

IPv6: A Próxima Geração da Internet

Pedroso

TE354 Redes de Computadores

27 de maio de 2025

Sumário

- 1 Introdução ao IPv6
- 2 Endereçamento IPv6
- 3 Endereços de Multicast e Sua Função
- 4 Distribuição de Endereços na Rede Local
- 5 Roteamento IPv6
- 6 Qualidade de Serviço (QoS) no IPv6
- 7 Capacidades Opcionais e Avançadas
- 8 Conclusão

► **Motivações** para o IPv6:

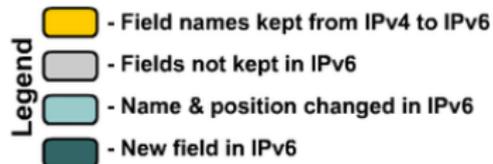
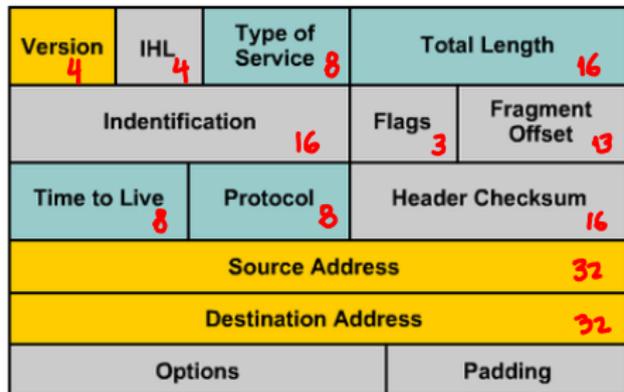
- ✓ Limitação de endereços do IPv4: Escassez e esgotamento iminente.
- ✓ Necessidade de expansão da Internet e novos dispositivos.
- ✓ Problemas do NAT: Quebra de conectividade fim-a-fim, complexidade.
- ✓ Melhorias de design e segurança.

► **Principais** especificações para o IPv6:

- ✓ RFC 2460, *Dezembro 1998* (agora substituída pela RFC 8200):
Especificação principal do IPv6.
- ✓ RFC 4291: Arquitetura de Endereçamento IPv6.
- ✓ RFC 4862: Configuração Automática de Endereços sem Estado (SLAAC).

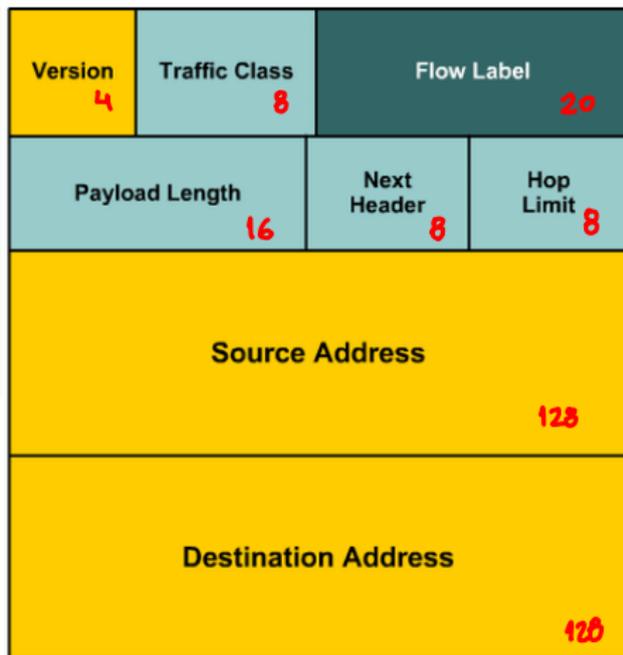
Header

IPv4 Header



Qureshi, Ashad. (2020). ANALYSIS & DESIGNING OF IPV6 NETWORK IN A CAMPUS.

IPv6 Header (40 bytes)



► Características principais dos endereços:

- ✓ 128 bits de comprimento (vs. 32 bits do IPv4).
- ✓ Representação hexadecimal: 8 grupos de 16 bits, separados por dois pontos (ex: 2001:0db8:85a3:0000:0000:8a2e:0370:7334).
- ✓ Simplificação de endereços: Compressão de zeros (::).
- ✓ Exemplo: 2001:db8:85a3::8a2e:370:7334.

► Máscara de Rede em IPv6 (Prefixo)

- ✓ Não se usa *máscara de rede* em notação decimal como no IPv4.
- ✓ Usa-se a **notação de prefixo** (*Classless Inter-Domain Routing*, CIDR): comprimento do prefixo da rede.
- ✓ Exemplo: 2001:db8:a::/48 (primeiros 48 bits são o prefixo de rede).
- ✓ O restante dos bits (128 - comprimento do prefixo) é a parte do host/interface ID.

- ▶ **Unicast:** Um para um.
 - ✓ Global Unicast Address (GUA): Endereços roteáveis na Internet.
 - ✓ Link-Local Address (LLA): Usado apenas no segmento de rede local. Começam com FE80::/10, não pode ser roteado.
 - ✓ Unique Local Address (ULA): Endereços privados, mas com escopo global (similares ao RFC1918). Começam com FC00::/7 ou FD00::/8. Podem ser roteados em uma rede que não se conecta à Internet.
- ▶ **Multicast:** Um para muitos.
- ▶ **Anycast:** Um para o mais próximo de muitos.

Conceito de Multicast IPv6

- ▶ Endereços que representam um grupo de interfaces.
- ▶ Pacotes enviados para um endereço multicast são entregues a todas as interfaces que pertencem a esse grupo.
- ▶ Essencial para comunicação eficiente em rede (ex: streaming, roteamento dinâmico).
- ▶ Não há endereços de broadcast em IPv6; suas funções são substituídas por multicast.

Estrutura e Tipos de Endereços Multicast

- ▶ Começam com FF00::/8.
- ▶ Escopo do Multicast: Link-local, Site-local, Organization-local, Global.
- ▶ Exemplos de grupos multicast bem conhecidos:
 - ✓ FF02::1 (All Nodes Multicast Address): Todos os nós no link local.
 - ✓ FF02::2 (All Routers Multicast Address): Todos
 - ✓ FF02::1:FF00:0/104 (Solicited-Node Multicast Address): Usado pelo NDP para resolução de endereços.
- ▶ Protocolos de gerenciamento de grupo: MLD (Multicast Listener Discovery).

► Stateless Address Autoconfiguration (SLAAC):

- ✓ Sem a necessidade de um servidor DHCPv6.
- ✓ Usa Roteador Advertisement (RA) e Neighbor Discovery Protocol (NDP).
- ✓ Interface ID gerado a partir do MAC Address (EUI-64) ou aleatoriamente (Privacy Extensions).

► Stateful DHCPv6:

- ✓ Servidor DHCPv6 gerencia a atribuição de endereços e outras informações (DNS, etc.).
- ✓ Útil para cenários onde é necessário um controle mais granular.
- ✓ **DHCPv6 Lite (Stateless DHCPv6):** Fornece outras informações, mas não atribui endereços.

- ▶ **Cenário:** Um novo dispositivo (PC) é conectado à rede IPv6.
- ▶ **Passo 1: Descoberta do Roteador (RS/RA)**
 - ✓ O PC envia uma mensagem **Router Solicitation (RS)** (ICMPv6) para o endereço multicast 'FF02::2' (All Routers).
 - ✓ O roteador IPv6 da rede responde com uma mensagem **Router Advertisement (RA)** (ICMPv6).
 - ✓ O RA contém o **prefixo da rede** (ex: '2001:db8:cafe:1::/64').
- ▶ **Passo 2: Geração do Interface ID**
 - ✓ O PC gera sua parte de Interface ID (os últimos 64 bits do endereço).
 - ✓ **Opção 1 (EUI-64):** Baseado no MAC address do PC.
 - ✓ Ex: MAC '00:1A:2B:3C:4D:5E' → EUI-64 '021A:2BFF:FE3C:4D5E' (inverte o 7º bit e insere 'FFFE').
 - ✓ **Opção 2 (Privacy Extensions - RFC 4941):** Geração de um ID aleatório e temporário para privacidade.

➤ Passo 3: Formação do Endereço Completo

- ✓ O PC combina o prefixo do RA com seu Interface ID.
- ✓ Ex: Prefixo '2001:db8:cafe:1::/64' + EUI-64 '021A:2BFF:FE3C:4D5E'
- ✓ **Endereço IPv6 Final (GUA):**
'2001:db8:cafe:1:021A:2BFF:FE3C:4D5E'

➤ Passo 4: Detecção de Endereço Duplicado (DAD)

- ✓ O PC envia uma mensagem **Neighbor Solicitation (NS)** para o endereço multicast de nó solicitado ('FF02::1:FFXX:XXXX') com seu novo endereço proposto.
 - ✓ Se nenhum outro dispositivo responder com um **Neighbor Advertisement (NA)**, o endereço é considerado único e pode ser usado.
- Resultado: O PC agora tem um endereço IPv6 globalmente roteável sem intervenção manual ou servidor DHCPv6.

► Suponha o comando **ifconfig**:

```
wlxd85d4c8b1402: flags=4163<UP,BROADCAST,RUNNING,MULTICAST> mtu 1500
inet 10.164.37.249 netmask 255.255.252.0 broadcast 10.164.39.255
inet6 fe80::5802:958b:5a9b:8609 prefixlen 64 scopeid 0x20<link>
inet6 2801:82:80f0:89:e771:dfc:4557:435b prefixlen 64 scopeid 0x0<global>
inet6 2801:82:80f0:89:9ce9:cc9c:c900:91a6 prefixlen 64 scopeid 0x0<global>
ether d8:5d:4c:8b:14:02 txqueuelen 1000 (Ethernet)
```

- ✓ Endereço Link-Local **FE80::5802:958B:5A9B:8609** foi gerado aleatoriamente.
 - ✓ Endereço principal: **2801:82:80F0:89:E771:DFC:4557:435B**: prefixo recebido via SLAAC do roteador, com um identificador de interface gerado aleatoriamente.
 - ✓ Endereço temporário **2801:82:80F0:89:9CE9:CC9C:C900:91A6** cujo prefixo foi recebido via SLAAC do roteador, com um identificador de interface gerado aleatoriamente.
- A presença de múltiplos endereços globais e a falta de derivação direta do MAC nos identificadores de interface são comportamentos padrão e em sistemas operacionais modernos que implementam as extensões de privacidade do IPv6 (Privacy Extensions (RFC 4941, nova RFC 8981))

NAT (Network Address Translation) em IPv6

➤ **Propósito:**

- ✓ **IPv4:** Principalmente para *conservação de endereços e segurança por obscuridade*.
- ✓ **IPv6:** Não é necessário para conservação de endereços (abundância de 128 bits) como no IPv4.

➤ **Casos de Uso Limitados (e Alternativas Preferidas):**

- ✓ **Renumeramento de Rede:** Facilitar a mudança de prefixo IS
- ✓ **Multi-homing:** Gerenciar múltiplas conexões ISP (alternativa: BGP).
- ✓ **Segurança (Controversa):** Não substitui um firewall robusto.

➤ **Principal Especificação:**

✓ **NPTv6 (Network Prefix Translation - RFC 6296):**

- ✓ Tradução de prefixo 1:1, **sem estado (stateless)**.
- ✓ A parte do Interface ID do endereço permanece inalterada.
- ✓ Ex: 2001:db8:a::/48 ↔ 2001:db8:b::/48

- ✓ **NAPT66 (com portas):** Altamente desencorajado devido à quebra de conectividade e complexidade.

➤ **Conclusão:** O NAT em IPv6 é uma ferramenta de nicho, não uma solução fundamental como no IPv4. Firewalls são a abordagem preferencial para segurança e controle de tráfego.

Neighbor Discovery Protocol (NDP)

- ▶ Substitui ARP e ICMP Router Discovery do IPv4.
- ▶ Funções:
 - ✓ Descoberta de vizinhos (Neighbor Solicitation/Advertisement).
 - ✓ Descoberta de roteadores (Router Solicitation/Advertisement).
 - ✓ Detecção de endereços duplicados (DAD).
 - ✓ Redirecionamentos.
- ▶ Resolução de Endereço (ARP / NDP):
 - ✓ ARP (IPv4): envia um broadcast perguntando “Quem tem o IP X? Diga seu MAC”.
 - ✓ NDP (IPv6): envia uma mensagem ICMPv6 chamada Neighbor Solicitation (NS) para um endereço de multicast. O vizinho responde com uma Neighbor Advertisement (NA) informando seu endereço MAC.

Neighbor Discovery Protocol (NDP)

- Suponha que um host quer resolver o endereço MAC correspondente ao IPv6. Passos:
- 1 Extraí os últimos 24 bits do endereço IPv6:
 - 2 Últimos 24 bits de `::1a2b` (hex): `00001A2B`
 - 3 Monta o endereço multicast de destino:
 - 4 Prefixo: `ff02::1:ff00:0/104`
 - 5 Com os últimos 24 bits do IP alvo: `ff02::1:ff1a:2b`
 - 6 O host envia a Neighbor Solicitation (NS) para `ff02::1:ff1a:2b`
 - 7 Todos os hosts escutam esse grupo multicast correspondente aos seus próprios endereços.
 - 8 O host com o endereço `2001:db8::1a2b` reconhece o multicast como seu e responde com uma Neighbor Advertisement (NA), informando seu endereço MAC.

NDP: Descoberta de Roteador e Detecção de Endereço Duplicado

- **Cenário:** Um novo host (PC1) se conecta à rede IPv6 e precisa configurar seu endereço e encontrar um roteador.
- **1. Descoberta do Roteador (Router Discovery):**
 - ✓ **Função:** PC1 encontra roteadores na rede e obtém informações de prefixo.
 - ✓ PC1 envia **Router Solicitation (RS)** (ICMPv6 Tipo 133) para o endereço multicast FF02::2 (All Routers).
 - ✓ Roteador responde com **Router Advertisement (RA)** (ICMPv6 Tipo 134), contendo:
 - ✓ Prefixo de rede (ex: 2001:db8:cafe:1::/64).
 - ✓ MTU do link.
 - ✓ Flags para SLAAC ou DHCPv6.
 - ✓ PC1 usa o prefixo do RA para gerar seu endereço via SLAAC (ex: 2001:db8:cafe:1:abcd::1).

NDP: Descoberta de Roteador e Detecção de Endereço Duplicado

➤ 2. Detecção de Endereço Duplicado (DAD - Duplicate Address Detection):

- ✓ **Função:** Assegurar que o endereço IPv6 gerado é único na rede local.
- ✓ Antes de usar o endereço gerado, PC1 envia **Neighbor Solicitation (NS)** (ICMPv6 Tipo 135) para o endereço multicast de nó solicitado (FF02::1:FF00:1) do seu próprio endereço proposto.
- ✓ Se nenhum outro host na rede responder com um **Neighbor Advertisement (NA)** (ICMPv6 Tipo 136), o endereço é considerado único e pode ser usado.

- Semelhante ao roteamento IPv4, mas com endereços maiores !!
- Exemplo: `route -6 -n`:

Destination	Next Hop	Flag	Met	Ref	Use	If
2801:82:80f0:89::/64	::	U	600	1	0	wlxd85d4c8b1402
fe80::/64	::	U	1024	1	0	wlxd85d4c8b1402
::/0	fe80::209:fff:fe09:0	UG	600	5	0	wlxd85d4c8b1402
::1/128	::	Un	0	5	0	lo
2801:82:80f0:89:9ce9:cc9c:c900:91a6/128	::	Un	0	3	0	wlxd85d4c8b1402
2801:82:80f0:89:e771:dfc:4557:435b/128	::	Un	0	3	0	wlxd85d4c8b1402
fe80::5802:958b:5a9b:8609/128	::	Un	0	3	0	wlxd85d4c8b1402
ff00::/8	::	U	256	6	0	wlxd85d4c8b1402
::/0	::	!n	-1	1	0	lo

✓ Flag:

- ✓ U (Up): A rota está ativa e pronta para uso.
- ✓ G (Gateway): A rota usa um gateway (próximo salto que não é o próprio host nem a interface).
- ✓ Un (Unicast): Rota para um endereço unicast específico.
- ✓ In (Negate): A rota não será usada. É uma rota "blackhole" ou "null" que descarta o tráfego.

▶ **IGPs (Interior Gateway Protocols):**

- ✓ OSPFv3 (Open Shortest Path First version 3)
- ✓ EIGRP para IPv6 (Enhanced Interior Gateway Routing Protocol)
- ✓ IS-IS para IPv6
- ✓ RIPng (Routing Information Protocol next generation)

▶ **EGPs (Exterior Gateway Protocols):**

- ✓ BGP-4 Multiproto (Border Gateway Protocol com suporte para IPv6)

Fragmentação em IPv6: abordagem diferente do IPv4

- ▶ Em IPv6, a fragmentação **não é realizada pelos roteadores** no caminho.
- ▶ A fragmentação é de responsabilidade **apenas do host de origem**.
- ▶ Motivo: Simplificar o processamento dos roteadores e evitar overhead.
- ▶ **Path MTU Discovery (PMTUD):**
 - ✓ Processo pelo qual o host de origem determina o MTU (Maximum Transmission Unit) mínimo no caminho para o destino.
 - ✓ Se o MTU do caminho for menor que o tamanho do pacote, o **host de origem** fragmenta o pacote antes de enviá-lo.
 - ✓ Assume que o MTU do caminho é o mesmo do *link* local.
 - ✓ Envia um pacote com este MTU.
 - ✓ Se receber uma mensagem *ICMPv6 Packet Too Big*, reduz o tamanho do MTU para o informado na mensagem.
 - ✓ Repete o processo até encontrar o menor MTU do caminho até o destino.

- O cabeçalho IPv6 possui campos dedicados para QoS, substituindo os campos de IPv4.
- **Traffic Class (8 bits):**
 - ✓ Equivalente ao campo DSCP (Differentiated Services Code Point) do IPv4.
 - ✓ Usado para marcar pacotes e permitir a diferenciação de tratamento por roteadores.
 - ✓ Permite a implementação de modelos DiffServ (Differentiated Services).
- **Flow Label (20 bits):**
 - ✓ Novo campo no cabeçalho IPv6, não presente em IPv4.
 - ✓ Usado para identificar um *fluxo* de pacotes que devem receber tratamento especial e uniforme pelos roteadores.
 - ✓ Permite o encaminhamento de pacotes baseado em fluxo sem a necessidade de inspecionar cabeçalhos de camadas superiores.
 - ✓ Útil para balanceamento de carga, QoS e engenharia de tráfego.

► Differentiated Services (DiffServ):

- ✓ Baseado no campo Traffic Class.
- ✓ Roteadores classificam, marcam e priorizam pacotes com base nas políticas definidas.
- ✓ Classes de serviço: Expedited Forwarding (EF), Assured Forwarding (AF), Best-Effort.

► Integrated Services (IntServ):

- ✓ Utiliza o campo Flow Label para identificar fluxos e reservar recursos.
- ✓ Requer sinalização fim-a-fim (ex: RSVP) e gerenciamento de estado nos roteadores.
- ✓ Mais complexo de implementar em larga escala, mas oferece garantias de QoS mais fortes.

► Benefícios do QoS em IPv6: Melhor suporte a aplicações em tempo real (VoIP, vídeo), melhor desempenho de aplicações críticas.

Jumbograma (Jumbogram)

- ▶ Capacidade de enviar pacotes IPv6 com payloads maiores que 65.535 bytes.
- ▶ Útil para aplicações que demandam alta largura de banda e grandes transferências de dados.
- ▶ Requer suporte nos roteadores e interfaces de rede.
- ▶ Indicado pelo uso de um *Jumbo Payload Option* no cabeçalho de extensão Hop-by-Hop.

▶ IPsec (Internet Protocol Security):

- ✓ Integrado ao IPv6 (não é um recurso *adicional* como no IPv4).
- ✓ Fornece autenticação, integridade e confidencialidade.
- ✓ Essencial para a segurança da comunicação IPv6.

▶ VPNs baseadas em TLS/SSL:

- ✓ OpenVPN, WireGuard, etc., podem encapsular tráfego IPv6.
- ✓ Oferecem flexibilidade e facilidade de implantação.

▶ Túneis (Tunneling):

- ✓ Encapsulamento de IPv6 sobre IPv4 (e vice-versa) para transição.
- ✓ Ex: 6to4, ISATAP, Teredo (menos relevantes hoje em dia).
- ✓ Túneis GRE, MPLS com IPv6.

► **Crescimento Constante:**

- ✓ A adoção global do IPv6 continua a crescer, impulsionada pela exaustão do IPv4 e demanda por 5G, IoT e Cloud Computing.
- ✓ Em 2023, a cobertura global de IPv6 ultrapassou a marca de **30%** pela primeira vez (Roland Berger).
- ✓ Estatísticas do Google mostram que a porcentagem de usuários acessando seus serviços via IPv6 está em torno de **43%** (Maio de 2025).

► **Líderes na Adoção:**

- ✓ Países como **França (aprox. 85%)**, **Alemanha (aprox. 74%)**, e **Índia (aprox. 73%)** apresentam as maiores taxas de adoção.
- ✓ Em abril de 2025, aproximadamente **58,2%** dos usuários de internet no Japão eram capazes de utilizar IPv6 e nos Estados Unidos, **57,27%**.

► **Desafios Globais:**

- ✓ **Inércia e Custos:** Relutância de alguns ISPs e custos iniciais de atualização de hardware.
 - ✓ **Conteúdo e Aplicações:** Muitos websites e aplicações ainda operam exclusivamente em IPv4, reduzindo o incentivo para a transição.
 - ✓ **Complexidade Percebida:** A percepção de que o IPv6 é mais complexo para gerenciar.
- **Tendência:** A adoção é um processo gradual, mas inevitável, com o IPv6 se tornando cada vez mais o protocolo padrão da Internet.

► Liderança na América Latina:

- ✓ O Brasil mantém uma das maiores taxas de adoção de IPv6 na América Latina, frequentemente acima de **50%** do tráfego (dados de 2024/2025).
- ✓ Essa posição reflete o esforço coordenado de diversos atores.

► Fatores Propulsores:

- ✓ **NIC.br:** Atuações contínuas em capacitação, incentivo e distribuição de blocos IPv6.
- ✓ **Anatel:** Políticas e planos de ação para fomentar a transição, especialmente junto às grandes operadoras.
- ✓ **Grandes Provedores:** As principais operadoras de telecomunicações já possuem suas redes (fixa e móvel) amplamente habilitadas para IPv6.

Conclusão e Benefícios do IPv6

- ▶ Elimina a escassez de endereços.
- ▶ Simplifica o roteamento e a configuração de rede.
- ▶ Melhorias inerentes de segurança (IPsec obrigatório).
- ▶ Suporte a novas funcionalidades (multicast aprimorado, jumbogram).
- ▶ Preparação para a Internet das Coisas (IoT) e a próxima geração de redes.