

DOMINANDO AS REDES 5G

Do Básico das Telecomunicações aos
Detalhes de Implementação,
Dimensionamento e Futuro do 5G

AMOSTRA



WAGNER ROMANO BOMFIM

Para adquirir o livro completo acesse: livros.wagner.com.br

DOMINANDO AS REDES 5G

Do Básico das Telecomunicações aos Detalhes de Implementação, Dimensionamento e Futuro do 5G

Resumo:

Este livro é a referência técnica mais completa sobre redes 5G Standalone (SA) e Non-Standalone (NSA). Com abordagem detalhada desde os fundamentos das telecomunicações até as implementações avançadas de network slicing e edge computing, a obra é essencial para engenheiros, arquitetos de rede e estudantes que buscam dominar os detalhes técnicos das arquiteturas 5G.

Destaques:

- ✓ Arquitetura 5GC e EPC
- ✓ Implementação SA e NSA Passo a Passo
- ✓ Network Slicing e MEC
- ✓ Ondas Milimétricas e Massive MIMO
- ✓ Casos de Uso Reais e Métricas de Desempenho

Autor: Wagner Romano Bomfim

Concluído em: 28/10/2025

Para adquirir o livro completo acesse: livrowagner.com.br

AMOSTRA

PREFÁCIO

Estamos testemunhando uma das transformações mais significativas na história das telecomunicações. O 5G não representa meramente uma evolução incremental em velocidade de dados; trata-se de uma revolução completa que redefine o papel das redes móveis em nossa sociedade. Esta tecnologia habilita um ecossistema completamente novo de aplicações e serviços que vão desde a internet tátil até as fábricas inteligentes, veículos autônomos e cirurgias remotas.

Este livro nasceu da necessidade clara de um material abrangente e técnico que explicasse não apenas os conceitos fundamentais do 5G, mas que se aprofundasse nas duas arquiteturas de implantação cruciais: **Standalone (SA)** e **Non-Standalone (NSA)**. Enquanto a maioria dos materiais disponíveis trata superficialmente desses conceitos, nossa missão aqui é proporcionar uma imersão técnica completa, detalhando minuciosamente os componentes, protocolos, fluxos de sinalização e casos de uso de cada arquitetura.

O público-alvo inclui engenheiros de telecomunicações, estudantes de engenharia, profissionais de TI, arquitetos de rede e qualquer entusiasta de tecnologia que deseje compreender verdadeiramente os meandros técnicos das redes 5G. Nosso objetivo é que, ao final desta obra, o leitor possua não apenas conhecimento teórico, mas também uma compreensão prática robusta suficiente para participar ativamente de projetos de implantação, otimização e operação de redes 5G.

Boa leitura e bem-vindo à próxima fronteira das comunicações móveis!

Ibiapina/CE, 28/10/2025

Para adquirir o livro completo acesse: livrowagner.com.br

SUMÁRIO EXECUTIVO

Capítulo 1: Fundamentos das Telecomunicações Móveis

- 1.1. Introdução à Comunicação sem Fio
- 1.2. O Espectro Eletromagnético
- 1.3. Conceitos Chave: Modulação e Multiplexação
- 1.4. A Evolução das Gerações Móveis

Capítulo 2: A Arquitetura do 4G LTE

- 2.1. Visão Geral da Arquitetura EPC
- 2.2. Componentes Principais do EPC
- 2.3. A Rede de Acesso Rádio: eNodeB
- 2.4. O Protocolo de Sinalização: Diameter
- 2.5. Limitações do 4G LTE

Capítulo 3: Introdução ao 5G

- 3.1. Os Três Pilares do 5G
- 3.2. Principais Casos de Uso
- 3.3. Métricas de Desempenho

Capítulo 4: A Revolução na Rede de Acesso Rádio

- 4.1. Novas Faixas de Frequência
- 4.2. Tecnologias de Antenas: Massive MIMO
- 4.3. O gNodeB
- 4.4. Arquiteturas de Rede Avançadas
- 4.5. Divisão de Camadas na RAN

Capítulo 5: O Núcleo da Rede 5G

- 5.1. Princípios da Arquitetura Baseada em Serviços
- 5.2. Componentes Principais do 5GC
- 5.3. Separação Plano de Controle/Usuário
- 5.4. A API de Sinalização: HTTP/2 e JSON

Capítulo 6: 5G Non-Standalone

- 6.1. O Conceito do 5G NSA
- 6.2. Opções de Implementação
- 6.3. Arquitetura NSA
- 6.4. O Papel do EPC do 4G
- 6.5. Vantagens e Desvantagens
- 6.6. Fluxo de Atach e Dados

Capítulo 7: 5G Standalone

- 7.1. O Conceito do 5G SA
- 7.2. Arquitetura SA
- 7.3. Benefícios Chave do SA
- 7.4. O Processo de Registro no 5GC
- 7.5. Service-Based Interactions
- 7.6. Fluxo de Atach e Dados

Capítulo 8: Comparação Detalhada

- 8.1. Tabela Comparativa
- 8.2. Por que Migrar do NSA para o SA?
- 8.3. Desafios da Migração

Capítulo 9: Divisão de Camadas e Edge Computing

- 9.1. O Conceito de Network Slicing
- 9.2. Implementação do Slicing no 5G SA
- 9.3. Casos de Uso para Diferentes Slices
- 9.4. Edge Computing
- 9.5. Integração entre MEC e 5G SA

Capítulo 10: O Futuro

- 10.1. Lições Aprendidas com o 5G
- 10.2. Vislumbres do 6G
- 10.3. Considerações Finais

Apêndices

- Apêndice A: Glossário
- Apêndice B: Referências

CAPÍTULO 1: FUNDAMENTOS DAS TELECOMUNICAÇÕES MÓVEIS

1.1. Introdução à Comunicação sem Fio

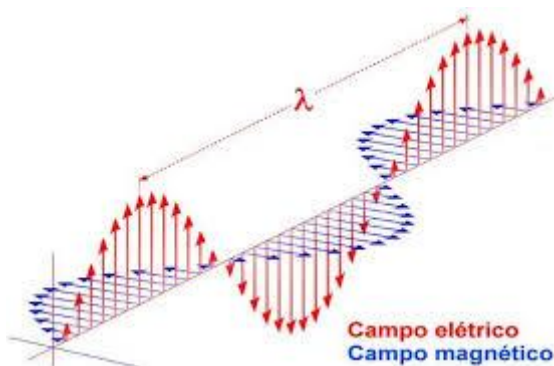
A comunicação sem fio representa um dos pilares fundamentais da sociedade moderna conectada. Em sua essência, trata-se da transmissão de informação através do espaço utilizando ondas eletromagnéticas, eliminando a necessidade de condutores físicos ou cabos. Esta forma de comunicação revolucionou a maneira como nos relacionamos, trabalhamos e acessamos informações.

Princípios Básicos de Propagação:

As ondas de rádio se propagam no espaço livre seguindo princípios físicos bem estabelecidos. O transmissor converte sinais elétricos em ondas eletromagnéticas através de uma antena, enquanto o receptor realiza o processo inverso. Entre estes dois pontos, diversos fenômenos físicos afetam a propagação:

- **Reflexão:** Ocorre quando a onda encontra uma superfície grande em relação ao seu comprimento de onda (edifícios, montanhas)

- **Difração:** Permite que as ondas contornem obstáculos devido ao espalhamento
- **Espalhamento:** Ocorre quando a onda encontra superfícies irregulares
- **Atenuação:** Redução gradual da intensidade do sinal com a distância



A compreensão destes fenômenos é crucial para o planejamento eficiente de redes móveis, pois determinam diretamente a qualidade de cobertura, a capacidade do sistema e a experiência do usuário final.

1.2. O Espectro Eletromagnético

O espectro eletromagnético compreende toda a gama de radiação eletromagnética, desde as frequências mais baixas (ondas de rádio) até as mais altas (raios gama). Para telecomunicações móveis, trabalhamos principalmente com a porção de Radiofrequência (RF) do espectro.

Características Fundamentais:

- **Frequência (f):** Número de ciclos completos por segundo, medido em Hertz (Hz)
- **Comprimento de onda (λ):** Distância entre dois pontos correspondentes em ondas consecutivas
- **Relação Fundamental:** $c = f \times \lambda$, onde c é a velocidade da luz (3×10^8 m/s)

Bandas de Frequência em Telecomunicações

Móveis:

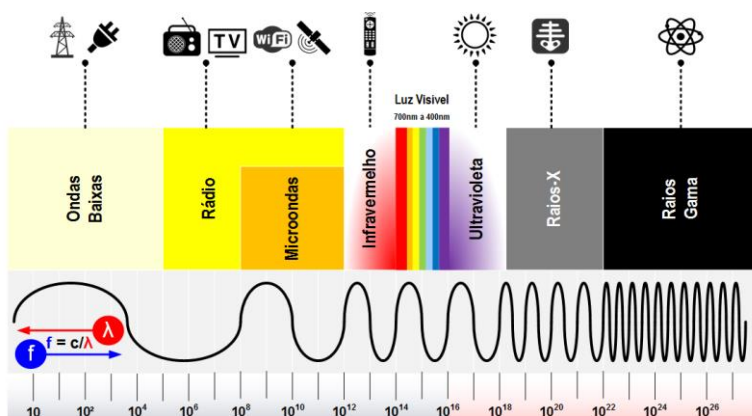
Bandas Sub-6 GHz:

- **600-900 MHz:** Excelente propagação, ideal para cobertura rural e interior de edifícios
- **1.8-2.5 GHz:** Balance entre cobertura e capacidade, amplamente utilizada no 4G

- **3.3-4.2 GHz:** Bandas primárias para 5G Sub-6, oferecendo bom balance

Bandas mmWave (Ondas Milimétricas):

- **24-29 GHz:** Banda Ka, alta capacidade mas menor alcance
- **37-40 GHz:** Banda Ka adicional
- **64-71 GHz:** Banda V, capacidade extremamente alta



Gestão do Espectro:

O espectro é um recurso finito e escasso, rigorosamente regulado por agências

governamentais (ANATEL no Brasil, FCC nos EUA). As operadoras adquirem licenças através de leilões para operar em bandas específicas, garantindo que não haja interferência entre diferentes serviços.

1.3. Conceitos Chave: Modulação e Multiplexação

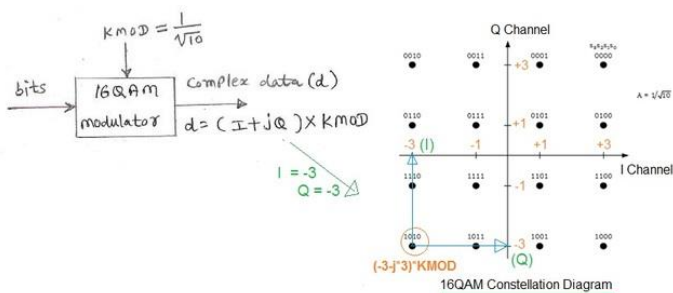
Técnicas de Modulação:

A modulação é o processo de impressão da informação em uma onda portadora de alta frequência. As técnicas principais incluem:

- **AM (Amplitude Modulation):** Varia a amplitude da portadora
- **FM (Frequency Modulation):** Varia a frequência da portadora
- **PM (Phase Modulation):** Varia a fase da portadora
- **QAM (Quadrature Amplitude Modulation):** Combina variações de amplitude e fase

Evolução para o 5G:

O 5G utiliza principalmente **256-QAM** e **1024-QAM**, permitindo transmitir mais bits por símbolo, aumentando significativamente a eficiência espectral.



Técnicas de Multiplexação e Acesso Múltiplo:

- **FDMA (Frequency Division Multiple Access):** Divide o espectro em canais de frequência
- **TDMA (Time Division Multiple Access):** Divide o tempo em slots
- **CDMA (Code Division Multiple Access):** Utiliza códigos para separar usuários
- **OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access):** Utilizado no 4G/5G, divide o espectro em múltiplas subportadoras ortogonais

OFDMA no 5G:

O 5G utiliza OFDMA com subportadoras de 15, 30, 60, 120 ou 240 kHz, comparado aos 15 kHz fixos do

4G. Esta flexibilidade permite otimizar a rede para diferentes cenários.

1.4. A Evolução das Gerações Móveis

1G - Primeira Geração (1980s):

- Tecnologia analógica
- Apenas serviços de voz
- Baixa segurança e qualidade
- Sistemas: AMPS, TACS, NMT

2G - Segunda Geração (1990s):

- Transição para digital
- Voz e SMS
- Introdução de criptografia
- Sistemas: GSM, CDMA

3G - Terceira Geração (2000s):

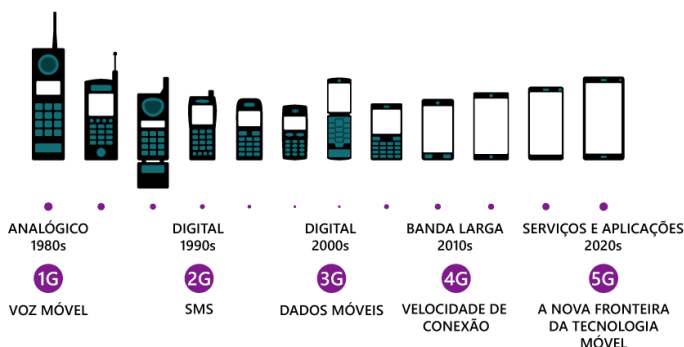
- Foco em dados móveis
- Internet móvel e videochamadas
- Velocidades até 2 Mbps
- Sistemas: UMTS, CDMA2000

4G - Quarta Geração (2010s):

- Arquitetura all-IP
- Baixa latência (<50ms)
- Velocidades até 1 Gbps
- Sistema: LTE/LTE-Advanced

5G - Quinta Geração (2020s):

- Internet das Coisas massiva
- Latência ultra-baixa (<1ms)
- Velocidades multi-Gbps
- Network Slicing nativo



CAPÍTULO 2: A ARQUITETURA DO 4G LTE

2.1. Visão Geral da Arquitetura EPC

A arquitetura do Sistema Evoluído de Pacotes (EPS - Evolved Packet System) que compõe o 4G LTE representa uma mudança paradigmática em relação às gerações anteriores de redes móveis. O EPS é composto por dois domínios principais: a Rede de Acesso por Rádio Evoluída (E-UTRAN) e o Núcleo do Sistema Evoluído de Pacotes (EPC). Esta arquitetura foi concebida desde sua origem como uma rede totalmente baseada em IP, eliminando a dualidade de domínios de circuito e pacote que existia nas gerações anteriores.

O EPC introduz uma arquitetura plana e simplificada que reduz significativamente a latência na transmissão de dados e melhora a eficiência na entrega de serviços de pacotes. Diferente das arquiteturas hierárquicas anteriores, o EPC permite o roteamento direto entre os elementos da rede, minimizando os pontos de potencial congestionamento. Esta arquitetura foi projetada para suportar handovers suaves entre diferentes tecnologias de acesso, incluindo mobilidade entre LTE, Wi-Fi e redes 3GPP legadas.

Uma característica fundamental do EPC é a separação clara entre o plano de controle e o plano de usuário. O plano de controle é responsável pela sinalização, gerenciamento de mobilidade e estabelecimento de sessões, enquanto o plano de usuário trata exclusivamente do encaminhamento do tráfego de dados dos usuários. Esta separação permite a escalabilidade independente de cada plano e facilita a implementação de otimizações específicas para cada tipo de tráfego.

O EPC também introduz o conceito de âncoras de mobilidade, que permitem que a mobilidade do usuário seja gerenciada sem afetar a continuidade das sessões de dados. Isto é particularmente importante para aplicações sensíveis à latência e para garantir a qualidade de serviço durante transições entre células ou mesmo entre diferentes tecnologias de acesso.

2.2. Componentes Principais do EPC

MME (Mobility Management Entity)

O MME é o elemento central do plano de controle no EPC, responsável por todas as funções relacionadas ao gerenciamento de mobilidade e sessão dos usuários. Como o cérebro da rede de

controle, o MME processa os procedimentos de attach e detach dos usuários, autenticação e autorização, ativação e desativação de bearers, e gerencia as listas de rastreamento de área.

Uma das funções críticas do MME é a seleção do Serving Gateway (S-GW) e Packet Data Network Gateway (P-GW) durante o procedimento de attach inicial. O MME também é responsável pelo controle de mobilidade em estados conectados, incluindo a orquestração de handovers entre células LTE e handovers inter-tecnologia para redes 3G ou 2G. Ele mantém informações de contexto para cada usuário conectado, incluindo identificadores, parâmetros de segurança e estado de mobilidade.

O MME interface-se com o HSS através da interface S6a para recuperar informações de autenticação e perfil do assinante, e com o eNodeB através da interface S1-MME para o transporte de sinalização. Em redes com alta densidade de usuários, múltiplos MMEs podem ser organizados em um pool MME para fornecer redundância e capacidade escalável.

S-GW (Serving Gateway)

O Serving Gateway atua como o ponto de

ancoragem local para a mobilidade do plano de usuário, roteando e encaminhando pacotes de dados entre o eNodeB e o P-GW. Cada usuário conectado à rede é associado a um único S-GW em um determinado momento, que permanece como ponto fixo durante movimentos intra-LTE, garantindo continuidade das sessões de dados.

O S-GW executa funções críticas de replicação de tráfego para fins de interceptação legal, coleta de informações de uso para accounting e relatórios de consumo, e aplicação de políticas de tarifação baseadas no tempo de conexão ou volume de dados. Durante handovers inter-eNodeB, o S-GW serve como ponto de ancoragem local, redirecionando o caminho de dados do eNodeB source para o eNodeB target.

O S-GW também mantém informações de contexto sobre os bearers estabelecidos, incluindo parâmetros de QoS e estatísticas de tráfego. Em arquiteturas otimizadas, o S-GW pode ser colocado com o P-GW em um único elemento físico para reduzir latência e complexidade.

P-GW (Packet Data Network Gateway)

O Packet Data Network Gateway é o ponto de saída do tráfego de dados para redes externas de

pacotes, incluindo a internet e serviços IP corporativos. O P-GW funciona como o ponto de ancoragem para a mobilidade entre sistemas 3GPP e não-3GPP, permitindo transições transparentes entre LTE e tecnologias como Wi-Fi.

Entre suas funções principais estão a alocação de endereços IP para os dispositivos dos usuários, aplicação de políticas de controle de acesso baseadas no perfil do assinante, e enforcement de políticas de QoS através de classificação de tráfego e marcação de pacotes. O P-GW também implementa funcionalidades avançadas de charging, incluindo medição em tempo real para serviços pré-pagos e geração de registros detalhados de uso para faturamento.

O P-GW interface-se com o Policy and Charging Rules Function (PCRF) através da interface Gx para receber regras de política e tarifação em tempo real, permitindo controle granular sobre os serviços acessados pelos usuários. Em cenários de roaming, o P-GW no visited network (VPLMN) ou no home network (HPLMN) determina o roteamento apropriado para o tráfego.

HSS (Home Subscriber Server)

O Home Subscriber Server é o banco de dados

central que armazena todas as informações permanentes dos assinantes, incluindo detalhes de identificação, parâmetros de segurança, informações de serviço e estado de registro. O HSS mantém as relações entre identificadores do usuário, números de telefone e os MMEs aos quais os usuários estão atualmente registrados.

As funções de autenticação do HSS são fundamentais para a segurança da rede, gerando vetores de autenticação baseados no algoritmo AKMA (Authentication and Key Agreement) e validando as credenciais dos usuários durante o procedimento de attach. O HSS também armazena os perfis de serviço dos assinantes, incluindo serviços suplementares ativados, restrições de acesso e preferências de roaming.

Para suportar a escalabilidade em redes grandes, o HSS pode ser implementado em configurações federadas, onde múltiplas instâncias compartilham o load de usuários enquanto mantêm a consistência dos dados através de mecanismos de sincronização.

PCRF (Policy and Charging Rules Function)

O PCRF é o elemento cerebral para decisões de política e tarifação na rede, determinando em

tempo real como os serviços devem ser tratados em termos de qualidade de serviço e cobrança. Baseado em informações do perfil do assinante, tipo de serviço sendo acessado e condições da rede, o PCRF gera regras dinâmicas que são enviadas ao P-GW para enforcement.

O PCRF suporta a monetização diferenciada de serviços através da aplicação de políticas de tarifação baseadas no conteúdo, tempo de acesso, ou volume de dados consumido. Ele também permite a implementação de serviços com garantia de QoS, como voz sobre LTE (VoLTE) e vídeo streaming, através da alocação de bearers dedicados com características específicas de qualidade de serviço.

2.3. A Rede de Acesso Rádio: eNodeB

O eNodeB (Evolved Node B) representa uma evolução significativa em relação aos NodeBs das gerações anteriores, consolidando funções que eram distribuídas entre múltiplos elementos na arquitetura 3G. No LTE, o eNodeB incorpora as funções do NodeB e do RNC (Radio Network Controller), resultando em uma arquitetura mais plana com menor latência e maior eficiência operacional.

Cada eNodeB é responsável por todas as funções relacionadas à transmissão e recepção de rádio em uma ou mais células, incluindo modulação/demodulação, codificação/decodificação, e processamento de sinais. O eNodeB implementa algoritmos sofisticados de agendamento de recursos no domínio do tempo e frequência, alocando dinamicamente os recursos de rádio entre os usuários ativos baseado em critérios de QoS, condições do canal, e requisitos de serviço.

As funções de controle de radio recursos (RRM) incluem controle de potência, controle de admission, gerenciamento de handover, e balanceamento de carga entre células. O eNodeB toma decisões autônomas sobre handovers entre células sob seu controle, coordenando-se com eNodeBs vizinhos através da interface X2 para executar handovers suaves sem perda de dados.

O eNodeB também é responsável pela implementação de mecanismos de HARQ (Hybrid Automatic Repeat Request) no nível físico, garantindo transmissão confiável sobre o interface de rádio, e pela criptografia do plano de usuário

sobre o interface aéreo para garantir a confidencialidade dos dados.

2.4. O Protocolo de Sinalização: Diameter

O protocolo Diameter foi selecionado como o protocolo de sinalização primário para o EPC, substituindo o SS7 e o SIGTRAN utilizados em gerações anteriores. Diameter é um protocolo de aplicação que opera sobre TCP ou SCTP, proporcionando confiabilidade na entrega de mensagens e mecanismos robustos de gestão de falhas.

No contexto do EPC, Diameter é utilizado em várias interfaces críticas. A interface S6a entre MME e HSS utiliza Diameter para autenticação, autorização e recuperação de perfis de assinantes. A interface Gx entre P-GW e PCRF emprega Diameter para a provisão de regras de política e tarifação. A interface Gy entre P-GW e Online Charging System (OCS) usa Diameter para autorização de crédito em tempo real para usuários pré-pagos.

O protocolo Diameter oferece vantagens significativas em termos de segurança, suportando autenticação de mensagens e criptografia de

transporte através de TLS. Sua natureza extensível permite a adição de novos comandos e atributos para suportar funcionalidades futuras sem requerer mudanças fundamentais no protocolo.

A arquitetura Diameter inclui elementos como agents, relays, e proxies que permitem o roteamento inteligente de mensagens em redes complexas e distribuídas. Em implantações de grande escala, Diameter Edge Agents (DEA) são utilizados para interconectar domínios de roaming e gerenciar a segurança nas interconexões entre operadoras.

2.5. Limitações do 4G LTE

Apesar de seus avanços significativos, a arquitetura 4G LTE apresenta várias limitações que se tornaram aparentes com a evolução dos requisitos de serviços móveis e o advento de novos casos de uso. A latência de rede, embora significativamente reduzida em comparação com 3G, permanece na faixa de 20-40 milissegundos, insuficiente para aplicações em tempo real críticas como realidade virtual, veículos autônomos e controle industrial.

A arquitetura EPC demonstra limitações em suportar eficientemente a massiva conectividade