



# Universidade de Brasília

Universidade de Brasília (UnB)  
Faculdade do Gama

## **Relatório de Pesquisa: Fundamentos de Redes de Computadores**

Guilherme Soares Rocha – 211039789

Brasília – DF  
28-06-2025

## **1. Introdução**

As redes de computadores contemporâneas constituem a espinha dorsal da sociedade digital, dependendo de um complexo ecossistema de técnicas e protocolos para transportar volumes exponenciais de informação de forma eficiente, segura e escalável. A demanda por serviços de alta performance, impulsionada por aplicações de streaming, computação em nuvem e Internet das Coisas (IoT), exige uma compreensão aprofundada dos seus componentes fundamentais. Este relatório explora quatro áreas críticas que formam a base dessa infraestrutura: multiplexação, que maximiza a utilização de meios físicos onerosos; redes multimídia, que endereçam os desafios de transportar voz, vídeo e dados em tempo real; meios de transmissão, a camada física que inclui opções cabeadas e sem fio; e os paradigmas de comutação, que definem como os dados são efetivamente encaminhados através de redes complexas. Cada tópico é analisado com definições aprofundadas, exemplos práticos, aplicações reais e uma avaliação crítica de suas vantagens e limitações, visando fornecer uma base sólida para o projeto e a gestão de infraestruturas de rede resilientes e preparadas para o futuro.

## **2. Multiplexação**

### **2.1 Definição**

Multiplexação é a técnica fundamental que consiste em combinar (fundir) múltiplos fluxos de dados ou sinais de comunicação em um único canal ou meio físico, otimizando o uso de recursos caros, como cabos de fibra óptica ou o espectro de radiofrequência. Esse processo é gerenciado por um dispositivo chamado multiplexador (MUX) na origem, que agrega os sinais, e um demultiplexador (DEMUX) no destino, que os separa e os encaminha aos seus respectivos destinatários. A separação é realizada com base em identificadores únicos, como fatias de tempo, faixas de frequência, comprimentos de onda ou códigos matemáticos (Forouzan, 2017).

### **2.2 Exemplos e Tipos**

- **TDM (Time Division Multiplexing):** Aloca fatias de tempo (time slots) fixas para cada canal de entrada, em um fluxo de transmissão síncrono. Mesmo que um canal não tenha dados a enviar, seu slot de tempo permanece reservado, o que pode levar à ineficiência. Em sistemas legados como o **PDH (Plesiochronous Digital Hierarchy)**, múltiplos fluxos E1 (2.048 Mbps) são multiplexados em um fluxo E3 (34 Mbps) usando TDM.
- **Statistical TDM (STDM):** Uma evolução do TDM, a multiplexação estatística adapta dinamicamente a atribuição de slots de tempo conforme a demanda de cada canal. Fluxos de dados são armazenados em buffer e transmitidos apenas quando há dados a enviar, com um cabeçalho que identifica o canal de destino. Isso otimiza a largura de banda, pois elimina a ociosidade dos slots vazios, sendo ideal para tráfego em rajadas, típico de dados.
- **FDM (Frequency Division Multiplexing):** Aloca subfaixas de frequência não sobrepostas do espectro total para cada canal. É uma técnica analógica clássica, utilizada em rádio FM, onde cada estação ocupa uma banda de 200 kHz, e em sistemas de TV a cabo antigos.
- **WDM (Wavelength Division Multiplexing):** Utilizada exclusivamente em fibras ópticas, trata cada comprimento de onda da luz ( $\lambda$ ), ou "cor", como um canal independente. Cada canal pode transportar dados a taxas altíssimas (ex: 100 Gbps). A variante **DWDM (Dense WDM)** é a mais avançada, suportando dezenas ou centenas de  $\lambda$ s separadas por um espaçamento mínimo (ex: 0,8 nm), fundamental para backbones de longa distância.
- **OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing):** Uma forma sofisticada de FDM onde as subportadoras são matematicamente ortogonais, permitindo que suas bandas se sobreponham sem causar interferência. Essa técnica é extremamente robusta contra interferência de múltiplos percursos e é a base para tecnologias de banda larga sem fio, como Wi-Fi (802.11ac/ax) e redes móveis (4G LTE e 5G NR).

## 2.3 Aplicações e Estudos de Caso

- **Telefonia Digital:** O TDM é a base da rede PSTN, conectando centrais locais em hierarquias T1/E1 para agregar chamadas de voz.
- **TV a Cabo e Rádio:** O FDM é usado para modular múltiplos canais de TV analógica e estações de rádio FM em um único cabo coaxial ou no espectro aéreo.
- **Backbones Ópticos:** O DWDM é a tecnologia dominante que interliga continentes e grandes centros de dados, com cabos submarinos transportando terabits por segundo através de múltiplos comprimentos de onda em uma única fibra.
- **Redes Móveis 5G:** O OFDM é crucial na interface aérea do 5G para fornecer alta taxa de dados a múltiplos usuários simultaneamente, adaptando-se eficientemente às condições do canal de rádio.

## 2.4 Vantagens, Desvantagens e Impacto

- **Vantagens:** Maximização do uso do meio físico; redução de custos de infraestrutura; flexibilidade para adicionar novos serviços; a multiplexação estatística reduz drasticamente a ociosidade da banda.
- **Desvantagens:** Complexidade de sincronização de clock em TDM síncrono; potencial de interferência entre canais adjacentes (intermodulação) em FDM; alto custo de componentes ópticos (transponders, amplificadores) em DWDM.
- **Impacto:** O impacto da multiplexação é imenso. As redes convergentes modernas transportam voz, vídeo e dados sobre a mesma infraestrutura de fibra óptica, um feito possibilitado principalmente pelo DWDM. Isso não apenas reduziu o custo de investimento, mas também o consumo de energia e a complexidade operacional das redes globais.

•

## 3. Redes Multimídia

### 3.1 Conceito e Arquitetura

Redes multimídia são projetadas para suportar aplicações que transportam conteúdo sensível ao tempo real, como voz, vídeo e dados interativos. Diferentemente de aplicações tradicionais como e-mail ou transferência de arquivos, a multimídia não tolera bem atrasos (latência), variação no atraso (jitter) ou perda de pacotes. A arquitetura típica envolve componentes de captura (câmera, microfone), codificação (codec, como H.264 ou Opus), transporte (usando protocolos específicos) e renderização (exibição na tela), com um plano de controle para gerenciamento de sessão separado do plano de mídia para o transporte dos dados (RFC 3550).

### 3.2 Protocolos Principais

- **RTP/RTCP (Real-time Transport Protocol / RTP Control Protocol):** RTP encapsula os pacotes de áudio e vídeo, adicionando timestamps e números de sequência para reordenação e sincronização. RTCP trabalha em paralelo, monitorando estatísticas de QoS, como perda de pacotes e jitter, e fornecendo feedback para os emissores.
- **SIP (Session Initiation Protocol):** Protocolo de sinalização baseado em texto, usado para estabelecer, modificar e encerrar sessões multimídia, como chamadas de VoIP e videoconferências. Negocia os parâmetros da sessão usando o protocolo SDP (Session Description Protocol).
- **H.323:** Suíte de protocolos mais antiga e complexa da ITU-T para videoconferência sobre redes de pacotes. Inclui componentes como gatekeeper (controle de admissão) e MCU (Multipoint Control Unit) para conferências com múltiplos participantes.
- **MPEG-DASH (Dynamic Adaptive Streaming over HTTP):** Protocolo de streaming adaptativo que permite que o cliente de vídeo ajuste dinamicamente a qualidade (bitrate) do fluxo de vídeo solicitado, com base nas condições da rede em tempo real, garantindo uma experiência mais fluida.

### 3.3 Mecanismos de Sincronização e Buffering

Para mitigar o jitter, que causa distorções no áudio e vídeo, as aplicações receptoras implementam um jitter buffer (ou buffer de playout). Pacotes RTP que chegam são armazenados temporariamente nesse buffer e reproduzidos em uma taxa constante e suave, absorvendo a variação no tempo de chegada. Buffers adaptativos podem aumentar ou diminuir seu tamanho dinamicamente para otimizar o trade-off entre latência e proteção contra jitter. A sincronização labial (entre áudio e vídeo) é alcançada correlacionando os timestamps presentes nos pacotes RTP de ambos os fluxos, muitas vezes auxiliada por informações de referência de clock fornecidas pelo RTCP Sender Reports.

### 3.4 Aplicações em Cenários Reais

- **Telemedicina:** Consultas remotas com vídeo em alta definição (HD) e compartilhamento de exames exigem latência de ponta a ponta extremamente baixa (idealmente <150 ms) e alta confiabilidade.
- **e-Learning:** Plataformas de ensino a distância usam streaming de vídeo e salas de aula virtuais interativas, onde a sincronia entre a apresentação do professor e as perguntas dos alunos (Q&A) em tempo real é crítica.
- **Live Streaming de Eventos:** Eventos esportivos ou notícias ao vivo utilizam CDNs (Content Delivery Networks) e protocolos de baixa latência como LL-HLS (Low-Latency HLS) ou WebRTC para minimizar o atraso entre o evento real e a transmissão.

### 3.5 QoS, Gerenciamento de Largura de Banda e Desafios

Garantir Qualidade de Serviço (QoS) é o maior desafio. Empresas adotam mecanismos como DiffServ (Differentiated Services) para marcar pacotes multimídia com um valor de prioridade (DSCP) em seu cabeçalho. Roteadores na rede usam essa marcação para aplicar políticas de QoS, como:

- **Enfileiramento Prioritário (Priority Queuing):** Coloca pacotes de voz e vídeo em uma fila de alta prioridade para serem processados primeiro.

- **Modelagem de Tráfego (Traffic Shaping and Policing):** *Policing* descarta pacotes que excedem uma taxa de dados contratada, enquanto *shaping* os armazena em buffer para transmiti-los mais tarde, suavizando o tráfego em rajadas.

Os desafios modernos incluem o tráfego de mídia frequentemente encriptado (como no WebRTC), que dificulta a inspeção de pacotes para fins de QoS, e a manutenção de sessões estáveis durante a mobilidade do usuário em redes sem fio (handover).

## 4. Meios Guiados e Não-Guiados

### 4.1 Meios Guiados – Características e Desafios Técnicos

- **Cabo de Par Trançado (UTP/STP):** Composto por pares de fios de cobre trançados para reduzir a interferência eletromagnética (crosstalk). As categorias (Cat 5e/6/6A) definem a performance, suportando até 10 Gbps em distâncias de até 100 metros. O desafio principal é a atenuação do sinal com a distância e a suscetibilidade a ruído em ambientes industrialmente ruidosos.
- **Cabo Coaxial:** Possui um condutor central, um isolante e uma malha externa que atua como blindagem, oferecendo maior resistência à interferência que o UTP. O modelo RG-6 é padrão para TV a cabo e internet via DOCSIS.
- **Fibra Óptica (Multimodo e Monomodo):** Transmite dados como pulsos de luz. A fibra multimodo (MMF) tem um núcleo mais largo, permitindo múltiplos modos de luz, sendo mais barata e ideal para LANs (distâncias de até 2 km). A fibra monomodo (SMF) tem um núcleo fino que permite um único modo de luz, resultando em menor dispersão e alcances muito maiores (dezenas ou centenas de quilômetros), sendo a escolha para backbones e redes metropolitanas. O desafio é o custo de instalação e a necessidade de equipamentos de precisão para emendas.

### 4.2 Meios Não-Guiados – Técnicas de Propagação e Interferência

- **Ondas de Rádio:** Propagam-se em todas as direções (omnidirecional) ou de forma focada (direcional). Faixas de frequência como VHF/UHF são usadas para Wi-Fi (2,4 GHz e 5 GHz), Bluetooth e redes celulares. O principal desafio é a interferência de múltiplos percursos (multipath fading), onde o sinal refletido chega ao receptor fora de fase com o sinal direto, podendo causar cancelamento.
- **Micro-ondas:** Operam em frequências mais altas (ex: 6–42 GHz) e são altamente direcionais, exigindo linha de visada (Line-of-Sight - LoS) entre as antenas. Usadas para links ponto a ponto de alta capacidade (E-line), interligando prédios ou estações rádio-base de celular. São suscetíveis a atenuação pela chuva ("rain fade").
- **Infravermelho:** Utiliza ondas de luz infravermelha para comunicação de curta distância (ex: controles remotos). Não atravessa paredes, o que garante segurança, mas limita severamente seu alcance e aplicação.

#### 4.3 Critérios de Escolha e Comparações Quantitativas

A escolha do meio é um trade-off entre performance, custo e ambiente.

Meio	Largura de Banda	Alcance Típico	Latência (Meio)	Custo	Suscetibilidade a Interferência
<b>UTP Cat6a</b>	10 Gbps	100 m	< 1 $\mu$ s/100 m	Baixo	Moderada (Crosstalk)
<b>Fibra Monomodo</b>	>100 Gbps/canal	dezenas de km	< 0.5 $\mu$ s/100 m	Alto	Nenhuma (Imune a EMI)
<b>Wi-Fi 6</b>	1–10 Gbps	30–50 m	1–5 ms	Médio	Alta (Co-canal, RF)



Meio	Largura de Banda	Alcance Típico	Latência (Meio)	Custo	Suscetibilidade a Interferência
	(agregado)	(indoor)			
<b>Micro-ondas</b>	1–5 Gbps	1–50 km	Variável	Alto	Baixa (Direcional)

#### 4.4 Exemplos de Implantação e Tecnologias Associadas

Infraestruturas híbridas são a norma. Uma empresa de campus usa fibra óptica para interligar prédios (backbone), cabos UTP com tecnologia Power over Ethernet (PoE) para conectar e alimentar dispositivos como telefones IP e câmeras de segurança dentro das salas, e hotspots Wi-Fi para fornecer cobertura de mobilidade interna. Redes metropolitanas são construídas com anéis de fibra DWDM para resiliência e alta capacidade.

### 5. Comutação de Circuitos e Pacotes

#### 5.1 Comutação de Circuitos – Processo e Protocolos

Na comutação de circuitos, um caminho físico ou lógico dedicado é estabelecido entre dois pontos antes do início da comunicação. As três fases são: estabelecimento do circuito, transferência de dados e desconexão do circuito. Durante a fase de transferência, a largura de banda é garantida e constante. Em hierarquias digitais como PDH/SDH (Synchronous Digital Hierarchy), canais de baixa velocidade (E1/T1) são combinados hierarquicamente em canais de alta velocidade (STM-N). O SDH/SONET usa um frame síncrono rígido que permite acesso fácil a tributários de baixa ordem, oferecendo alta confiabilidade e baixa latência, ideal para voz.

## **5.2 Comutação de Pacotes – Store-and-Forward vs. Cut-through**

Na comutação de pacotes, os dados são divididos em blocos (pacotes) que são transmitidos independentemente. Cada pacote contém um cabeçalho com o endereço de destino e percorre a rede de roteador em roteador.

- Store-and-Forward: O switch ou roteador recebe o pacote inteiro, armazena-o em um buffer, verifica sua integridade (usando o CRC - Cyclic Redundancy Check) e, se estiver correto, o encaminha para a próxima porta. É mais confiável, mas introduz maior latência.
- Cut-through: O switch começa a encaminhar o pacote assim que lê o endereço MAC de destino no cabeçalho, sem esperar pelo resto do pacote. Oferece latência muito menor, mas não detecta pacotes corrompidos, que são propagados pela rede.

## **5.3 MPLS e a Evolução para Redes de Próxima Geração (NGN)**

O MPLS (Multiprotocol Label Switching) é uma técnica de comutação que fica entre a camada 2 e 3. Ele adiciona um rótulo (label) aos pacotes na borda da rede. Os roteadores no núcleo da rede (core) tomam decisões de encaminhamento baseadas apenas nesse rótulo, um processo muito mais rápido que uma consulta à tabela de roteamento IP. Os caminhos, chamados LSPs (Label Switched Paths), podem ser pré-definidos para fins de engenharia de tráfego, garantindo QoS e criando serviços como VPNs. As Redes de Próxima Geração (NGN) evoluíram esse conceito, propondo uma arquitetura em camadas que separa o plano de transporte, o plano de controle e o plano de serviços, permitindo a oferta de múltiplos serviços sobre uma única infraestrutura de pacotes gerenciada.

## **5.4 Comparação, Vantagens, Desvantagens e Tendências**

<b>Critério</b>	<b>Comutação de Circuitos</b>	<b>Comutação de Pacotes / MPLS</b>
<b>Eficiência</b>	Fixa, ociosa se inativo	Alta, compartilha largura de banda
<b>Latência</b>	Baixa e constante	Variável (MPLS ajuda a reduzir jitter)
<b>Flexibilidade</b>	Baixa (caminho fixo)	Alta (roteamento dinâmico)
<b>Suporte a QoS</b>	inerentemente garantido	Requer mecanismos (MPLS, DiffServ)
<b>Complexidade</b>	Baixa	Alta

As tendências atuais apontam para a dominância total da comutação de pacotes, com tecnologias como SD-WAN (Software-Defined Wide Area Network). O SD-WAN utiliza um controlador centralizado para gerenciar de forma inteligente e dinâmica o tráfego de aplicações sobre múltiplos tipos de transporte (MPLS, Internet banda larga, 5G), selecionando o melhor caminho com base na performance e no custo, unificando a comutação de pacotes com os requisitos de baixa latência das aplicações críticas.

## 6. Conclusão

Este relatório aprofundou os conceitos essenciais de multiplexação, redes multimídia, meios de transmissão e técnicas de comutação, pilares que sustentam as comunicações modernas. A exploração de protocolos e tecnologias atuais, do DWDM em backbones ópticos ao SD-WAN na borda da rede, evidencia a trajetória da indústria em busca de uma combinação ótima entre eficiência de recursos, garantia de qualidade de serviço e flexibilidade operacional. A convergência sobre uma infraestrutura baseada em comutação de pacotes é inequívoca, mas a sofisticação reside em como essa

infraestrutura é gerenciada. O futuro das redes está na automação e na inteligência, com a integração de SDN/NFV (Network Functions Virtualization), a expansão massiva da IoT e a conectividade de alta performance do 5G, que juntas prometem criar redes cada vez mais programáveis, seguras e adaptáveis às demandas dinâmicas do mundo digital.

## 7. Referências

- Forouzan, B. A. (2017). *Data Communications and Networking*. McGraw-Hill.
- Tanenbaum, A. S., & Wetherall, D. J. (2011). *Computer Networks*. Pearson.
- Cisco Systems. (2020). *Quality of Service Solutions Configuration Guide*. Cisco Documentation.
- International Telecommunication Union (ITU). (n.d.). *Recommendations on Wavelength Division Multiplexing*. ITU-T G.694.
- Kurose, J. F., & Ross, K. W. (2021). *Redes de Computadores e a Internet: Uma Abordagem Top-Down*. Pearson.
- Stallings, W. (2020). *Data and Computer Communications*. Pearson.
- IETF. (2003). *RFC 3550: RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications*.
- IETF. (2001). *RFC 3031: Multiprotocol Label Switching Architecture*.