

H

GUIA TÉCNICO DE REFERÊNCIA

Guia Técnico HFC Hybrid Fiber-Coaxial

Redes Híbridas de Fibra e Cabo Coaxial

Versão: 1.0 | Data: Maio de 2026

Normas: DOCSIS 1.0–4.0 · SCTE 25-1/25-2 · SCTE 283 · SCTE 296

Domínio: Telecomunicações & Redes de Cabo

Índice de Conteúdos

1. Introdução às Redes HFC	4
2. Arquitetura e Topologia HFC	4
2.1 Headend — Centro de Controlo	4
2.2 Rede de Tronco (Fibra Óptica)	5
2.3 Rede de Distribuição (Coaxial)	5
2.4 Rede de Utilizador	5
3. Componentes da Rede HFC	5
3.1 Nós Ópticos	6
3.2 Amplificadores RF	6
3.3 CMTS — Cable Modem Termination System	7
3.4 Cable Modems e EMTAs	7
3.5 Outros Componentes	8
4. Evolução do Padrão DOCSIS	8
4.1 DOCSIS 1.0 (1997)	8
4.2 DOCSIS 1.1 (1999)	9
4.3 DOCSIS 2.0 (2001)	9
4.4 DOCSIS 3.0 (2006)	9
4.5 DOCSIS 3.1 (2013)	10
4.6 DOCSIS 4.0 (2020)	10
4.7 EuroDOCSIS e Perspetivas Futuras	10
5. Normas SCTE para Redes HFC	11
5.1 SCTE 25-1 (Camada PHY)	11
5.2 SCTE 25-2 (Camada MAC)	11

5.3 SCTE 283 e SCTE 296	12
6. CMTS — Funcionamento e Configuração	12
7. Espectro, OFDM e Channel Bonding	13
7.1 Gestão do Espectro de Frequências	13
7.2 OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing	14
7.3 Channel Bonding	15
8. Ruído, Distorção e Troubleshooting	15
9. Referências e Bibliografia	17

Guia Técnico HFC — Hybrid Fiber-Coaxial

1. Introdução às Redes HFC

As redes **HFC (Hybrid Fiber-Coaxial)** são infraestruturas de telecomunicações que integram a fibra óptica e o cabo coaxial para a transmissão de sinais. Esta abordagem híbrida surgiu como solução que equilibra a elevada capacidade da fibra óptica com a infraestrutura coaxial existente, desenvolvida originalmente para a distribuição de serviços de televisão por cabo (CATV).

A evolução das redes HFC foi impulsionada pela necessidade de fornecer serviços de Internet de banda larga, voz sobre IP (VoIP) e televisão digital através da mesma infraestrutura coaxial das operadoras de cabo. O padrão **DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification)**, desenvolvido e mantido pela organização CableLabs, é a especificação técnica que regula a transmissão de dados sobre redes HFC, permitindo comunicação IP bidirecional entre o headend do operador e o equipamento do cliente.

Definição Técnica: Uma rede HFC combina a fibra óptica no segmento de tronco (entre o headend e os nós ópticos) com o cabo coaxial no segmento de distribuição e acesso (entre os nós ópticos e as instalações do assinante). Esta arquitetura permite servir centenas de utilizadores a partir de um único nó óptico.

A comparação com as redes FTTH evidencia as principais diferenças: enquanto o FTTH fornece conectividade pura em fibra até ao utilizador, o HFC mantém o segmento coaxial no último troço (last mile), partilhando largura de banda entre os utilizadores de cada nó óptico. No entanto, com as evoluções do DOCSIS 3.1 e 4.0, as redes HFC modernas conseguem oferecer capacidades competitivas com as redes de fibra de nova geração.

2. Arquitetura e Topologia HFC

A rede HFC é fundamentalmente dividida em quatro partes principais: o headend, a rede de tronco, a rede de distribuição e a rede de utilizador. A topologia geral combina uma configuração em estrela para o segmento de fibra óptica com uma estrutura em árvore e ramo (tree-and-branch) para o segmento coaxial.

2.1 Headend — Centro de Controlo

O **headend** é o ponto de controlo central de todo o sistema HFC. É responsável por:

- Recepção, processamento e transmissão de sinais — terrestres, por satélite, digitais de vídeo, áudio e dados;
- Multiplexagem de sinais, correção de erros e modulação (QAM) para transmissão aos assinantes;
- Monitorização da rede, supervisão da operação e controlo de faturação e serviços;
- Alojamento do **CMTS (Cable Modem Termination System)**, que gere a transmissão de dados DOCSIS e encaminha pacotes IP entre a Internet e os cable modems dos clientes.

2.2 Rede de Tronco (Fibra Óptica)

A rede de tronco utiliza cabos de fibra óptica para transportar sinais do headend até aos nós ópticos. Pode ser estruturada em:

- **Anéis de fibra óptica redundantes:** oferecem resiliência e proteção contra falhas, ligando nós primários a secundários;
- **Topologia em estrela:** configuração mais simples para coberturas geográficas limitadas.

A utilização de fibra no segmento de tronco permite distâncias de transmissão até 160 km entre o CMTS e o cable modem mais distante, bem como maior capacidade de largura de banda em comparação com o coaxial puro.

2.3 Rede de Distribuição (Coaxial)

A partir dos nós ópticos, os sinais são distribuídos aos assinantes através de cabos coaxiais, formando a rede de distribuição (feeder). Esta segmento adota tipicamente uma estrutura em árvore e ramo, onde os cabos coaxiais se estendem pelas áreas residenciais. Amplificadores RF são necessários para compensar a atenuação do sinal ao longo dos cabos coaxiais.

2.4 Rede de Utilizador

A rede de utilizador consiste nos cabos coaxiais (drops) que ligam as derivações (taps) do feeder diretamente às instalações do cliente. O comprimento dos drops é tipicamente inferior a 200 metros. No interior das instalações do cliente, o cable modem ou EMTA converte o sinal RF em pacotes IP para os dispositivos do utilizador.

3. Componentes da Rede HFC

3.1 Nós Ópticos

Os **nós ópticos** são pontos de conversão cruciais na rede HFC. Recebem sinais ópticos da rede de tronco de fibra (provenientes do CMTS) e convertem-nos em sinais elétricos para distribuição pelos cabos coaxiais (feeders). No sentido inverso, convertem os sinais elétricos upstream dos clientes em sinais ópticos para transmissão ao headend.

Características técnicas dos nós ópticos:

- **Conversão linear:** o nó óptico atua como conversor de meio, sem processar o conteúdo dos dados;
- **Suporte WDM:** alguns nós ópticos utilizam Wavelength Division Multiplexing para transmitir sinais descendentes e ascendentes na mesma fibra, em comprimentos de onda distintos;
- **Múltiplas saídas coaxiais:** um único nó óptico pode ter até quatro saídas coaxiais, cada uma servindo uma área específica;
- **Lasers de estado sólido:** operam a comprimentos de onda de 1310 nm ou 1550 nm, com baixa atenuação na fibra óptica;
- **Capacidade:** cada nó óptico pode servir entre 500 e 2000 utilizadores, dependendo da largura de banda alocada.

3.2 Amplificadores RF

Os **amplificadores RF** são componentes ativos essenciais na rede de distribuição coaxial de um sistema HFC. Compensam a atenuação do sinal ao longo dos cabos coaxiais.

Características e limitações:

- **Amplificação bidirecional:** amplificam tanto os sinais descendentes (headend para o cliente) como os ascendentes (cliente para o headend);
- **Introdução de ruído e distorção:** cada amplificador introduz algum nível de ruído e distorção no sinal;
- **Cascata limitada:** o número de amplificadores em cascata ao longo de um feeder é tipicamente limitado a 3–4 (por vezes até 6), devido à acumulação de ruído e distorção;
- **Fatores de posicionamento:** frequência máxima do sistema, tipo e diâmetro do cabo coaxial, atenuação por metro do cabo e ganho operacional do amplificador.

Impacto no Design: A necessidade de limitar a cascata de amplificadores é uma das principais razões para a evolução do HFC, onde a fibra reduz a dependência de amplificadores RF no segmento de tronco. A cada redução no número de amplificadores em cascata, melhora a qualidade do sinal e o desempenho da rede.

3.3 CMTS — Cable Modem Termination System

O **CMTS (Cable Modem Termination System)** é o equipamento central no headend da operadora de cabo que fornece serviços de dados (Internet por cabo e VoIP) aos assinantes. Atua como bridge ou router, ligando a rede da operadora aos cable modems dos assinantes através da rede HFC. O CMTS gere a comunicação entre os cable modems e a Internet, tratando dos vários aspetos do protocolo DOCSIS.

Arquiteturas CMTS

Tabela 1 Arquiteturas de CMTS

Arquitetura	Descrição	Vantagem
I-CMTS (Integrado)	Unidade única que incorpora todos os componentes	Simplicidade de gestão
M-CMTS (Modular)	Separa o componente PHY descendente (Edge QAM) do núcleo MAC/IP	Escalabilidade para elevado número de canais descendentes
vCMTS (Virtual)	Implementações baseadas em software em servidores x86	Aumento de capacidade e implementação rápida de funcionalidades
Remote CMTS	Toda a funcionalidade CMTS na planta exterior	Redução de latência; proximidade ao utilizador

3.4 Cable Modems e EMTAs

O **cable modem (CM)** é o equipamento de instalações do cliente que converte os sinais RF da rede HFC em pacotes IP para o utilizador e vice-versa. O **EMTA (Embedded Multimedia Terminal Adapter)** é um cable modem com adaptador multimédia integrado para serviços de voz sobre a rede HFC (PacketCable/VoIP).

O processo de registo de um cable modem inclui as seguintes etapas:

- **1. Arranque:** carregamento dos parâmetros do ficheiro de configuração DOCSIS;
- **2. Obtenção de endereço IP via DHCP:** contacto com servidor DHCP (que pode ser o próprio CMTS);
- **3. Sincronização de relógio via ToD (Time of Day):** contacto com servidor de hora;
- **4. Transferência do ficheiro de configuração via TFTP;**
- **5. Negociação BPI/BPI+ (Baseline Privacy Interface):** estabelecimento de comunicação segura com o CMTS;
- **6. Registo:** após conclusão das etapas anteriores, o cable modem aparece como "online" no CMTS.

3.5 Outros Componentes

Tabela 2 Outros componentes da rede HFC

Componente	Função	Detalhe Técnico
Feeder	Cabo coaxial de distribuição a partir do nó óptico	Comprimento até 3 km; requer expansores térmicos
Tap (derivação)	Distribuição e combinação de sinais RF ao longo do feeder	Permite ligação de drops e combinação de sinais upstream
Drop	Cabo coaxial do tap às instalações do cliente	Tipicamente inferior a 200 metros
Fonte de alimentação	Alimentação dos elementos ativos da rede (nós e amplificadores)	Converte tensão comercial (60 ou 90 V) e multiplexa com sinais RF; inclui baterias de backup

4. Evolução do Padrão DOCSIS

O **DOCSIS (Data Over Cable Service Interface Specification)** é o padrão internacional de telecomunicações que permite a transferência de dados de alta largura de banda sobre sistemas de televisão por cabo (CATV) existentes. Desde a sua criação em 1997, o padrão sofreu múltiplas revisões, cada uma aumentando significativamente as velocidades de dados, melhorando a qualidade de serviço (QoS) e introduzindo novas funcionalidades.

4.1 DOCSIS 1.0 (1997)

O DOCSIS 1.0 foi a especificação fundacional para permitir o acesso à Internet sobre redes HFC. O desenvolvimento iniciou-se em finais de 1995, com a primeira especificação lançada em março de 1997.

- **Funcionalidade:** serviço de Internet "Best Effort" com limitação de débito; arquitetura Ethernet para transporte de pacotes IP;
- **RF Descendente:** frequência 88–860 MHz; largura de canal 6 MHz (Annex B); modulações 64QAM e 256QAM; velocidade máxima: 40 Mbps;
- **RF Ascendente:** frequência 5–42 MHz; larguras de canal 200 kHz, 400 kHz, 1,6 MHz e 3,2 MHz; modulações QPSK e 16QAM; velocidade máxima: 10 Mbps;
- **Gestão:** via SNMP com MIBs standard e privados.

4.2 DOCSIS 1.1 (1999)

Lançado em abril de 1999, o DOCSIS 1.1 focou-se na implementação de mecanismos de QoS para suportar aplicações em tempo real como VoIP.

- **Funcionalidade-chave:** mecanismos de QoS standardizados, permitindo múltiplos "Service Flows" dinâmicos com parâmetros de QoS distintos;
- **Suporte VoIP:** introdução do suporte a serviços de telefonia (PacketCable);
- **Melhorias upstream:** novos tipos de escalonamento UGS, Real-Time Polling, Best Effort; fragmentação de pacotes e concatenação;
- **Segurança:** BPI+ (Baseline Privacy Interface Plus) com autenticação por certificado digital, chaves mais longas e atualizações de código seguras;
- **Outras funcionalidades:** suporte a IP Multicast, SNMPv3 e Dynamic Channel Change (DCC).

4.3 DOCSIS 2.0 (2001)

A principal motivação para o DOCSIS 2.0, lançado em dezembro de 2001, foi aumentar a largura de banda ascendente para suportar aplicações simétricas como VoIP, jogos online e partilha de ficheiros P2P.

- **Descendente:** sem alterações; velocidade máxima mantida em 40 Mbps;
- **Melhorias upstream:** nova largura de canal de 6,4 MHz; novas modulações 8QAM, 32QAM e 64QAM;
- **Novas tecnologias de transmissão:** A-TDMA (Advanced TDMA) e S-CDMA (Synchronous CDMA) para melhor desempenho em ambientes ruidosos;
- **Velocidade ascendente máxima:** 30 Mbps por canal.

4.4 DOCSIS 3.0 (2006)

Lançado em agosto de 2006, o DOCSIS 3.0 trouxe avanços significativos impulsionados pela necessidade de velocidades superiores a 38 Mbps, cifrado robusto e suporte a IPv6.

- **Funcionalidade-chave: Channel Bonding** — agregação de 2 ou mais canais descendentes e ascendentes para aumentar o débito. Exemplos: 4 canais bonding = 160 Mbps; 8 canais = 320 Mbps; 24 canais = 1 Gbps;
- **Velocidades descendentes:** até 1 Gbps; **ascendentes:** até 200 Mbps;
- **Suporte IPv6:** completo, incluindo provisionamento e gestão de CMs via DHCPv6;
- **Segurança:** cifrado AES; latência média de 50 ms;
- **Outras funcionalidades:** IP Multicast melhorado, Extended upstream channel frequencies, Business over DOCSIS (BSoD) com suporte L2VPN.

4.5 DOCSIS 3.1 (2013)

Lançado pela primeira vez em outubro de 2013, o DOCSIS 3.1 representou uma nova geração da camada física, projetada para competir com serviços de fibra óptica pura.

- **Tecnologia-chave: OFDM** — substituiu os canais fixos de 6/8 MHz por subportadoras OFDM mais estreitas (25 kHz ou 50 kHz), que podem ser agregadas em blocos mais largos (até 200 MHz descendente e 96 MHz ascendente);
- **Velocidades:** até 10 Gbps descendente e até 1–2 Gbps ascendente;
- **Modulações:** de 16-QAM até 4096-QAM (obrigatório), com 8192-QAM / 16384-QAM opcional;
- **Latência** significativamente reduzida: 10 ms;
- **Correção de erros (FEC)** melhorada; gestão de energia;
- **Redução de Bufferbloat:** algoritmo DOCSIS-PIE.

4.6 DOCSIS 4.0 (2020)

Lançado em 2020, o DOCSIS 4.0 visa amplificar as capacidades upstream e maximizar a capacidade downstream, suportando serviços multi-gigabit simétricos.

- **Full Duplex (FDX):** permite transmissão simultânea upstream e downstream no mesmo espectro, possibilitando velocidades multi-gigabit simétricas;
- **Extended Spectrum (ESD):** aumenta o alcance de frequências até 1,8 GHz para maximizar as capacidades descendentes;
- **Velocidades:** 10 Gbps descendente (com espectro expandido); até 6 Gbps ascendente;
- **Latência** ainda mais reduzida: 5 ms;
- **Compatibilidade** retroativa com DOCSIS 3.1;
- **Segurança** reforçada com protocolos mais rigorosos.

4.7 EuroDOCSIS e Perspetivas Futuras

O **EuroDOCSIS** é uma modificação dos padrões DOCSIS para utilização na Europa, principalmente devido à diferente alocação de frequências dos planos de canais europeus. A televisão por cabo europeia segue os padrões PAL/DVB-C com largura de canal RF de 8 MHz, ao contrário dos padrões NTSC/ATSC norte-americanos com 6 MHz por canal. Esta maior largura de canal no EuroDOCSIS permite mais largura de banda no caminho de dados descendente.

Em relação ao futuro, embora não tenha sido declarado um padrão DOCSIS 5.0 oficial pela CableLabs, há especulação sobre alvos futuros de 25 Gbit/s descendente e pelo menos 5 Gbit/s ascendente a 3 GHz. Uma implementação de referência foi demonstrada em 2024.

Tabela 3 Evolução do padrão DOCSIS — resumo técnico

Versão	Ano	Vel. Desc. máx.	Vel. Asc. máx.	Tecnologia-chave	Latência
DOCSIS 1.0	1997	40 Mbps	10 Mbps	TDMA; 64/256QAM	—
DOCSIS 1.1	1999	40 Mbps	10 Mbps	QoS; BPI+; PacketCable	—
DOCSIS 2.0	2001	40 Mbps	30 Mbps	A-TDMA; S-CDMA; 64QAM asc.	—
DOCSIS 3.0	2006	1 Gbps	200 Mbps	Channel Bonding; IPv6; AES	50 ms
DOCSIS 3.1	2013	10 Gbps	1–2 Gbps	OFDM; 4096-QAM; FEC	10 ms
DOCSIS 4.0	2020	10+ Gbps	6 Gbps	FDX; Extended Spectrum	5 ms

5. Normas SCTE para Redes HFC

A **SCTE (Society of Cable Telecommunications Engineers)** desenvolve um conjunto de especificações para suportar o design e a implementação de sistemas de gestão interoperáveis para as redes HFC em evolução. Estas especificações, desenvolvidas sob o subcomité HMS (Hybrid Management Sub-Layer), visam melhorar a fiabilidade da rede e a satisfação dos clientes através da habilitação de configuração remota, acesso a telemetria e monitorização de alarmes dos elementos de rede.

5.1 SCTE 25-1 — Especificação da Camada PHY para Monitorização HFC

O padrão **SCTE 25-1** define os requisitos da camada física (PHY) para transponders de banda estreita utilizados na monitorização do estado da planta exterior (OSP) de redes HFC.

- **Âmbito:** descreve os requisitos da camada PHY para todos os transponders OSP HMS de Tipo 2 e Tipo 3 na planta HFC e no equipamento de controlo no headend;
- **Benefícios:** permite que os dispositivos ligados à rede coaxial comuniquem com os operadores de rede, possibilitando configuração remota, acesso a telemetria e alarmes e suporte a longo prazo;
- **Atualizações recentes:** inclui informação atualizada para novos planos de canais e novas tecnologias para implementar transponders de banda estreita.

5.2 SCTE 25-2 — Especificação da Camada MAC para Monitorização HFC

O padrão **SCTE 25-2** descreve os protocolos da camada MAC (Media Access Control) para transponders de banda estreita na monitorização do estado da planta exterior HFC.

- **Âmbito:** define os protocolos de mensagens e protocolos na Camada de Ligação de Dados (Camada 2 do modelo ISO-OSI) para garantir comunicação fiável e eficiente entre transponders HMS e o headend;
- **Benefícios:** facilita a configuração remota, telemetria e alarmes, resultando em maior fiabilidade da rede e satisfação dos clientes;
- **Relação com SCTE 25-1:** funciona em conjunto com a especificação da camada PHY (SCTE 25-1).

5.3 SCTE 283, SCTE 296 e SCTE 298

SCTE 283 — Modelo de Informação para Amplificadores de Banda Larga Inteligentes

O padrão SCTE 283 fornece um modelo de informação standardizado para todas as comunicações de amplificadores em redes de comunicação de banda larga. Suporta amplificadores FDD (Frequency Division Duplex) e FDX (Full Duplex), aplicável a amplificadores de distribuição autónomos e amplificadores de lançamento dentro de nós. O setor de cabos beneficia de um único modelo de informação standardizado para comunicações de amplificadores, especialmente em redes DOCSIS 4.0.

SCTE 296 — Amplificadores RF FDX para Sistemas de Cabo (DOCSIS 4.0)

O padrão SCTE 296 é um novo padrão DOCSIS 4.0 que aborda especificamente "Full Duplex DOCSIS Broadband Radio Frequency Hardline Amplifiers for Cable Systems". A sua inclusão como padrão DOCSIS 4.0 evidencia a sua importância na evolução das arquiteturas de rede HFC para suportar maior largura de banda e comunicação full-duplex.

SCTE 298 — Transponder de Banda Estreita LoRaWAN

O padrão SCTE 298 descreve um transponder de banda estreita projetado para amplificadores CATV de banda larga, utilizando uma camada física FSK (Frequency Shift Keying) e uma camada MAC LoRaWAN. Permite que os dispositivos ligados à rede coaxial comuniquem com os operadores de rede para configuração remota, acesso a telemetria e alarmes.

6. CMTS — Funcionamento e Configuração

O CMTS desempenha múltiplas funções críticas para a prestação de serviços de Internet por cabo. As funções principais incluem:

6.1 Funções Principais do CMTS

- **Servidor DHCP:** o CMTS pode atuar como servidor DHCP, fornecendo aos cable modems e CPEs endereços IP, máscaras de sub-rede, routers predefinidos, servidores DNS e outros parâmetros IP;

- **Servidor ToD (Time of Day):** o CMTS pode funcionar como servidor ToD compatível com RFC868, permitindo que os cable modems sincronizem os seus relógios internos — importante para registo de eventos preciso;
- **Servidor TFTP:** o CMTS pode servir como servidor TFTP, permitindo que os cable modems descarreguem os seus ficheiros de configuração DOCSIS;
- **Geração de ficheiros de configuração DOCSIS:** via CLI do CMTS, definindo como o cable modem operará na rede;
- **Negociação BPI/BPI+:** o CMTS negocia BPI com o cable modem para garantir comunicação segura;
- **Gestão de versões DOCSIS:** o CMTS pode operar em diferentes modos DOCSIS (D3.1 ou D4.0) dentro de um Domínio MAC, anunciando este modo através de TLVs de versão DOCSIS em mensagens MDD.

6.2 Channel Bonding no CMTS

O DOCSIS 3.0 introduziu o channel bonding, permitindo que múltiplos canais descendentes e ascendentes sejam utilizados simultaneamente por um único assinante para aumentar os débitos de dados. Para ativar esta funcionalidade, a linha `cable mtc-mode` deve ser incluída na configuração da interface de cabo do CMTS.

6.3 Processo de Registo do Cable Modem

Tabela 4 Etapas de registo do cable modem no CMTS

Etapa	Ação	Protocolo
1	Arranque e carregamento de parâmetros	Boot interno
2	Obtenção de endereço IP	DHCPv4/DHCPv6
3	Sincronização de relógio	ToD (RFC868)
4	Transferência do ficheiro de configuração DOCSIS	TFTP
5	Negociação de segurança	BPI/BPI+
6	Registo no CMTS	DOCSIS MAC

7. Espectro, OFDM e Channel Bonding

7.1 Gestão do Espectro de Frequências

As redes HFC operam numa gama de frequências que evoluiu ao longo das versões DOCSIS:

- **DOCSIS 1.x / 2.0:** descendente 88–860 MHz; ascendente 5–42 MHz;
- **DOCSIS 3.0:** extensão das frequências upstream até 85 MHz (EuroDOCSIS);
- **DOCSIS 3.1:** descendente até 1,218 GHz; ascendente até 204 MHz;
- **DOCSIS 4.0 (Extended Spectrum):** descendente até 1,794 GHz; full duplex no mesmo espectro.

A gestão eficiente do espectro é crítica numa rede HFC, pois o meio coaxial é partilhado entre múltiplos assinantes de um mesmo nó óptico. A monitorização contínua do espectro com analisadores de espectro permite identificar e mitigar fontes de ruído, interferências e intermodulação.

7.2 OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing

O **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)** é uma técnica de modulação multi-portadora que divide uma larga largura de banda em muitas subportadoras ortogonais mais estreitas. Cada subportadora é modulada independentemente, tipicamente usando M-QAM.

Vantagens do OFDM

- **Robustez contra o desvanecimento seletivo em frequência:** ao dividir o sinal em muitas subportadoras, o OFDM pode mitigar os efeitos do desvanecimento seletivo em frequência — se o desvanecimento afetar algumas subportadoras, as restantes continuam a transportar dados;
- **Redução da Interferência Entre Símbolos (ISI):** a maior duração do símbolo OFDM torna-o menos suscetível a ISI causada por propagação multipercurso. O intervalo de guarda (prefixo cíclico) reforça ainda mais esta robustez;
- **Eficiência espectral:** elevada eficiência espectral ao permitir sobreposição de subportadoras sem inter-carrier interference (ICI), graças à ortogonalidade.

Desafios do OFDM

- **Sensibilidade a erros de sincronização:** os sistemas OFDM são altamente sensíveis a erros de sincronização de frequência e fase, que podem causar ICI;
- **Elevada PAPR (Peak-to-Average Power Ratio):** a sobreposição de múltiplas subportadoras moduladas pode resultar em picos elevados de potência, potencialmente causando distorção não linear nos amplificadores;
- **Complexidade computacional:** a geração e deteção de sinais OFDM envolve algoritmos IFFT/FFT, representando uma carga computacional, especialmente com elevado número de subportadoras.

Parâmetros OFDM no DOCSIS 3.1

Tabela 5 Parâmetros OFDM no DOCSIS 3.1

Parâmetro	Valor DOCSIS 3.1
-----------	------------------

Espaçamento de subportadoras	25 kHz ou 50 kHz
Largura de canal máx. descendente	200 MHz (bloco único)
Largura de canal máx. ascendente	96 MHz
Modulação máxima obrigatória	4096-QAM
Modulação máxima opcional	16384-QAM
Intervalo de guarda (cyclic prefix)	Configurável
FEC (Forward Error Correction)	LDPC

7.3 Channel Bonding

O **channel bonding** (DOCSIS 3.0+) permite a agregação de múltiplos canais RF para aumentar os débitos de dados. Não existe um máximo teórico de canais que podem ser agregados, mas existem limitações práticas derivadas do espectro disponível e das capacidades do cable modem.

Exemplos práticos de channel bonding descendente (DOCSIS 3.0, 256QAM, canais de 6 MHz):

- 4 canais bonding: ~160 Mbps descendente;
- 8 canais bonding: ~320 Mbps descendente;
- 24 canais bonding: ~1 Gbps descendente.

Hybrid Networking: Os métodos de rede híbrida permitem que equipamentos 10G GPON e GPON partilhem a mesma ODN, utilizando placas de acesso separadas para cada tecnologia ou placas de serviço partilhadas (Combo-PON) que suportam processamento simultâneo de ambos os sinais. De forma análoga, as redes HFC modernas podem alojar simultaneamente cable modems DOCSIS 3.0 e 3.1 no mesmo segmento coaxial.

8. Ruído, Distorção e Troubleshooting

As redes HFC, particularmente os segmentos de cabo coaxial, são suscetíveis a ruído e distorção. Embora os cabos coaxiais sejam menos propensos a interferências do que o par entrelaçado, não são imunes a estes problemas, especialmente nos canais ascendentes.

8.1 Fontes de Ruído nas Redes HFC

- **Ruído de entrada (ingress noise):** interferências provenientes do exterior que penetram no cabo coaxial através de conexões defeituosas, cabos danificados ou equipamentos não blindados. Particularmente problemático no espectro ascendente (5–42 MHz);
- **Ruído de amplificadores:** cada amplificador RF introduz ruído térmico (principalmente ruído branco gaussiano aditivo — AWGN). A cascata de amplificadores acumula este ruído progressivamente;
- **Distorção não linear:** os amplificadores que operam próximo da saturação introduzem distorção harmónica e de intermodulação, gerando sinais parasitas que interferem com os canais vizinhos;
- **Interferência por impulso (impulse noise):** perturbações breves de elevada amplitude causadas por equipamentos elétricos, trovões ou comutações na rede elétrica.

8.2 Resolução de Problemas (Troubleshooting)

Tabela 6 Problemas comuns em redes HFC e soluções

Problema	Causa Típica	Diagnóstico	Solução
Ruído elevado no upstream	Ingress noise; cabos danificados; conectores frouxos	Analisador de espectro no nó óptico	Isolamento por secções; reparação/substituição de cabos e conectores
Perda de pacotes frequente	Ruído impulsivo; distorção de amplificadores	Monitorização de BER e SNR no CMTS	Verificar atenuação de sinal; inspecionar amplificadores em cascata
Cable modem não regista	Nível de sinal fora dos limites; ficheiro de configuração errado	Comando show cable modem no CMTS	Ajuste de atenuação; verificação do servidor TFTP
Débito abaixo do esperado	Canal bonding configurado; colisões no upstream	Análise de utilização de canais no CMTS	Otimização de DBA; rebalancear assinantes por nós ópticos
Intermitências de serviço	Alimentação instável; amplificador com falha	Monitorização SCTE 25-1/25-2	Verificar fontes de alimentação; substituir amplificadores defeituosos

8.3 Ferramentas de Diagnóstico

- **Analisador de espectro:** instrumento fundamental para identificar fontes de ruído, interferências e verificar a integridade do espectro RF. A técnica de isolamento por secções (fechar sucessivamente válvulas ou derivações) permite localizar a origem do ruído;

- **CMTS CLI (show cable modem):** permite visualizar o estado de registo dos modems, modo DOCSIS, nível de sinal, SNR e contadores de erros;
- **Transponders HMS (SCTE 25-1/25-2):** possibilitam monitorização remota do estado dos amplificadores e nós ópticos, incluindo telemetria de tensão de alimentação, temperatura e nível de sinal;
- **Medidores de campo:** instrumentos portáteis para medição de nível de sinal, frequência e modulação em pontos específicos da rede coaxial.

9. Referências e Bibliografia

- [1] SCTE. (n.d.). *Hybrid Fiber Coax Outside Plant Status Monitoring — Physical (PHY) Layer Specification*. SCTE 25-1. <https://account.scte.org/standards/library/catalog/scte-25-1>
-
- [2] SCTE. (n.d.). *Hybrid Fiber Coax Outside Plant Status Monitoring — MAC Layer Specification*. SCTE 25-2. <https://www.scte.org/standards/library/catalog/scte-25-2>
-
- [3] SCTE. (n.d.). *Information Model for Smart Broadband Amplifiers*. SCTE 283. <https://account.scte.org/standards/library/catalog/scte-283>
-
- [4] SCTE. (n.d.). *LoRaWAN Narrowband Transponder*. SCTE 298. <https://account.scte.org/standards/library/catalog/lorawan-narrowband-transponder-scte-298>
-
- [5] CableLabs / SCTE. (2020). *DOCSIS 4.0 Technology*. <https://www.cablelabs.com/technologies/docsis-4-0-technology>
-
- [6] Wikipedia. (n.d.). *DOCSIS*. <https://en.wikipedia.org/wiki/DOCSIS>
-
- [7] VIAVI Solutions. (n.d.). *DOCSIS 3.1 technology overview*. <https://www.viavisolutions.com/en-us/docsis-31>
-
- [8] Registro.br / GTER34. (n.d.). *Evolução do DOCSIS*. <https://ftp.registro.br/pub/gter/gter34/04-DOCSIS-Evolution.pdf>
-
- [9] ANACOM. (n.d.). *Redes de cabo em Portugal — HFC*. <https://www.anacom.pt/render.jsp?categoryId=340461>
-
- [10] Cisco. (n.d.). *CMTS Configuration Guide*. <https://www.cisco.com/c/en/us/support/docs/broadband-cable/cable-modem-termination-systems-cmts>
-
- [11] Wikipedia. (n.d.). *Cable Modem Termination System*. https://en.wikipedia.org/wiki/Cable_modem_termination_system
-
- [12] Homeowner.com. (n.d.). *DOCSIS 3.0 vs 3.1 vs 4.0 comparison*. <https://www.homeowner.com/connectivity/docsis-3-0-vs-3-1-vs-4-0>
-
- [13] Promptlink. (n.d.). *DOCSIS technology overview*. <https://www.promptlink.com/technology/docsis/>
-
- [14] Adrenaline Forum. (n.d.). *Entendendo as redes HFC: Coaxial, Tecnologia e Equipamentos*. <https://forum.adrenaline.com.br/threads/entendendo-as-redes-hfc>
-
- [15] InfoMona. (2012). *Estrutura da rede HFC*. <https://infomona.wordpress.com/2012/07/30/estrutura-da-rede-hfc/>
-

- [16] ANSI/SCTE. (2017). *ANSI/SCTE 25-1 2017 — Hybrid Fiber Coax Outside Plant Status Monitoring PHY*. https://webstore.ansi.org/preview-pages/SCTE/preview_ANSI+SCTE+25-1+2017.pdf
-
- [17] Teleco.com.br. (n.d.). *OFDM — Orthogonal Frequency Division Multiplexing*. https://teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdent1/pagina_3.asp
-
- [18] Técnico Lisboa / Scholar. (n.d.). *Arquitetura de redes HFC*. <https://scholar.tecnico.ulisboa.pt/>
-
- [19] CNET. (n.d.). *Comparing modems: DOCSIS 3.0 vs 3.1 vs 4.0*. <https://www.cnet.com/home/internet/comparing-modems-docsis-3-0-vs-docsis-3-1-vs-docsis-4-0/>
-
- [20] SCTE. (n.d.). *Standards Updates 2025*. <https://www.scte.org/standards/standards-updates/>
-