou em local centralizado, abriga os *Baseband Cards* (Placas de banda). Essas placas são o cérebro de cada tecnologia, como 4G ou 5G, executando todo o processamento digital em banda base, incluindo modulação, codificação e demais funções, antes de enviar o sinal digital à RRU via fibra óptica.

Após receber esse sinal, a RRU o converte para radiofrequência, amplifica-o e o prepara para transmissão. Entretanto, para que as diferentes tecnologias e bandas de frequência, conforme o portfólio da operadora naquele site, possam coexistir e compartilhar a mesma infraestrutura irradiadora, é necessário um conjunto de componentes passivos responsáveis pela integração dos sinais. Esses elementos são essenciais para o funcionamento eficiente e harmonioso de um site multitecnologia. Para isso, temos

os filtros, que mitigam interferência fora da banda e protegem o receptor de sinais indesejados. Um diplexer funciona combinando ou separando sinais de radiofrequência diferentes que usam frequências distintas, permitindo que eles compartilhem um único canal de comunicação. Eles realizam a junção e separação das frequências conectadas no equipamento, garantindo que ambas coexistam no mesmo canal de RF sem interferir entre si. Por fim, temos os combinadores, que combinam frequências iguais de gerações diferentes, possibilitando a comunicação entre tecnologias distintas, provenientes de RRUs distintas coexistam no mesmo canal de RF, seja integradas e encaminhadas para um único módulo irradiador, ou seja, a antena. A Figura 11 e a Figura 12 mostram, respectivamente, uma placa de banda e um diplexer.

Figura 10 – Equipamento *Remote Radio Unit Huawei 4G*. Este equipamento recebe os dados digitais da *baseband* e realiza a conversão para rádio frequência e envia à antena.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 11 – Equipamento Placa de banda Huawei para 2G a 5G. Realiza toda a "inteligência" do sinal (codificação, modulação e correção de erros) antes de enviar para a RRU



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 12 – *Diplexer* - Dispositivo passivo que combina ou separa bandas de frequências distintas, representado na imagem o equipamento que opera em 1020-2170Hz e 1710-1880Hz Permitindo o uso compartilhado de antenas (multi-bandas) e cabos.



Fonte: elaborado pelo autor.

Essa transformação aumentou a eficiência do sistema e foi decisiva para a operação em frequências mais altas, além de contribuir para a eficiência energética e para o desempenho exigido pelas redes 4G e 5G.

Por fim, o último estágio desse fluxo de transmissão na arquitetura distribuída é a interface com o meio de propagação, a antena. A evolução das redes móveis criou uma distinção fundamental na engenharia desses componentes, dividindo-os em antenas passivas e antenas ativas.

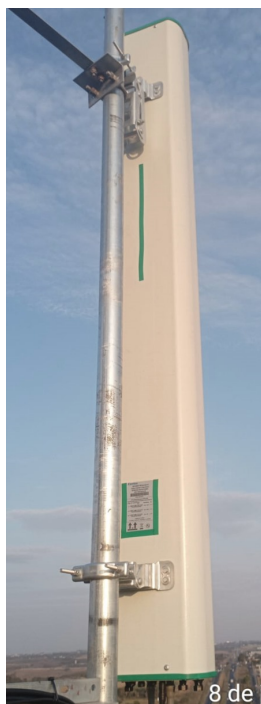
Nas gerações anteriores, o padrão predominante é o uso de antenas passivas. Nesse modelo, a antena é um elemento físico separado da unidade de rádio. A conexão entre a saída da RRU (ou dos combinadores/diplexers) e a entrada da antena é feita por meio de cabos coaxiais curtos e flexíveis, denominados *jumpers*. A função da antena passiva limita-se a moldar o diagrama de irradiação e transmitir o sinal que lhe é entregue; ela não realiza processamento digital nem amplificação interna. Embora robustas, elas introduzem perdas de inserção adicionais devido aos conectores e cabos de interconexão no topo da torre.

Com a demanda por maior eficiência espectral e a introdução do 5G, a arquitetura evoluiu para os sistemas de Antenas Ativas ou AAS (*Active Antenna Systems*). Diferente do modelo tradicional, a antena ativa integra a unidade de rádio e a matriz de elementos irradiantes dentro do mesmo chassi (*enclosure*). Essa fusão elimina a necessidade de cabos coaxiais externos entre o rádio e a antena, mitigando perdas de potência e simplificando a instalação física, reduzindo a poluição visual e a carga de vento em alguns cenários.

Além da vantagem física, a principal inovação das antenas ativas reside na capacidade de processamento inteligente. Ao controlar a fase e a amplitude do sinal em múltiplos elementos de antena individualmente, os sistemas AAS habilitam o uso de *Massive MIMO* e *Beamforming*. O *Beamforming* permite que a ERB focalize feixes de sinal diretamente para o dispositivo do usuário, em vez de irradiar energia uniformemente por todo o setor. Isso resulta em um aumento drástico na capacidade da célula

e na eficiência energética da rede, características mandatórias para o desempenho das redes de quinta geração e futuras evoluções. A Figura 13 e Figura 14 mostram, respectivamente, uma antena passiva e ativa.

Figura 13 – Modelo de Antena passiva com setores fixos de 1.5metros utilizada nas redes 2G a 4G.



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 – Modelo Antena Ativa com controle dinâmico de feixes 0.7metros AQQA Nokia 5G / Massive MIMO.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.2 SITE *GREENFIELD*

Um site *Greenfield*, no contexto de telecomunicações, é uma ERB instalada em terrenos, ou seja, no solo. O termo, traduzido como "campo verde", indica que o projeto é construído do zero. A equipe de implantação é responsável por todo o projeto estrutural *Greenfield*, que inclui a aquisição do terreno, a fundação, a construção da torre, a instalação de energia, o *backhaul* e os equipamentos, o que gera

um custo elevado em comparação com outros tipos de sites (Malaquias, Silva e Santos, 2020). A Figura 15 mostra uma torre construída em um terreno, caracterizando um *greenfield*. Esses tipos de sites se destacam pelo seu tamanho em relação aos outros tipos de ERBs.

Figura 15 – Modelo *Greenfield* torre autoportante triangular de 60metros, o qual exige fundações complexas e maior área de implementação.



Fonte: elaborado pelo autor.

A torre autoportante é uma das estruturas de suporte de antenas mais utilizadas em implantações *Greenfield*, especialmente em áreas suburbanas e rurais.

Do ponto de vista estrutural, trata-se de uma torre projetada para suportar grandes cargas e resistir a forças externas, como o vento e as intempéries. Seu principal diferencial está no próprio nome: é uma estrutura autoportante, ou seja, mantém-se em pé sem a necessidade de cabos ou estais, ao contrário das torres estaiadas. Isso confere maior robustez, ocupação de solo reduzida e versatilidade de instalação em diferentes tipos de terreno.

8.3 SITE *ROOFTOP*

Um site *Rooftop* é uma Estação Rádio Base instalada no pavimento de cobertura de edifícios, utilizando a infraestrutura já existente da construção para suportar seus equipamentos e antenas. Essa tipologia apresenta vantagens estratégicas importantes em áreas urbanas quando comparada às implantações *Greenfield*, como o aproveitamento de altura, o que reduz os custos de equipamentos e operacionais (Moraes, Oliveira e Silva, 2021).

O principal desafio associado às implantações *Rooftop* não está na área de telecomunicações, mas sim na engenharia civil. Antes de qualquer instalação, é obrigatória a elaboração de um Laudo Estrutural, documento técnico que verifica se o edifício é capaz de suportar os novos equipamentos. Esse laudo consiste em uma análise detalhada realizada por engenheiros civis, que avaliam a capacidade de carga da estrutura, considerando fatores como o peso dos equipamentos, os esforços adicionais provocados pelo vento, as possíveis vibrações e a integridade geral do prédio. Somente após essa aprovação, o projeto de implantação pode prosseguir.

As antenas e os RRUs não são fixados diretamente na laje do telhado. Elas exigem estruturas de

suporte dedicadas, como mastros, torres e treliças leves. O licenciamento de um site *Rooftop*, embora geralmente mais rápido do que o *Greenfield*, ainda enfrenta um grau de regulamentação.

Historicamente, os sites do tipo *Rooftop* constituem a espinha dorsal das redes de telecomunicações em áreas urbanas, uma vez que aproveitam a infraestrutura já existente dos edifícios para suportar antenas e equipamentos. A Figura 16 mostra como é um site *Rooftop* na prática.

Figura 16 – Modelo de Site *Rooftop* instalado no topo de um prédio em área urbana, solução fundamental para garantir cobertura em área de alta densidade populacional.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.4 BIOSITE

Um *BIOSITE*, também conhecido comercialmente como *Stealth Tower* (Torre Furtiva), refere-se a estações rádio-base projetadas para serem parcialmente escondidas com o objetivo de se misturarem ao ambiente em que estão inseridas.

A proposta central desse tipo de infraestrutura é a adoção de soluções de mimetização, que incluem tanto o disfarce das antenas quanto a ocultação dos equipamentos acessórios, por meio de elementos arquitetônicos ou paisagísticos. Essa abordagem busca tornar o site o menos perceptível possível ao público (Kurt e Yilmaz, 2019). A Figura 17 mostra como é um *BIOSITE*. Nela, podemos notar que o equipamento é instalado em poste metálico que se assemelha a um poste de iluminação e se mistura ao ambiente.

O modelo *BIOSITE* surge como uma resposta direta às crescentes preocupações estéticas relacionadas à implantação de infraestrutura de telecomunicações, especialmente em centros urbanos e em áreas de relevância histórica, turística ou ambiental. Ao reduzir o impacto visual, essas soluções contribuem para acelerar processos de licenciamento, que frequentemente enfrentam resistência por parte de moradores e órgãos municipais, e para aumentar a aceitação pública das novas instalações.

Figura 17 – Modelo poste metálico *BIOSITE* de 18 metros com *radome* que contém três antenas passivas setorizadas para 2G a 4G, o qual se camufla como poste de iluminação para se integrar harmonicamente ao ambiente urbano, os equipamentos, *basebands* e RRU's são instalados internamente.



Fonte: elaborado pelo autor.

8.5 SMALL CELLS

As *small cells* são definidas como nós de acesso de rádio celular compactos e de baixa potência, que atuam, na prática, como miniestações rádio-base. Embora desempenhem funções semelhantes às das ERBs tradicionais, sua lógica de implantação e seu papel no ecossistema móvel moderno são substancialmente distintos.

O ponto central que diferencia as *small cells* das macrocélulas, como torres *Greenfield* ou sites *Roof-top*, é o propósito. Enquanto as macros são projetadas primordialmente para cobertura, as *small cells* têm como missão principal a capacidade. Elas não visam estender o alcance do sinal, mas sim aumentar a capacidade da rede e melhorar a qualidade do serviço em regiões de tráfego intenso, atuando como elementos de densificação do ambiente urbano. Nesse contexto, atuam também como mecanismos de descarregamento do tráfego processado pelas macrocélulas. A Figura 18 mostra uma *small cell* instalada em uma região onde a demanda é maior. A adoção massiva de *small cell* está sendo impulsionada principalmente pelos requisitos da rede 5G. A Estratégia Brasileira de 5G, alinhada aos requisitos globais do IMT-2020, estabelece metas de desempenho inatingíveis apenas com macrocélulas (Andrews, 2014).

Figura 18 – Modelo *small cell* Nokia com antena 4G e 5G com *baseband* com aproximadamente 5 metros, focando em capacidade para suprir necessidade de conexões com os usuários em locais de alto tráfego, essenciais para densificação do 5G.



Fonte: elaborado pelo autor.

9 DISCUSSÕES

A análise do cenário atual do desenvolvimento tecnológico brasileiro no setor de telecomunicações revela um dado curioso. O Brasil demonstra uma alta taxa de sucesso na execução macro-regulatória e na implantação inicial do 5G, superando cronogramas e estabelecendo uma base robusta. No entanto, este sucesso "de cima para baixo" mascara desafios estruturais profundos na densificação da rede, no acesso do consumidor e na monetização de novos serviços, criando uma disparidade significativa entre a cobertura declarada e a experiência de valor do usuário (Ericsson, 2024).

A implementação do 5G no Brasil, do ponto de vista regulatório e de engenharia de espectro, tem sido uma história de notável eficiência. A cobertura 5G no país já ultrapassa as metas originalmente previstas para 2027 (ANATEL, 2025c). Três anos após o início de sua implantação, a tecnologia alcança mais de 70% da população brasileira, um ritmo de adoção que superou as expectativas.

O marco decisivo foi a gestão do espectro. A faixa de 3,5GHz, crucial para o 5G SA, que não depende da infraestrutura 4G e permite latência ultrabaixa, foi totalmente liberada em todos os 5.570 municípios brasileiros a partir de 2 de dezembro de 2024. Este esforço, conduzido pela Entidade Administradora da Faixa (EAF), foi concluído com 14 meses de antecedência em relação ao prazo final estipulado no edital. O modelo do leilão do 5G, estruturado pela Agência Nacional de Telecomunicações, foi um fator-chave (ANATEL, 2025a). A Anatel optou por trocar o pagamento em dinheiro pela outorga, que seria destinado ao Tesouro para o superávit primário, por obrigações de edital. Isso forçou as operadoras a converter o valor do espectro em investimentos diretos em infraestrutura, como a cobertura de municípios economicamente inviáveis (ANATEL, 2024).

O resultado é que as operadoras não apenas cumpriram 100% das metas de implantação estabelecidas para 2024, mas, já em novembro de 2024, haviam adiantado mais de 70% das metas previstas para 2025. A adoção inicial pelos usuários também foi acelerada. O 5G atingiu 10 milhões de acessos em apenas 10 meses, um marco que o 4G levou 26 meses para alcançar.

A Tabela 4 detalha o cronograma regulatório, contrastando os prazos de liberação da faixa com os de ativação.

O sucesso regulatório e de implantação macro é inegável. A Anatel foi eficaz ao elaborar um edital que impôs a cobertura básica. Contudo, este sucesso não se traduz automaticamente em uma experiência 5G de qualidade ou em uma revolução tecnológica disseminada. Os dados mostram que, enquanto a parte mais básica do 5G foi construída em tempo recorde, o acesso a dispositivos e monetização de aplicações de valor, enfrentam severas barreiras (ANATEL, 2025b).

Tabela 4 – Prazos e status de liberação e ativação da faixa de 3,5 GHz no Brasil

Escopo (Tamanho do Município)	Prazo do Edital para Liberação da Faixa (EAF/Anatel)	Prazo do Edital para Ativação (Obrigação da Operadora)	Status (Novembro 2024)
Capitais e DF	31 de Julho de 2022	N/A	Faixa 100% liberada
Municípios $\geq$ 200 mil hab.	31 de Julho de 2026	Até Julho de 2026	Faixa 100% liberada (antecipado)
Municípios $\geq$ 100 mil hab.	31 de Julho de 2027	Até Julho de 2027	Faixa 100% liberada (antecipado)
50% dos municípios $\geq$ 30 mil hab.	31 de Julho de 2028	N/A	Faixa 100% liberada (antecipado)
Totalidade (5.570 municípios)	N/A (Prazo final EAF: Jan 2026)	2028 – 2029 (Gradual)	Faixa 100% liberada em 02/Dez/2024
Ativação (Operadoras)	N/A	N/A	Ativação em 1.019 municípios (770 em 3,5 GHz)

Fonte: elaborado pelo autor.

Apesar da rápida liberação do espectro, a materialização das promessas do 5G, como a baixa latência e a alta capacidade, é impedida por dois gargalos físicos e estruturais. O primeiro é a extrema dificuldade burocrática para instalar a infraestrutura de rede necessária. O segundo é o alto custo dos dispositivos de acesso, os smartphones, para o consumidor final.

A tecnologia da quinta geração, especialmente nas frequências mais altas, que entregam maior capacidade, opera com alcances de sinal menores do que os do 4G. Isso exige uma densidade de antenas e de equipamentos muito maior para garantir a qualidade do serviço. Para o pleno funcionamento do 4G, o Brasil necessitaria de cerca de 300mil antenas; já para o 5G, esse índice atinge o patamar de 700mil unidades. Essa expansão depende crucialmente da instalação de *small cells* em locais urbanos, como postes, semáforos, prédios, entre outros (American Tower Corporation, 2024).

É aqui que reside o principal gargalo burocrático: a instalação dessas antenas depende de licenciamento municipal, e o Brasil possui mais de 200 leis municipais distintas sobre o tema. Cada uma apresenta regras, taxas e processos burocráticos específicos, o que resulta em uma lentidão extrema na implantação. Em determinado momento, menos de 8% das cidades brasileiras possuíam legislações de antenas adaptadas à nova realidade do 5G (Conexis, 2024).

O governo federal tentou endereçar o problema por meio da Lei Geral das Antenas (LGA), que, entre outras medidas, concede autorização automática para a instalação em até 60 dias, caso o órgão municipal competente não se manifeste. Contudo, a efetividade desta lei é limitada, pois enfrenta desafios relacionados à competência constitucional dos municípios sobre o uso do solo urbano, o que

torna o cenário geral mais complexo.

Um esforço de conscientização, o movimento ANTENE-SE foi criado em 2021 para incentivar a atualização legislativa. Como resultado, em maio de 2025, o Brasil celebrou o marco de 1.000 cidades com leis de antenas modernizadas (Brasil, 2025). Embora o número de 1.000 cidades pareça um avanço, a análise dos dados de implantação revela uma consequência preocupante. Essas 1.000 cidades concentram 85% todas as estações 5G instaladas no país. Isso demonstra que a expansão da rede 5G de qualidade não está seguindo a demanda populacional ou econômica, mas sim o caminho da menor resistência burocrática.

A falta de atualização das leis municipais cria um ciclo vicioso de desigualdade digital. As operadoras concentram investimentos nas 1.000 cidades com licenciamento ágil, em sua maioria capitais e centros urbanos mais ricos, que recebem infraestrutura densa e 5G de alta performance. Já as demais 4.570 cidades, com regras defasadas, ficam restritas a uma cobertura mínima, sem a densificação necessária, o que resulta em um serviço de baixa qualidade.

Enquanto isso, em áreas rurais, o desafio é ainda maior, devido à baixa densidade populacional e às dificuldades de adoção tecnológica. Menos de 20% da área agrícola brasileira possui cobertura 4G ou 5G. Embora o acesso à internet rural tenha crescido, impulsionado pelo Fundo de Universalização dos Serviços de Telecomunicações (FUST) e por tecnologias de satélite, o 5G terrestre permanece uma realidade distante para o agronegócio em larga escala na rede pública.

Como comentado anteriormente, o segundo desafio é o acesso ao dispositivo. O Brasil é o maior mercado de smartphones da América Latina, com 175 milhões de aparelhos ativos em 2024. No entanto, é um mercado notoriamente difícil para as fabricantes. O custo se manifesta de forma aguda neste setor, por meio de altos impostos de importação, Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), Imposto sobre o Valor Acrescentado (VATs) e forte pressão governamental para a produção local, como na Zona Franca de Manaus. A consequência direta, registrada por múltiplos relatórios de mercado, é o alto preço dos dispositivos (ABIEE, 2024).

Essa barreira econômica se intensificou drasticamente. Segundo dados da IDC, o preço médio dos celulares vendidos no Brasil disparou 88% entre o primeiro trimestre de 2024 e o primeiro trimestre de 2025, saltando de R\$ 1.361 para R\$ 2.557 (IDC, 2025).

Os modelos premium, que oferecem suporte completo ao 5G exigido pela Anatel, têm preços muito elevados, enquanto as opções mais acessíveis ainda ficam em torno de 1.800 reais. Consequentemente, o mercado permanece concentrado em fabricantes estabelecidas, como Samsung e Motorola, que possuem estrutura produtiva local para mitigar parte dos custos. Novos entrantes, como a Xiaomi, embora pressionem com dispositivos tecnológicos, enfrentam as mesmas barreiras tarifárias e logísticas para oferecer preços competitivos no mercado oficial.

Esses fatores resultam na chamada armadilha do 4G Premium, onde, embora o edital da Anatel tenha exigido o 5G Standalone e o Release 16 do 3GPP para garantir baixa latência e alta performance, na prática, muitos usuários permanecem limitados a experiências semelhantes ao 4G, incapazes de aproveitar plenamente o potencial do 5G. Portanto, os objetivos do edital são neutralizados pela realidade econômica do hardware, em que muitos desses aparelhos ostentam o logo 5G, porém não possuem compatibilidade plena com os recursos Standalone ou do Release 16, operando primariamente

em modo Non-Standalone, que depende do núcleo 4G. Assim, a estrutura de custos do país força o consumidor a comprar um aparelho 5G que, na prática, entrega uma experiência de 4G Premium que fornece uma velocidade maior, mas sem a revolução da baixa latência. As aplicações transformadoras que justificaram o edital permanecem inacessíveis à vasta maioria da população brasileira que adquire o 5G.

Enquanto o Brasil ainda enfrenta os desafios estruturais da implementação do 5G, a pesquisa e o desenvolvimento globais já estão focados na próxima geração, o 6G. Previsto para comercialização em massa por volta de 2030. O 6G não é uma evolução incremental como o 4G foi para o 3G, mas uma mudança de paradigma fundamental. A proposta é transformar a rede de dados em uma plataforma de inteligência ciberfísica. As métricas de desempenho do 6G representam um grande salto em relação ao 5G, indo além da mera comunicação para permitir a fusão entre o mundo digital e o físico (wang et al, 2023). O 6G promete um salto massivo no desempenho e na conectividade. A tecnologia busca atingir velocidades de até 1Tbps 50 a 100 vezes mais rápidas do que o pico teórico do 5G. Dessa forma, seria possível reduzir a latência aérea para menos de 100 microssegundos, possibilitando aplicações em tempo real críticas. Para isso, explorará faixas de frequência na região dos terahertz e integrará redes terrestres e não terrestres, garantindo cobertura universal para bilhões de dispositivos.

Esses parâmetros extremos são projetados para habilitar casos de uso que hoje parecem ficção científica, como Realidade Estendida Imersiva, hologramas móveis de alta fidelidade, comunicações cérebro-máquina, entre outros. A Tabela 5 mostra a comparação teórica entre o 5G e o 6G.

Tabela 5 – Comparativo de Métricas de Desempenho: 5G vs. 6G (Pico Teórico)

Característica	5G (IMT-2020)	6G (Visão IMT-2030)	Ordem de Grandeza
Velocidade de Pico	Até 10 – 20 Gbps	Até 1 Tbps (1.000 Gbps)	50–100x mais rápido
Latência Aérea	~1 ms (milissegundo)	< 100 μs (microssegundo)	10x mais rápido (e < 1 μs de jitter)
Espectro Principal	Sub-6 GHz e Ondas Milimétricas (mmWave)	mmWave e Terahertz (THz)	Novas bandas (maior capacidade, menor alcance)
Densidade	Milhares de dispositivos por km ²	Bilhões de dispositivos (cobertura ubíqua)	Suporte a IoT massivo e difuso

Fonte: elaborado pelo autor.

As métricas de performance são apenas a consequência de dois pilares conceituais que definem o 6G e representam a verdadeira ruptura em relação ao 5G. A rede como uma plataforma de IA nativa e a integração de sensoriamento e de comunicação. O 6G está sendo projetado desde o início para ser intrinsecamente baseado em Inteligência Artificial. Esta é uma diferença fundamental, pois o 5G

utiliza IA como uma aplicação que roda sobre a rede para otimizar operações, no 6G, a IA é a rede. A arquitetura 6G será IA-Nativa, o que significa que a IA será responsável pelo gerenciamento autônomo da rede, pela orquestração zero-touch, pela alocação de recursos em tempo real e até mesmo pela otimização da camada física e da forma de onda. A rede 6G será um sistema "autoevolutivo", capaz de aprender, prever e se adaptar dinamicamente ao ambiente e às demandas de uso. A implicação de negócios é profunda, pois a rede deixa de ser um provedor de conectividade para se tornar uma plataforma de inteligência distribuída. O novo modelo de negócios disruptivo que emerge é a IA como Serviço, em que a própria rede oferece poder computacional e inferência de IA.

O segundo pilar do 6G é o ISAC (Comunicação e Sensoriamento Integrados), que reúne, no mesmo hardware e no mesmo sinal de rádio, as funções de comunicação e de detecção. Com o uso de frequências em THz e antenas massivas, a rede 6G funcionará como um radar de altíssima resolução, transformando a RAN em uma grade de sensores distribuída capaz de “enxergar” o ambiente físico. Isso permitirá aplicações como o rastreamento preciso de objetos, o monitoramento ambiental e a reconstrução 3D de espaços.

A união da IA nativa e do ISAC marca a verdadeira revolução do 6G. A IA nativa funciona como o cérebro da rede, permitindo decisões autônomas, enquanto o ISAC atua como seus sentidos, captando o ambiente em tempo real. Juntos, transformam o 6G de uma simples rede de comunicação em um sistema operacional ciberfísico capaz de integrar plenamente o mundo físico e o digital.

Diante dessa ruptura tecnológica, o Brasil demonstra uma maturidade estratégica surpreendente. Ao contrário das gerações anteriores de telecomunicações, em que o país foi primariamente um consumidor passivo de tecnologia, o Brasil está, para o 6G, montando uma estratégia nacional proativa, coordenada e financiada para ser um participante ativo na pesquisa e desenvolvimento (P&D).

O Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) coordena o Projeto Brasil 6G, um esforço nacional de pesquisa e desenvolvimento liderado pelo Inatel e pela Rede Nacional de Ensino e Pesquisa (RNP). O projeto reúne instituições de destaque, como o Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações (CPQD), a Unicamp e diversas universidades federais, formando um consórcio nacional voltado à inovação em redes de próxima geração. Além disso, conta com parcerias internacionais, como a colaboração com a Universidade de Oulu, na Finlândia, referência global em pesquisas sobre 6G. As linhas de pesquisa do Projeto Brasil 6G estão plenamente alinhadas aos pilares globais do 6G. Os grupos de trabalho atuam em áreas como RF, comunicações ópticas, IA nativa e ISAC, com foco em inteligência artificial aplicada a redes e em sensoriamento e mapeamento de alta definição. Essa estratégia é sustentada por investimentos robustos, incluindo o aporte de 180 milhões de reais do MCTI, em parceria com a Embrapii, para a criação de três Centros de Competência dedicados a tecnologias de fronteira.

O Inatel foi escolhido para sediar o Centro de Competência em Tecnologia e Infraestruturas de Conectividade 5G e 6G, com o objetivo de impulsionar a reindustrialização do país em novas bases. A iniciativa busca integrar a academia e o setor produtivo no desenvolvimento de soluções de alta complexidade tecnológica, com destaque para pesquisas em *Open RAN* feitas pelo CPQD, sendo uma área estratégica que visa reduzir a dependência de fornecedores tradicionais e fortalecer a autonomia tecnológica nacional (Brasil, 2025). A estruturação do ecossistema 6G no Brasil revela uma estratégia

inédita e coordenada. O país formou um “triângulo dourado” entre governo, academia e centros de P&D, atuando de forma integrada e com financiamento consistente para desenvolver tecnologias de fronteira antes de sua consolidação comercial.

O desafio agora é alinhar o esforço nacional ao cronograma global de padronização, liderado pela ITU, que definirá os requisitos do IMT-2030 (6G) até 2026 e avaliará tecnologias candidatas entre 2027 e 2029. E, com a Release 20 (2025) do 3GPP, iniciaram-se os estudos técnicos e o Release 21 (2027) trará as primeiras especificações formais.

Em 2025, o Brasil deu um passo diplomático decisivo ao sediar o HUDDLE 2025, principal evento internacional do *Wireless World Research Forum* (WWRF), reunindo pesquisadores, indústrias e reguladores globais. No evento, a Anatel defendeu a posição brasileira em favor da harmonização do espectro e da padronização global. Diferentemente do 5G, quando o país apenas adotou padrões existentes, o Brasil agora busca gerar propriedade intelectual local e influenciar as normas internacionais. Assim, o país passa de ser um país que segue os padrões para um que ajuda a moldar as regras no cenário global das telecomunicações.

10 CONCLUSÃO

Este trabalho analisou de forma integrada a evolução das redes de comunicação móvel, desde seus fundamentos analógicos na primeira geração até a complexa arquitetura de plataforma do 5G, com foco no contexto da implementação brasileira e análise dos desafios e oportunidades estratégicas que a sexta geração representa para o país. Ao longo deste trabalho, os objetivos propostos foram sistematicamente atingidos, abrangendo desde os princípios físicos da propagação de sinal até a análise das políticas públicas que moldam o cenário nacional.

A trajetória evolutiva, descrita nos capítulos 3, 4 e 5, demonstrou que cada geração foi uma resposta direta aos gargalos de engenharia da geração anterior. O estudo revisitou o 1G e seu padrão AMPS, que estabeleceu o conceito de mobilidade por meio da voz analógica e do acesso FDMA. A revolução digital do 2G, com os padrões GSM e a introdução do TDMA, foi apresentada como a chave para a massificação do serviço, trazendo melhorias de segurança e de eficiência espectral, além de habilitar serviços como o SMS e o cartão SIM. O 3G, fundamentado no robusto WCDMA, foi analisado como o verdadeiro viabilizador da internet móvel, consolidando a transmissão de dados. Por fim, o 4G (LTE) e suas evoluções, como o *LTE-Advanced*, foram detalhados e descritos como a consolidação da banda larga móvel, sustentada por uma arquitetura All-IP (E-UTRAN) e técnicas de rádio eficientes como o OFDMA e o SC-FDMA, que resolveram desafios críticos como o PAPR no uplink.

Este trabalho demonstrou que o 5G representa uma ruptura fundamental em relação a essa progressão incremental. Como detalhado no capítulo 5, o 5G foi concebido não apenas para conectar pessoas, mas também como uma plataforma de infraestrutura para conectar coisas, sustentando os três pilares heterogêneos: eMBB, URLLC e mMTC. Esta pesquisa concluiu que tal ambição exigiu uma reinvenção arquitetônica completa, materializada no 5G Core. A transição para uma arquitetura baseada em serviços, nativa em nuvem, foi identificada como o pilar tecnológico que habilita a funcionalidade mais revolucionária do 5G, o *Network Slicing*, essencial para a Indústria 4.0 e para comunicações de missão crítica, pois permite a criação de várias redes virtuais independentes dentro da mesma rede física.

No contexto brasileiro, a análise da infraestrutura prática no capítulo 6 forneceu a ponte entre a teoria de RF e os desafios de implementação no mundo real. O capítulo 7 apresentou a tese central deste trabalho. De um lado, o país demonstrou um sucesso regulatório e estratégico notável. A análise do leilão de 5G de 2021, conduzido pela ANATEL, revelou uma maturidade institucional, com o leilão transitando de um modelo primariamente arrecadatário para um instrumento de política pública. Ao substituir o valor da outorga por obrigações de investimento, a ANATEL garantiu a rápida liberação de faixa e o cumprimento de metas de cobertura antes dos prazos estipulados.

Contudo, este sucesso macro-regulatório é, na prática, neutralizado por gargalos estruturais crônicos. A pesquisa identificou dois grandes obstáculos. O primeiro é a barreira burocrática: a necessidade técnica de densificação da rede 5G com Small Cells colide diretamente com a existência de mais de 200 leis municipais de antenas distintas. A evidência de que 85% das estações 5G estão concentradas nas 1.000 cidades com leis modernizadas demonstra que a expansão da rede segue o caminho da menor resistência legal, e não o da demanda.

O segundo obstáculo é econômico. O alto custo dos dispositivos, com o preço médio dos smartphones disparando 88% em um ano, força o consumidor a buscar aparelhos com o selo 5G, mas que, por questões de custo, não suportam os recursos completos do 5G *Standalone*. Este fenômeno, identificado como a "armadilha do 4G Premium", leva à conclusão preocupante de que a maioria dos usuários opera em modo *Non-Standalone*, ancorados ao *Core* 4G. Consequentemente, as capacidades revolucionárias do 5G, que dependem da arquitetura 5GC, permanecem inacessíveis à massa, adiando a transformação digital prometida pela Indústria 4.0 e pelo IoT.

Diante dos desafios do 5G, a prospecção do 6G revelou-se a principal janela de oportunidade para o Brasil. O 6G foi definido não como uma evolução, mas como uma nova revolução ciberfísica, baseada nos conceitos de IA nativa e sensoriamento e comunicação integrados. A conclusão mais significativa deste trabalho é a mudança de postura estratégica do Brasil, pela qual, pela primeira vez, o país não se posiciona como um mero adotante de tecnologia, mas como um contribuinte ativo.

O Projeto Brasil 6G, coordenado pelo MCTI e liderado por instituições de ponta, como o Inatel e o RNP, com investimentos robustos e linhas de pesquisa alinhadas às fronteiras globais, é a evidência concreta dessa ambição. Este trabalho cumpriu, portanto, seus objetivos ao mapear a evolução técnica da radiofrequência e, crucialmente, ao diagnosticar o paradoxo da implementação do 5G no Brasil. A lição do 5G é clara: o sucesso do Brasil no 6G dependerá não apenas da excelência em pesquisa e desenvolvimento, mas também da capacidade do país de solucionar seus gargalos estruturais, para que possa, enfim, transcender seu papel histórico de consumidor e se tornar um desenvolvedor ativo na próxima revolução das comunicações globais.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). **Gaispi concluiu liberação da faixa de 3,5 GHz em todos os municípios brasileiros**. Brasília, DF, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias>. Acesso em: 06 nov. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). **Painel de dados:** acompanhamento da implantação do 5G no Brasil. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/5g-completa-dois-anos-de-implantacao-no-brasil>. Acesso em: 06 nov. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). **Relatório anual de gestão 2024**. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://abre.ai/relatorio2024gov>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES (Brasil). **Cobertura de 5G no Brasil já supera meta prevista para 2027**. Agência Gov, Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://abre.ai/5570municipiosbrasileiros>. Acesso em: 13 nov. 2025.
- AFIF, A. *et al.* **Network slicing in 5g: survey and challenges**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, [S. l.], v. 19, n. 3, p. 1572–1594, 2017.
- ALMEIDA, I. P. de. **Novo modelo de propagação de sinais no espaço livre**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014.
- AMERICAN TOWER CORPORATION. **2025 Latin American tower industry study report**. Boston, MA: American Tower Corporation, 2024. Disponível em: <https://abre.ai/americatowercorporation>. Acesso em: 12 nov. 2025.
- ANDREWS, J. G. *et al.* **An overview of small cell technology**. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, [S. l.], v. 32, n. 6, p. 1065–1082, 2014.
- ARIKAN, E. **Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels**. IEEE Transactions on Information Theory, [S. l.], v. 55, n. 7, p. 3051–3073, 2009.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA. **Panorama econômico e desempenho setorial da indústria elétrica e eletrônica**. São Paulo, 2024. Relatório Anual. Disponível em: <http://www.abinee.org.br>. Acesso em: 06 dez. 2025.
- BALANIS, C. A. **Advanced engineering electromagnetics**. [S. l.]: Wiley, 1989.
- BARROS, M. G. D. **Estudo, implementação e análise de métodos de polarização de canal para códigos polares em cenários de 5G NR**. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Telecomunicações) – Faculdade de Engenharia de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São João da Boa Vista, SP, 2024. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/259226>.
- BERROU, C.; GLAVIEUX, A.; THITIMAJSHIMA, P. **Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: turbo-codes**. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMMUNICATIONS (ICC), 1993, Genebra, Suíça. **Proceedings of ICC '93 - IEEE International Conference on Communications**. [S. l.]: IEEE, 1993. v. 2, p. 1064–1070.
- BRASIL. Ministério das Comunicações. **Brasil alcança marco de 1.000 cidades com lei de antenas atualizadas e avança rumo à conectividade plena**. Brasília, DF, 2025. Disponível em:

<https://www.gov.br/mcom/pt-br/noticias/2025/maio/brasil-alcanca-marco-de-mil-cidades-com-lei-de-antenas-atualizadas-e-avanca-rumo-a-conectividade-plena>. Acesso em: 12 nov. 2025.

CARDOSO, W; BOAVENTURA, A. **Como o 6G Vai Moldar a Próxima Década**. 2023. Disponível em: https://teleco.com.br/artigos/6g_artigos.asp. Acesso em: 20 set. 2025.

CONCEIÇÃO, S. B.; LIMA, M. de S.; SILVA, V. **Historicidade da rede 5g (quinta geração)**. Revista Scientia, [S. l.], v. 8, n. 2, p. 1–15, 2023. Disponível em: <https://revistas.uneb.br/index.php/scientia/article/view/15865>. Acesso em: 06 dez. 2025.

CONEXIS BRASIL DIGITAL. **Ranking das Cidades Amigas do 5G**: Edição 2024. 2024. Sindicato Nacional das Empresas de Telefonia e de Serviço Móvel, Celular e Pessoal. Disponível em: <https://conexis.org.br/numeros/ranking-das-cidades-amigas-do-5g/>. Acesso em: 06 dez. 2025.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. **4G: LTE/LTE-Advanced for mobile broadband**. 2. ed. [S. l.]: Academic Press, 2014.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. **4G, LTE-Advanced pro and the road to 5G**. 3. ed. [S. l.]: Academic Press, 2016.

DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. **5G NR: the next generation wireless access technology**. 2. ed. [S. l.]: Academic Press, 2020.

D'APRILE, M. S. G. T. Trajetórias tecnológicas da indústria de telefonia móvel. *São Paulo em Perspectiva*, São Paulo, v. 21, n. 2, p. 82–95, 2007. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ecos/a/xLX4ZnNfTHbBTBJ9VqHLJmB/?format=pdf>.

EBERSPÄCHER, J. *et al.* **GSM - architecture, protocols and services**. 3. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2008.

ERICSSON. **Ericsson mobility report: business review edition**. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>. Acesso em: 06 dez. 2025.

FOUKAS, X. *et al.* **Network slicing in 5G: survey and challenges**. IEEE Communications Magazine, [S. l.], v. 55, n. 5, p. 94–100, 2017.

GOLDSMITH, A. **Wireless communications**. [S. l.]: Cambridge University Press, 2005.

HAGENAUER, J.; OFFER, E.; PAPKE, L. **Iterative decoding of binary block and convolutional codes**. IEEE Transactions on Information Theory, [S. l.], v. 42, n. 2, p. 429–445, 1996.

HOLMA, H.; TOSKALA, A. **LTE-Advanced: 3GPP solution for IMT-Advanced**. [S. l.]: Wiley, 2012.

HUANG, T. *et al.* **A survey on green 6g network: architecture and technologies**. *IEEE Access*, [S. l.], v. 7, p. 175758–175768, 2019.

INTERNATIONAL DATA CORPORATION BRASIL. **IDC Brazil quarterly mobile phone tracker – Q1 2025**. [S. l.], 2025. Relatório de Análise de Mercado. Disponível em: https://my.idc.com/getdoc.jsp?containerId=IDC_P26424. Acesso em: 09 dez. 2025.

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. **Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond (IMT-2030)**. Geneva, Switzerland, 2023. Disponível em: Recommendation ITU-R M.2160-0 (11/2023) - Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2030 and beyond. Acesso em: 09 dez. 2025.

JI, H. *et al.* **Overview of channel coding in 5g new radio**. *IEEE Communications Standards Magazine*, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 76–83, 2019.

KURT, G.; YILMAZ, H. B. **Camouflaged base stations for wireless networks: design principles**

and deployment considerations. *IEEE Communications Magazine*, [S. l.], v. 57, n. 11, p. 18–24, 2019.

LEITE, R. R. S. **Análise de desempenho de redes sem fio em ambientes indoor utilizando o modelo de propagação log-distância.** 2016. Trabalho de conclusão de curso. (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), João Pessoa, 2016.

LEMOS, S. Brasil ainda não está pronto para a nova tecnologia do 6G. **Jornal da USP**, São Paulo, 8 ago. 2025. Disponível em: <https://jornal.usp.br/atualidades/brasil-ainda-nao-esta-pronto-para-a-nova-tecnologia-do-6g/>. Acesso em: 20 set. 2025.

MALAQUIAS, M. A. C.; SILVA, L. C. R.; SANTOS, D. R. Eficiência energética em estação rádio base: proposta e estudo de caso. *RETEC – Revista de Tecnologia*, Paraíba, v. 13, n. 2, p. 43–55, 2020.

MOLISCH, A. F. **Wireless communications.** [S. l.]: Wiley-IEEE Press, 2011.

MORAES, A. L.; OLIVEIRA, L. S.; SILVA, R. F. **Análise estrutural para instalação de equipamentos de telecomunicações em coberturas de edificações.** *Revista de Engenharia Civil IMED*, Passo Fundo, v. 8, n. 1, p. 55–70, 2021.

NYQUIST, H. **Certain topics in telegraph transmission theory.** *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, [S. l.], v. 47, n. 2, p. 617–644, 1928.

ORDONEZ-LUCENA, J. *et al.* **Network slicing in 5G: survey and challenges.** *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, [S. l.], v. 19, n. 1, p. 1572–1594, 2017.

PROAKIS, J. G.; SALEHI, M. **Digital communications.** 5. ed. New York: McGraw-Hill, 2007.

RAPPAPORT, T. S. **Comunicações sem fio: princípios e práticas.** 2. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

RAPPAPORT, T. S. **Wireless communications: principles and practice.** 2. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.

RAPPAPORT, T. S. *et al.* **Overview of millimeter wave communications for fifth-generation (5g) wireless networks** – with a focus on propagation models. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, [S. l.], v. 65, n. 12, p. 6213–6230, 2017.

REIS, R. **4G - LTE/LTE-A: Coursework for computer networks II.** 2014. Disponível em: https://www.gta.ufjf.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2014_2/rafaelreis/ofdma_scdma.html. Acesso em: 18 out. 2025.

ROCHOL, J. **Comunicação de dados.** Porto Alegre: Bookman, 2012. v. 22. *E-book*. ISBN 9788540700536. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788540700536/>. Acesso em: 02 dez. 2025.

SAAD, W.; BENNIS, M.; CHEN, M. **A vision of 6g wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems.** *IEEE Network*, [S. l.], v. 34, n. 3, p. 134–142, 2019.

SAUTER, M. **From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: an introduction to mobile networks and mobile broadband.** 3. ed. [S. l.]: John Wiley & Sons, 2017.

SESLIA, S.; TOUFIK, I.; BAKER, M. **LTE – the UMTS long term evolution: from theory to practice.** 2. ed. [S. l.]: Wiley, 2011.

SEYBOLD, J. S. **Introduction to RF propagation.** [S. l.]: Wiley, 2005.

SKLAR, B. **Rayleigh fading channels in mobile digital communication systems part I:**

characterization. IEEE Communications Magazine, [S. l.], 2001. Dados de volume/número/página não informados.

THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. TR 21.905: **Vocabulary for 3GPP specifications**. Versão 7.0.0. [S. l.]: 3GPP, 2006. Disponível em: Directory Listing /ftp/Specs/archive/21_series/21.905/. Acesso em: 13 nov. 2025.

THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **Common baseline information model (CBIM)**. Versão 17.0.0. [S. l.]: 3GPP, 2023. Disponível em: Directory Listing /ftp/Specs/archive/32_series/32.182/. Acesso em: 13 nov. 2025.

THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **E-UTRA and E-UTRAN**; Overall description; stage 2. Versão 15.0.0. [S. l.], 2018. Disponível em: Directory Listing /ftp/Specs/archive/36_series/36.300/. Acesso em: 13 nov. 2025.

THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **Study on scenarios and requirements of in-coverage, partial coverage, and out-of-coverage positioning use cases**. Versão 16.0.0. [S. l.], 2020. Disponível em: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.845. Acesso em: 13 nov. 2025.

THIRD GENERATION PARTNERSHIP PROJECT. **Principles and guidelines for services in the 5G system (5GS)**. Versão 17.5.0. [S. l.], 2023. Disponível em: Directory Listing /ftp/Specs/archive/38_series/38.845. Acesso em: 13 nov. 2025.

TROVÃO, R. d. S. **Sexta geração das redes móveis celulares (6G): uma análise sobre seu desenvolvimento e possíveis aplicações no meio naval**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização *Latou Sensu*) – Escola de Guerra Naval, Rio de Janeiro, RJ, 2023.

VITERBI, A. J. **Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimum decoding algorithm**. IEEE Transactions on Information Theory, [S. l.], v. 13, n. 2, p. 260–269, 1967.

VUCETIC, B.; YUAN, J. **Turbo codes: principles and applications**. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2000.

WANG, C. *et al.* **On the road to 6G: visions, requirements, key technologies and testbeds**. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2023. **ArXiv**:2302.14536. doi: 10.1109/COMST.2023.3249835. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/2302.14536>. Acesso em: 13 nov. 2025.