

Resumo de Comunicações Móveis e Sem Fios

Módulo 1: Introdução e Camada Física

Este módulo estabelece as bases. O foco não é decorar fórmulas complexas, mas entender as limitações do meio sem fios ("o ar") e como os engenheiros resolveram isso.

1. Evolução do Tráfego: Voz vs. Dados

- **Conceito:** Antigamente, as redes eram desenhadas para **Voz** (Comutação de Circuitos - um fio dedicado para ti). Hoje, são desenhadas para **Dados** (Comutação de Pacotes/IP - partilhamos todos o mesmo tubo).
- **Ponto Chave:** O tráfego de dados ultrapassou a voz por volta do ano 2000. Isso obrigou as redes a tornarem-se mais eficientes e flexíveis ("Best Effort").

2. O Problema do Wireless (Propagação)

Transmitir dados sem fios é difícil por causa de três fenómenos físicos principais:

1. **Atenuação (Path Loss):** O sinal perde força à medida que se afasta da antena.
 - *Exemplo:* O WiFi é fraco no quarto porque está longe da sala.
2. **Sombreamento (Shadowing):** Obstáculos absorvem o sinal.
 - *Exemplo:* O elevador bloqueia o sinal do telemóvel (Gaiola de Faraday).
3. **Desvanecimento por Multipercurso (Multipath Fading):** O problema mais complexo. O sinal bate nas paredes e móveis. Várias cópias do mesmo sinal chegam ao recetor em tempos ligeiramente diferentes. Se chegarem desencontradas, cancelam-se.
 - *Solução:* Tecnologias modernas (como MIMO e OFDM) usam estes reflexos para *melhorar* o sinal em vez de sofrer com eles.

3. Métricas de Sinal (dB vs dBm)

- **dB (Decibel):** É uma relação/ganho. "A antena amplifica 3dB" (duplica a potência).
- **dBm (Decibel-miliwatt):** É a potência absoluta.
 - **0 dBm** = 1 miliwatt (mW).
 - **-30 dBm:** Sinal excelente (ao lado do router).
 - **-90 dBm:** Sinal quase inexistente (perda de pacote certa).
- **SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio):** É mais importante que a força bruta. É a qualidade do sinal comparada com o "lixo" (ruído de fundo + interferência de vizinhos).

4. Técnicas de Modulação (Como enviar os bits)

- **Spread Spectrum (Espalhamento Espectral):** "Espalha" o sinal por uma faixa larga de frequências. Torna a transmissão segura e resistente a interferências (base do 3G e GPS).
- **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing):** A "estrela" atual (WiFi, 4G, 5G). Divide o canal em centenas de sub-canais pequenos. Se houver interferência numa frequência específica, só se perde um bocadinho da informação, que é recuperada com códigos de correção de erro.

Módulo 2.1: WiFi - Arquitetura e Conexão

Aqui aprendes como as redes são montadas e como o teu telemóvel encontra o router.

1. Padrões IEEE 802.11

- **802.11b:** O antigo (11 Mbps), opera a 2.4 GHz (muita interferência).
- **802.11a:** O pioneiro dos 5 GHz, mas tinha pouco alcance.
- **802.11g/n:** Trouxeram velocidades maiores. O 'n' introduziu MIMO (várias antenas).
- **802.11ac (WiFi 5) / ax (WiFi 6):** Foco em *eficiência* e *densidade* (muitos utilizadores ao mesmo tempo), não apenas velocidade de pico.

2. Topologias

- **BSS (Basic Service Set):** Um Access Point (AP) + Clientes. É a rede de casa simples.
- **ESS (Extended Service Set):** Vários APs ligados por cabo (Ethernet), todos com o mesmo nome de rede (SSID). O utilizador muda de sala e continua na mesma rede.
 - *Exemplo:* A rede "eduroam" na universidade. Vários APs, uma única rede lógica.

3. Scanning (Como encontrar redes)

- **Passivo:** O PC fica quieto a ouvir **Beacon Frames** que os APs enviam periodicamente ("Olá, sou a rede ZON, estou aqui").
- **Ativo:** O PC envia um **Probe Request** ("Há alguém aí?") e os APs respondem com **Probe Response**. É mais rápido, mas gasta mais bateria.

Módulo 2.2: WiFi - Camada MAC (O Controlo de Acesso)

Esta é a parte técnica crítica: como evitar que todos falem ao mesmo tempo e colidam os dados.

1. CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance)

Diferente da Ethernet (cabo) onde se *detetam* colisões, no Wireless tentamos *evitá-las* porque o rádio não consegue transmitir e ouvir ao mesmo tempo.

1. **Listen:** O canal está livre?
2. **Wait (DIFS):** Espera um tempo fixo.
3. **Backoff:** Escolhe um número aleatório e conta decrescente. Se ninguém falar até chegar a zero, transmite.
4. **ACK:** Se o recetor não enviar um ACK (confirmação), o emissor assume que houve colisão e repete o processo (duplicando o tempo de espera).

2. O Problema do Nó Escondido e RTS/CTS

- **Cenário:** O Computador A e o Computador C estão em lados opostos. Ambos ouvem o Router (B), mas **não se ouvem um ao outro**.
- **Problema:** Se A e C tentarem falar com B ao mesmo tempo, colidem no B, mas eles não sabem.
- **Solução (RTS/CTS):**
 1. A envia **RTS** (Request to Send) ao Router.
 2. Router envia **CTS** (Clear to Send). Como o Router "grita" alto, o computador C (escondido) ouve o CTS e fica calado ("O canal foi reservado para o A").

3. Espaçamentos (IFS - Inter Frame Spacing)

O WiFi define prioridades esperando tempos diferentes antes de falar:

- **SIFS (Short IFS):** Tempo muito curto. Usado para ACKs. (Prioridade Máxima: "Deixem-me só confirmar que recebi").
- **DIFS (Distributed IFS):** Tempo normal para começar a enviar dados.

4. Power Save (Poupança de Energia)

O WiFi gasta muita bateria.

- **Modo:** O telemóvel avisa o AP "Vou dormir" e desliga o rádio.
- **TIM (Traffic Indication Map):** O AP guarda os dados para o telemóvel. Periodicamente, envia um Beacon com o TIM ("Acordem! Tenho cartas para o João e para a Maria"). O telemóvel acorda, verifica o TIM, pede os dados e volta a dormir.

Módulo 3: Bluetooth (Redes Pessoais - WPAN)

Substituição de cabos e baixo consumo a curta distância.

1. Estrutura da Rede

- **Piconet:** 1 Mestre (Master) e até 7 Escravos (Slaves) ativos.
 - *Regra de Ouro:* O Mestre manda em tudo. Define o relógio e a frequência. Os escravos só falam quando o Mestre pergunta.
- **Scatternet:** Quando um dispositivo é escravo numa rede e mestre noutra ao mesmo tempo, ligando duas piconets.

2. Interferência (FHSS)

O Bluetooth opera nos 2.4 GHz (igual ao WiFi). Para não sofrerem interferência mútua, o Bluetooth usa **Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS)**.

- **Funcionamento:** Muda de canal 1600 vezes por segundo. Se um canal estiver congestionado pelo WiFi, o Bluetooth só perde um milissegundo e logo salta para outro canal limpo.

3. Bluetooth Low Energy (BLE) vs. Classic

- **Bluetooth Classic:** Feito para fluxo contínuo (Auscultadores, Voz, Transferência de ficheiros). A conexão mantém-se ativa.
- **BLE (Bluetooth 4.0+):** Feito para "bits e soluções" (Sensores IoT, Fitbit, Beacons de localização).
 - Fica 99% do tempo a dormir. Acorda, envia 20 bytes de temperatura, e dorme.
 - **Incompatibilidade:** Um rádio BLE puro não fala com um rádio Classic puro. A maioria dos telemóveis tem chips "Dual Mode".

Módulo 4: WSN e LPWAN (IoT e Sensores)

Redes onde a bateria tem de durar anos e a velocidade não importa.

1. WSN (Redes de Sensores Sem Fios)

- **Objetivo:** Monitorizar o ambiente (temperatura, fogo, vibração).
- **Desafio:** Os nós podem falhar (bateria morre) e a rede tem de se auto-curar (*Self-healing*).
- **ZigBee:** Padrão famoso. Usa topologia **Mesh** (Malha). Se o caminho A->B estiver bloqueado, o sinal vai por A->C->B.
 - *Aplicação:* Lâmpadas Philips Hue ou sensores de alarme em casa.

2. LPWAN (Long Power Wide Area Networks)

A solução para "Internet das Coisas" em cidades ou campos agrícolas. Longo alcance (km) e baixíssimo consumo.

- **LoRaWAN (Long Range):**
 - *Tecnologia:* Usa espectro não licenciado (livre). Qualquer um pode montar uma antena LoRa.
 - *Modulação:* Chirp Spread Spectrum (muito robusto contra ruído).
 - *Exemplo:* Sensores de rega numa quinta no meio do Alentejo.
- **SigFox:**
 - *Tecnologia:* Ultra Narrow Band (banda ultra estreita).
 - *Modelo:* É como uma operadora global. Pagas subscrição. Mensagens limitadas a 12 bytes.
 - *Exemplo:* Rastreio de contentores ou malas de viagem.
- **NB-IoT (Narrow Band IoT):**
 - *Tecnologia:* Usa a rede 4G/LTE das operadoras (NOS, MEO, Vodafone).
 - *Vantagem:* Melhor qualidade de serviço (QoS) e garantia de entrega. Gasta mais bateria que LoRa.
 - *Exemplo:* Contadores inteligentes de eletricidade ou sensores industriais críticos.

Módulo 5: Evolução das Redes Celulares (1G a 4G)

Este módulo conta a história de como chegámos aqui. O foco deve ser a evolução da arquitetura e o que cada geração trouxe de novo.

1. Conceitos Básicos de Celular

- **Célula:** Área geográfica coberta por uma estação base.
- **Handover:** Processo de passar a chamada/dados de uma torre para outra sem quebrar a ligação enquanto te moves.
- **Arquitetura Genérica:** UE (Telemóvel) <-> RAN (Rádio/Torres) <-> Core (Cérebro da rede) <-> Internet/PSTN.

2. A Evolução (Geração a Geração)

- **1G (Analógico - anos 80):** Só voz. Sem segurança (qualquer um com um rádio ouvia as chamadas). Baterias fracas. Ex: AMPS, TACS.
- **2G (GSM - anos 90):** A revolução **Digital**.
 - **Novidades:** Voz digital encriptada, **SMS** (Short Message Service), Roaming internacional.
 - **Arquitetura:** Introduziu o **SIM Card**. A rede dividia-se em Estação Base (BTS), Controlador (BSC) e Core (MSC para voz, HLR para base de dados de utilizadores).
 - **2.5G (GPRS):** Introduziu a internet móvel ("packet switching"). Criou o **SGSN** e **GGSN** (nós de dados). Velocidades baixas (~100 kbps), mas "always-on".
- **3G (UMTS - anos 2000):** Multimédia e Dados Rápidos.
 - **Tecnologia:** Mudou de TDMA (tempo) para **W-CDMA** (código) - todos falam ao mesmo tempo mas em línguas (códigos) diferentes.
 - **Arquitetura:** Introduziu o **NodeB** (Antena) e **RNC** (Controlador). Focada em videochamadas (que ninguém usou na altura) e internet decente.
- **4G (LTE - Long Term Evolution - anos 2010):** Tudo IP.
 - **Grande Mudança:** O Core de voz (circuitos) desapareceu. É tudo dados (pacotes). A voz passa a ser apenas uma aplicação (VoLTE).
 - **Arquitetura (EPC - Evolved Packet Core):**
 - **eNodeB:** A estação base agora é inteligente (não há controlador RNC).
 - **MME (Mobility Management Entity):** O "cérebro" do controlo (sinalização).
 - **S-GW / P-GW:** Os routers que transportam os dados do utilizador.
 - **OFDM:** Tecnologia de rádio usada (e mantida no 5G) para altas velocidades.

Módulo 6.1: Introdução ao 5G e Arquitetura

O 5G não é só "net mais rápida". É uma rede para *coisas e indústria*.

1. O Triângulo de Uso do 5G (Importante!)

- **eMBB (Enhanced Mobile Broadband):** Net muito rápida (ex: Streaming 4K, VR/AR). É a evolução natural do 4G.
- **mMTC (Massive Machine Type Comms):** Milhões de dispositivos, poucos dados, muita bateria (ex: Sensores agrícolas, contadores inteligentes).
- **URLLC (Ultra-Reliable Low Latency):** Missão crítica. Não pode falhar nem atrasar (ex: Carros autónomos, cirurgia remota, automação industrial).

2. Arquitetura: NSA vs. SA

- **NSA (Non-Standalone):** O 5G "falso/inicial". Usa a antena 5G para velocidade, mas o Core (cérebro) e o controlo ainda são 4G. Depende do 4G para funcionar.
- **SA (Standalone):** O 5G "puro". Usa Rádio 5G e Core 5G. Só aqui tens as funcionalidades avançadas (Slicing, URLLC).

3. O Core 5G (5GC) - SBA

A arquitetura do Core mudou radicalmente. Agora é **SBA (Service Based Architecture)**.

- **Conceito:** Em vez de caixas fechadas com cabos específicos, as funções de rede são software que falam umas com as outras via **API HTTP/2** (como serviços web modernos).
- **Principais Funções (NFs):**
 - **AMF (Access & Mobility Function):** Gere o registo e mobilidade (sucessor do MME).
 - **SMF (Session Management Function):** Gere as sessões de dados e IP (decide rotas).
 - **UPF (User Plane Function):** O único que mexe nos dados do utilizador. Faz o roteamento real dos pacotes.
 - **UDM/AUSF:** Base de dados e autenticação.

4. Identificadores e Privacidade

- **SUPI:** O teu ID real permanente (antigo IMSI). No 5G, **nunca** é enviado em texto claro pelo ar.
- **SUCI:** Versão encriptada do SUPI. O telemóvel encripta a identidade antes de a enviar, impedindo "IMSI Catchers" de te rastrearem.

Módulo 6.2: Procedimentos 5G

Como o telemóvel se liga e mantém a ligação.

1. Passos de Conexão

1. **Search & Sync:** Encontra o sinal (SSB) da célula.
2. **RACH:** Pede permissão para falar ("Grita" na rede).
3. **Registration:** Envia o SUCI para a AMF se autenticar.
4. **PDU Session:** Pede um "tubo" de dados para a internet (via SMF e UPF).

2. Estados RRC (Rádio)

No 4G tinhas "Ligado" ou "Idle". O 5G introduz um estado novo vital:

- **RRC_INACTIVE:** O "meio-termo". O telemóvel dorme (poupa bateria como no Idle), mas a rede guarda o contexto dele. Se chegar um dado, acorda instantaneamente (baixa latência) sem ter de se registar tudo de novo.

3. Modelo de QoS (Flows)

- **QoS Flows:** Em vez de "Bearers" rígidos (do 4G), o 5G marca cada pacote individualmente com um **QFI (QoS Flow ID)**.
- Isso permite tratar de forma diferente, dentro da mesma sessão, um pacote de *WhatsApp* (baixa prioridade) e um pacote de *Voz* (alta prioridade).

Módulo 6.3: Mobilidade e Tecnologias Avançadas

1. Network Slicing (Fatiamento)

- **Conceito:** Criar várias redes virtuais em cima da mesma infraestrutura física.
 - *Fatia 1:* Carros autónomos (Baixa latência, garantida).
 - *Fatia 2:* Youtube (Muita banda, best effort).
 - *Fatia 3:* Sensores IoT (Pouca banda, muitos devices).
- Cada fatia tem um ID (S-NSSAI) e é isolada das outras. Se o Youtube congestionar, não afeta os carros autónomos.

2. Private Networks (NPN)

- **PNI-NPN:** Rede privada que usa partes da rede pública da operadora (mais barato, menos seguro).
- **SNPN (Standalone Non-Public Network):** Uma ilha isolada. A fábrica monta as suas antenas e o seu Core. Total privacidade e controlo (independente da MEO/NOS/Vodafone).

3. NTN (Non-Terrestrial Networks)

- Usar satélites (LEO/GEO) ou drones (HAPS) como estações base 5G.
- Permite cobertura no meio do oceano ou em zonas rurais onde não compensa por fibra. O telemóvel 5G normal poderá ligar-se diretamente ao satélite ("Direct Access").

4. Roaming e SEPP

- **SEPP (Security Edge Protection Proxy):** É o porteiro de segurança nas fronteiras da rede. Quando fazes roaming, toda a sinalização entre a tua operadora (Home) e a estrangeira (Visited) passa pelo SEPP para filtrar ataques e esconder a topologia da rede.

Módulo 6.4: Serviços e Evolução

1. Edge Computing (MEC)

- **Problema:** A luz demora tempo a viajar. Se o servidor estiver na América, a latência é alta (100ms+).
- **Solução (MEC):** Trazer o servidor (cloud) para junto da antena ou da cidade do utilizador.
- **Aplicação:** Jogos na cloud, processamento de vídeo em tempo real para carros, VR. O tráfego sai da antena e vai logo para o servidor local (Local Breakout), sem ir ao Core central.

2. IMS e VoNR (Voz no 5G)

- **IMS (IP Multimedia Subsystem):** É a plataforma que gere chamadas multimédia.
- **VoNR (Voice over New Radio):** Chamadas de voz nativas no 5G SA.
- **Importante:** A voz é tratada como dados, mas com prioridade máxima (QoS Flow garantido). Usa protocolo **SIP** (Session Initiation Protocol) para iniciar a chamada e **RTP** para o áudio.

3. MVNOs (Operadores Virtuais)

- Operadores que não têm antenas (ex: Lycamobile, Uzo). Alugam a rede aos MNOs (MEO, NOS, Vodafone).
- Com o 5G e Slicing, os MVNOs podem ser mais especializados (ex: um MVNO só para a indústria automóvel).

4. AI/ML na Rede (NWDAF)

- **NWDAF (Network Data Analytics Function):** Uma função do Core dedicada a Inteligência Artificial. Analisa os dados da rede para prever congestionamentos, detetar ataques ou poupar energia automaticamente.

Módulo 7: Software e Virtualização (SDN/NFV)

A mudança de "Hardware" para "Software".

1. NFV (Network Function Virtualization)

- **Conceito:** Substituir hardware dedicado (caixas proprietárias) por software que corre em servidores genéricos (IT Standard).
- **Exemplo:** Um Router ou Firewall antigamente era uma máquina física. Agora é uma *Virtual Machine (VM)* ou *Container* a correr num servidor Dell/HP comum.
- **MANO (Management and Orchestration):** É o sistema que gere isto tudo. Cria, apaga e escala as VMs conforme necessário (ex: ETSI OSM, ONAP).

2. SDN (Software Defined Networking)

- **Conceito:** Separar o **Cérebro** (Control Plane) do **Músculo** (Data Plane).
 - *Antigamente:* Cada switch decidia sozinho (cérebro distribuído).
 - *SDN:* Um **Controlador Central** decide as rotas e manda ordens aos switches ("Se vires o pacote X, envia para a porta 2").
- **Benefício:** Programabilidade. Mudar o comportamento da rede inteira com uma linha de código centralizada.

3. Protocolos

- **OpenFlow:** O protocolo original do SDN. O controlador diz ao switch que regras instalar na tabela de fluxos.
- **P4:** A evolução. Permite programar *como* o switch processa os pacotes (criar novos protocolos do zero), não apenas preencher tabelas existentes.
 - **P4Runtime:** A API para controlar estes switches programáveis em tempo real.