

# Introdução: sumário

- ❑ Conceitos fundamentais
- ❑ Multiplexagem e comutação
- ❑ Débitos e atrasos
- ❑ Arquitetura em camadas

# Rede de Computadores

*“A computer network is a group of computer systems and other computing hardware devices that are linked together through communication channels to facilitate communication and resource-sharing among a wide range of users.”*

Techopedia dictionary

# Rede de Computadores

*“A computer network is a group of computer systems and other computing hardware devices that are linked together through communication channels to facilitate communication and resource-sharing among a wide range of users.”*

Techopedia dictionary

Exemplos de **sistemas terminais**: PCs, servidores, quintas de servidores (*server farms*), *laptops*, *tablets*, telemóveis, televisões, frigoríficos, termostatos, etc.

# Rede de Computadores

*“A computer network is a group of computer systems and other computing hardware devices that are linked together through communication channels to facilitate communication and resource-sharing among a wide range of users.”*

Techopedia dictionary

**Canal de comunicação (ponto-a-ponto; difusão):** abstração de comunicação construída sobre um qualquer meio físico: par de cobre entrelaçado, cabo coaxial, fibra ótica e rádio nas suas múltiplas variantes

# Rede de Computadores

*“A computer network is a group of computer systems and other computing hardware devices that are linked together through communication channels to facilitate communication and resource-sharing among a wide range of users.”*

Techopedia dictionary

Interligação entre sistemas computacionais é efetuada por **comutadores** que transitam informação entre canais adjacentes

# Rede de Computadores

*“A computer network is a group of computer systems and other computing hardware devices that are linked together through communication channels to facilitate communication and resource-sharing among a wide range of users.”*

Techopedia dictionary

Exemplos de **serviços** de comunicação e partilha de recursos: encaminhamento dos dados, garantia de entrega dos dados, limites ao atraso na entrega dos dados, autenticação, conversão entre nomes e endereços, etc.

# A Internet

*“A global computer network providing a variety of information and communication facilities, consisting of interconnected networks using standardized communication protocols.”*

Oxford dictionary

# A Internet

*“A global computer network providing a variety of information and communication facilities, consisting of interconnected networks using standardized communication protocols.”*

Oxford dictionary

Global no sentido geográfico e no sentido de presença ubíqua em todo o tipo de sistemas terminais



# A Internet

*“A global computer network providing a variety of information and communication facilities, consisting of interconnected networks using standardized communication protocols.”*

Oxford dictionary

A quem são fornecidos os serviços de comunicação e informação? A aplicações distribuídas, tais como o correio eletrónico, a WWW, a voz e o vídeo interativos (Zoom), torrentes de áudio e vídeo vivo (*audio and video live streaming*), etc.

# A Internet

*“A global computer network providing a variety of information and communication facilities, consisting of interconnected networks using standardized communication protocols.”*

Oxford dictionary

Uma rede de redes: redes residenciais; redes empresariais e universitárias; redes (ISP) de acesso; redes (ISP) Tier-1; centros-de-dados; redes de área-extensa (WANs); redes móveis celulares, etc.

# A Internet

*“A global computer network providing a variety of information and communication facilities, consisting of interconnected networks using standardized communication protocols.”*

Oxford dictionary

**Protocolos** de comunicação: mecanismos distribuídos que fornecem um serviço; especificação do formato das mensagens trocadas e das ações tomadas aquando da receção destas

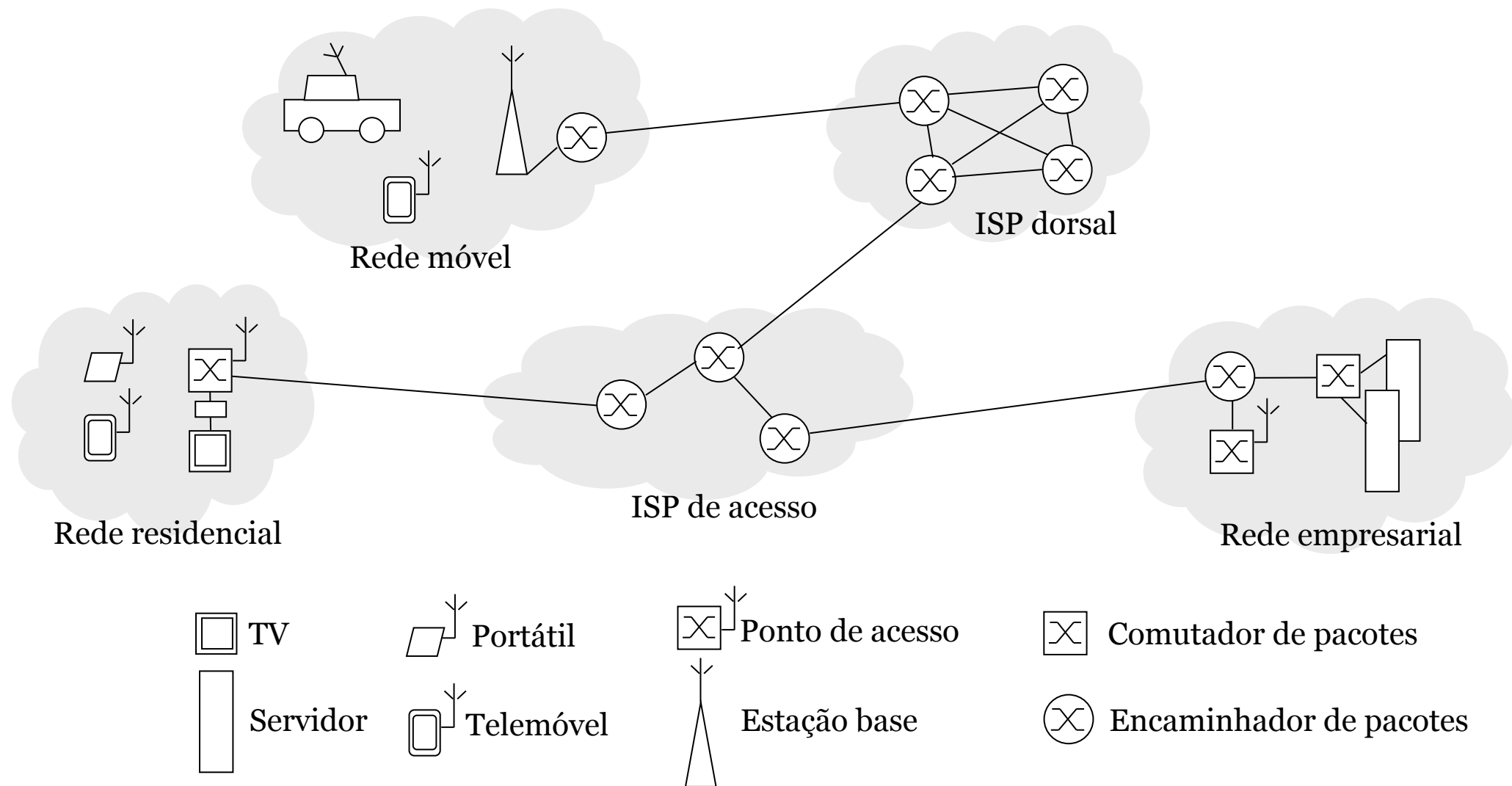
# A Internet

*“A global computer network providing a variety of information and communication facilities, consisting of interconnected networks using standardized communication protocols.”*

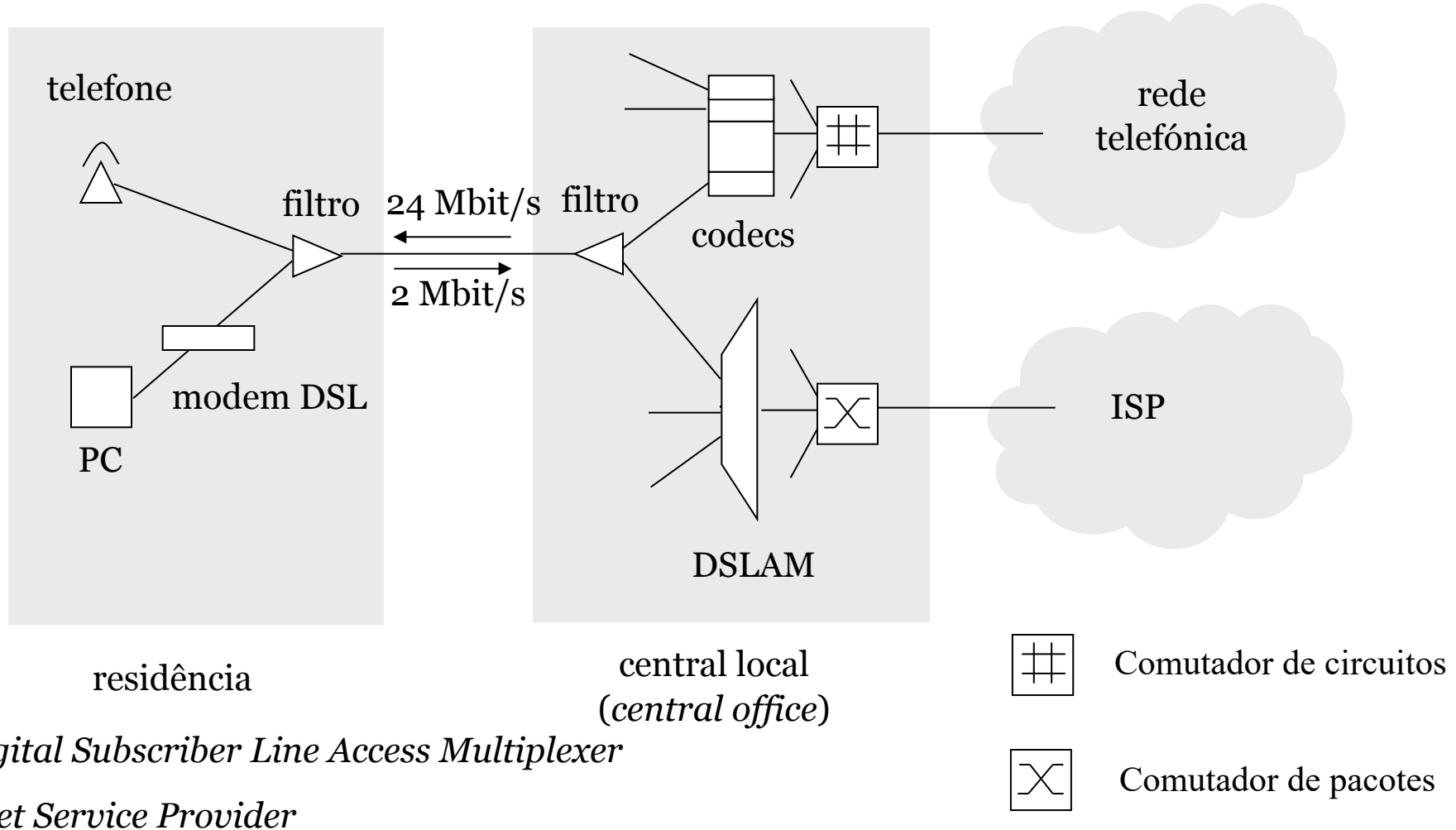
Oxford dictionary

Protocolos de comunicação **standardizados**: abertos, sancionados por uma entidade competente (IETF), mas de adesão voluntária

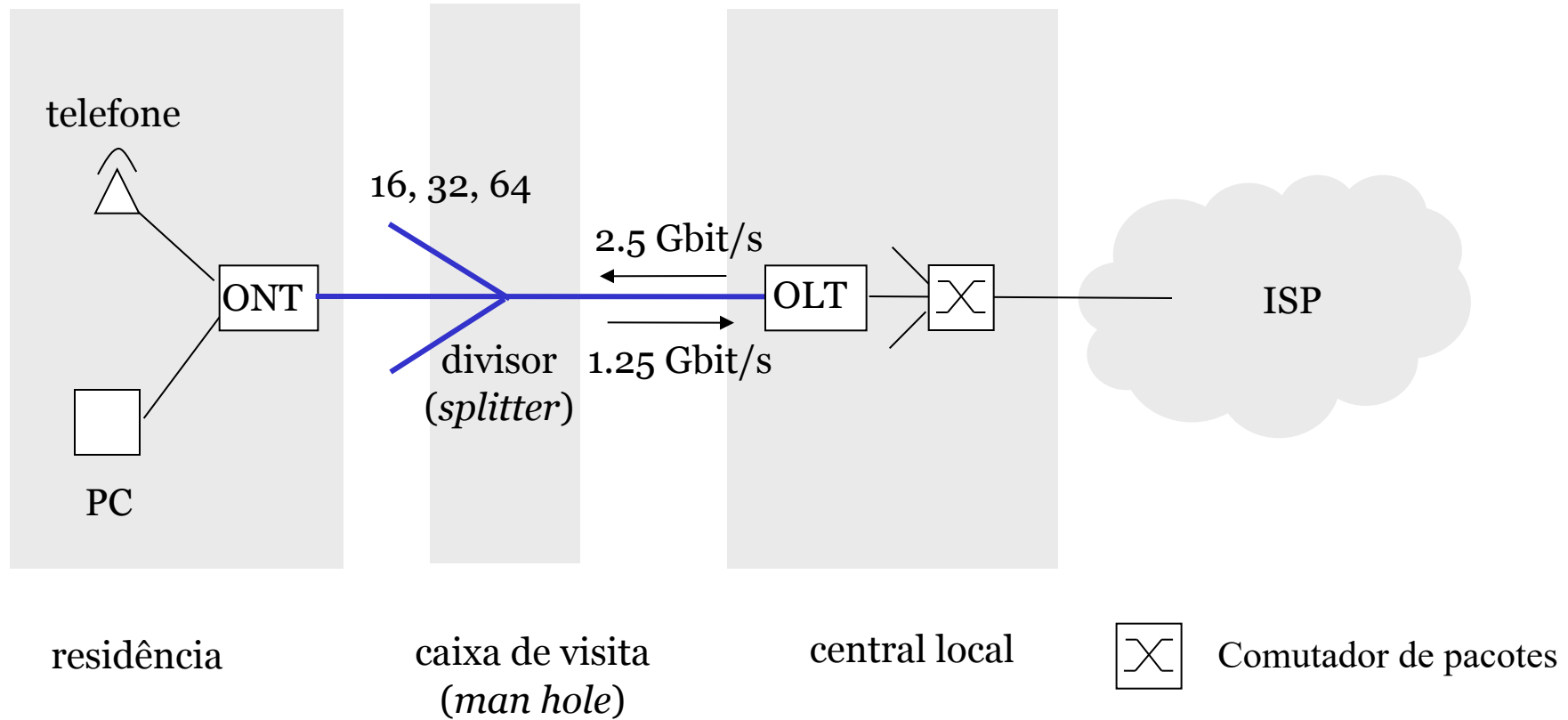
# Convergência tecnológica



# Rede de acesso: DSL



# Rede de acesso: FTTH (PON)



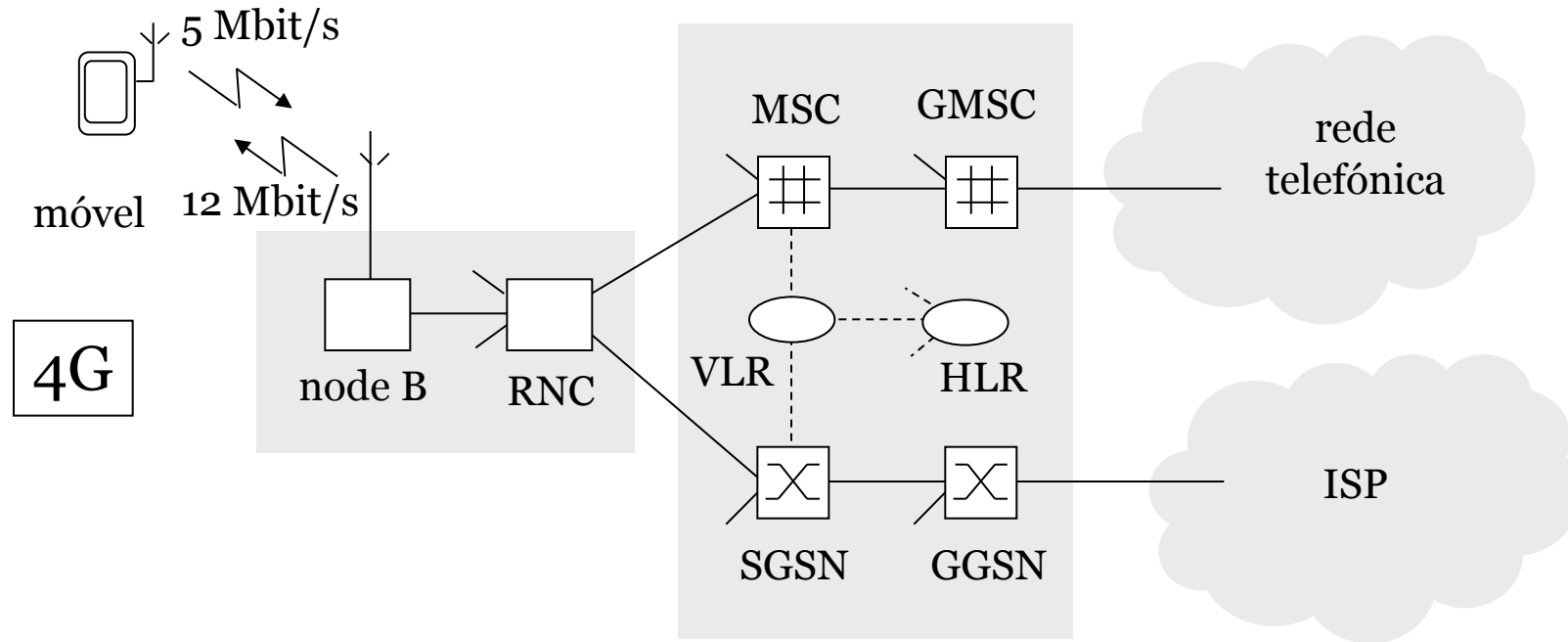
FTTH – *Fiber To The Home*

PON – *Passive Optical Network*

ONT – *Optical Network Terminal*

OLT – *Optical Line Terminal*

# Rede de acesso: 3G, 4G, 5G



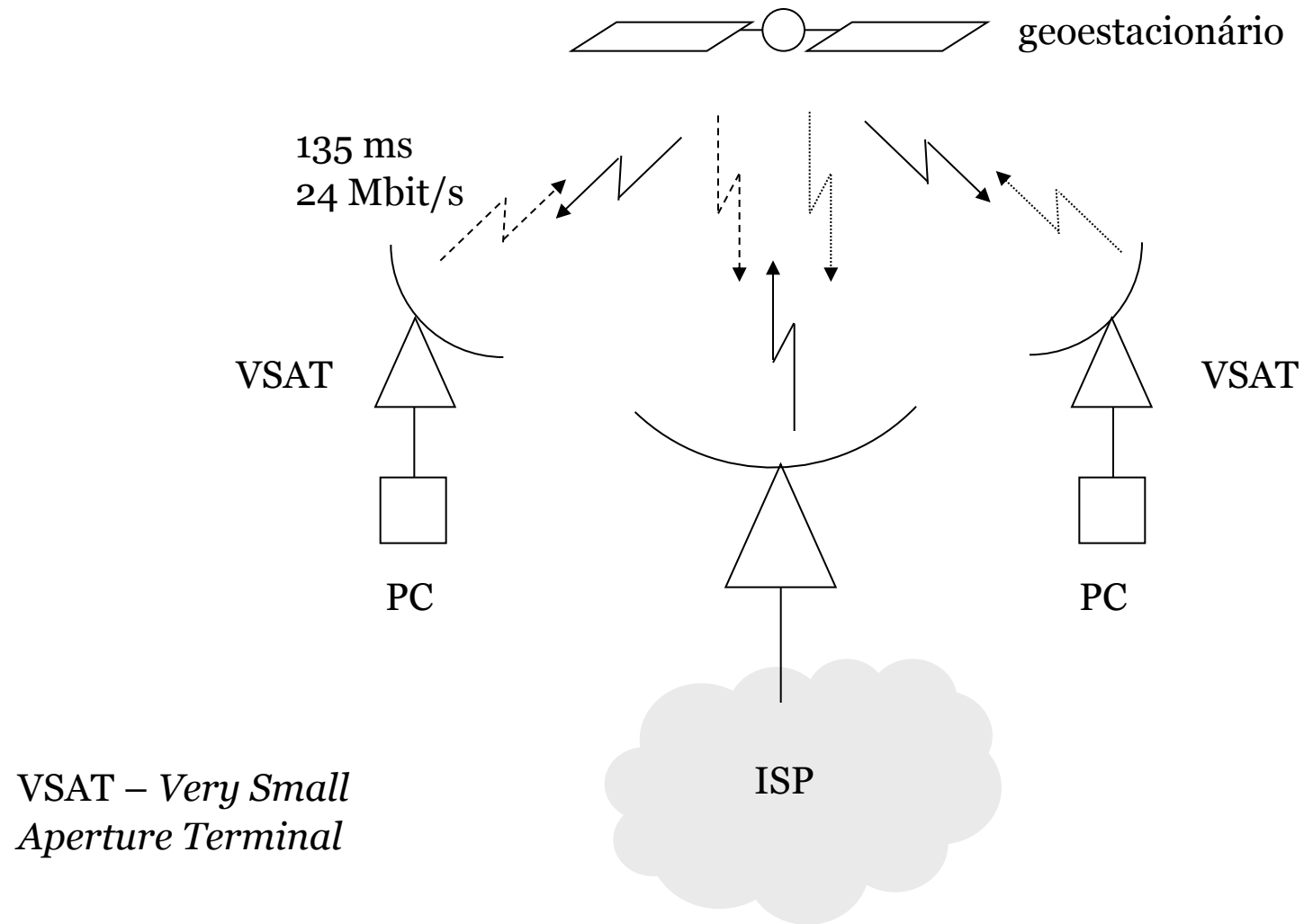
RNC – *Radio Network Controller*  
MSC – *Mobile Switching Center*  
SGSN – *Serving GPRS Support Node*

GPRS – *General Packet Radio Service*  
GMSC – *Gateway MSC*  
GGSN – *Gateway SGSN*

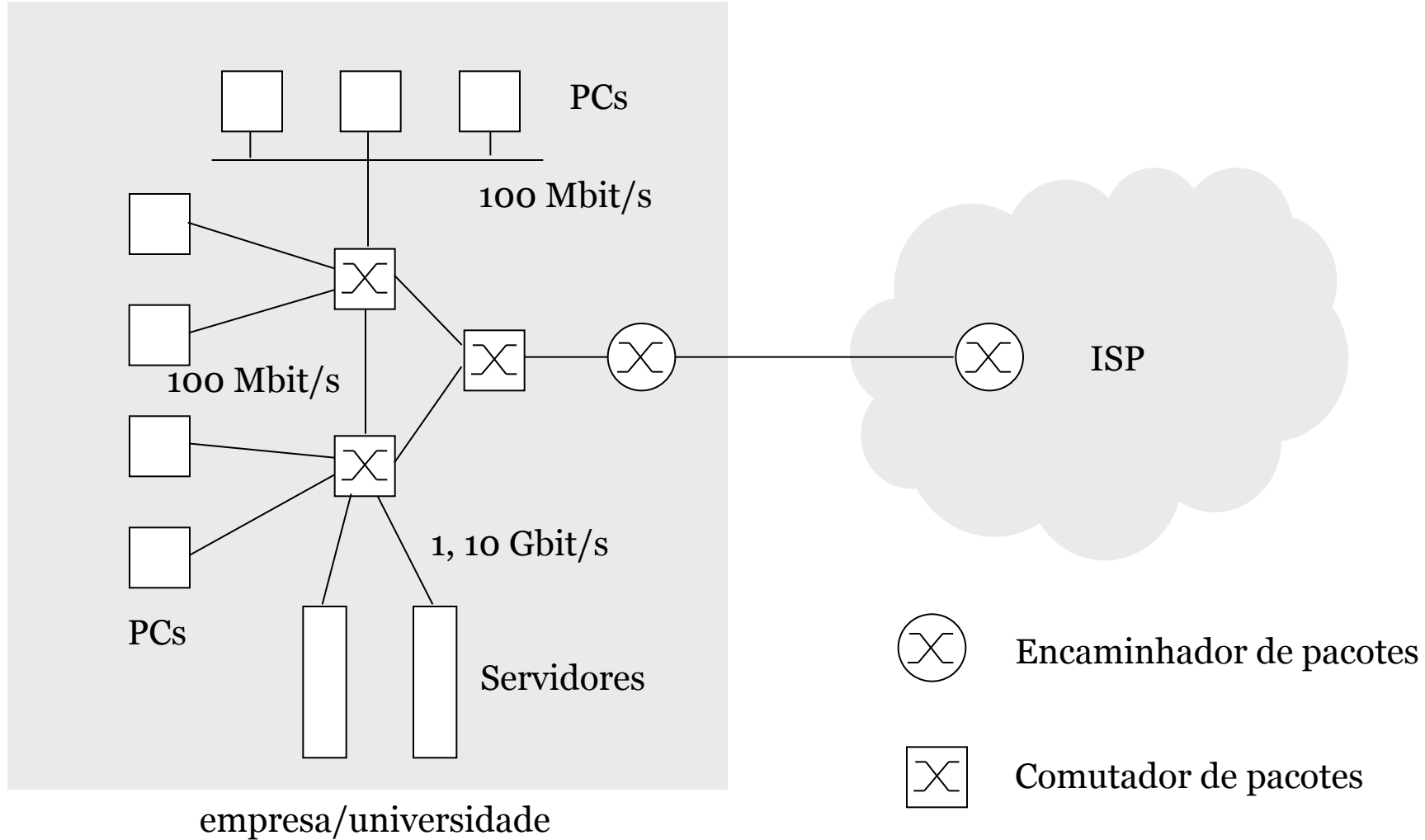
HLR – *Home Location Register*  
VLR – *Visitor Location Register*



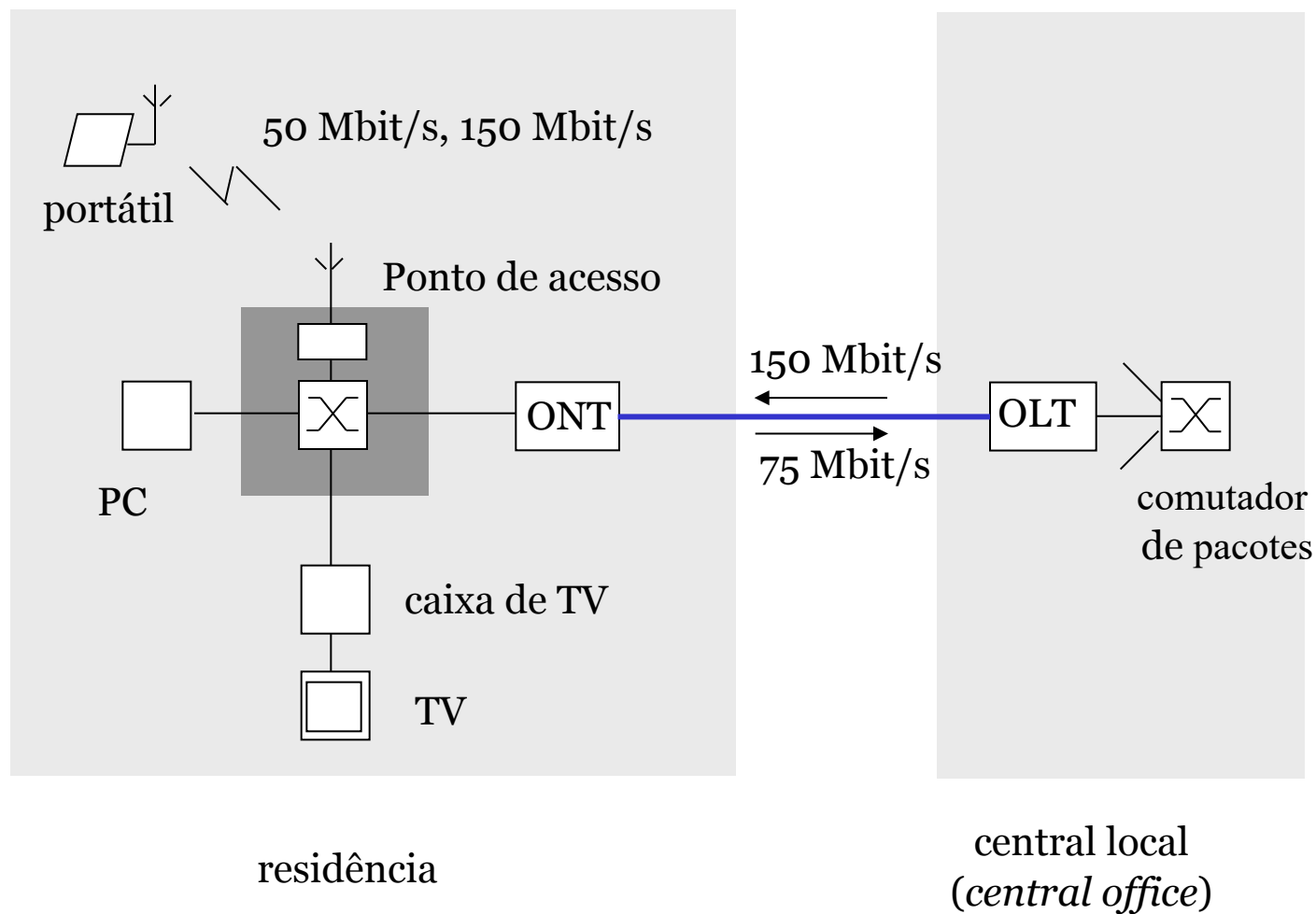
# Rede de acesso: satélites



# Rede empresarial/universitária

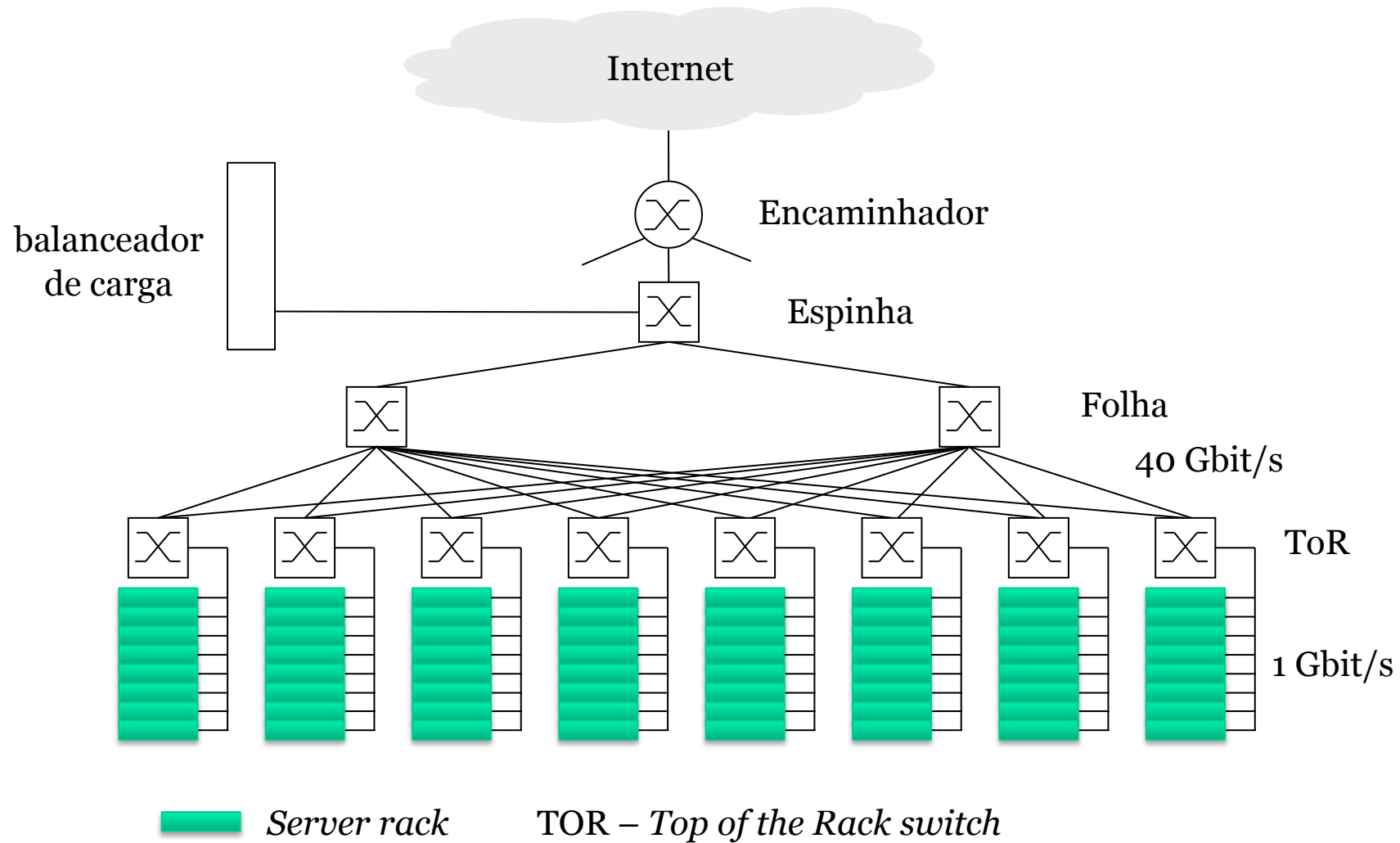


# Rede residencial por DSL

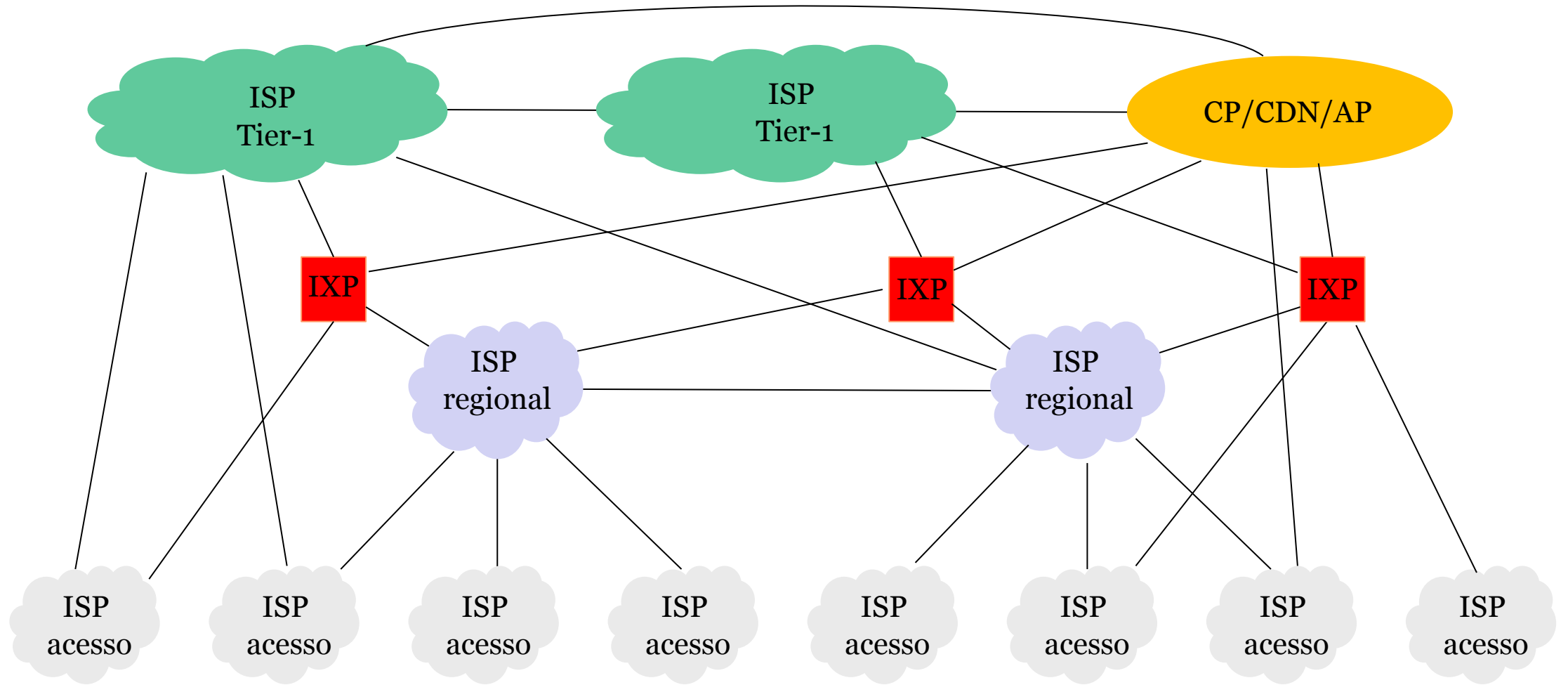


ONT – *Optical Network Terminal*    OLT – *Optical Line Terminal*

# Centro de dados



# A Internet

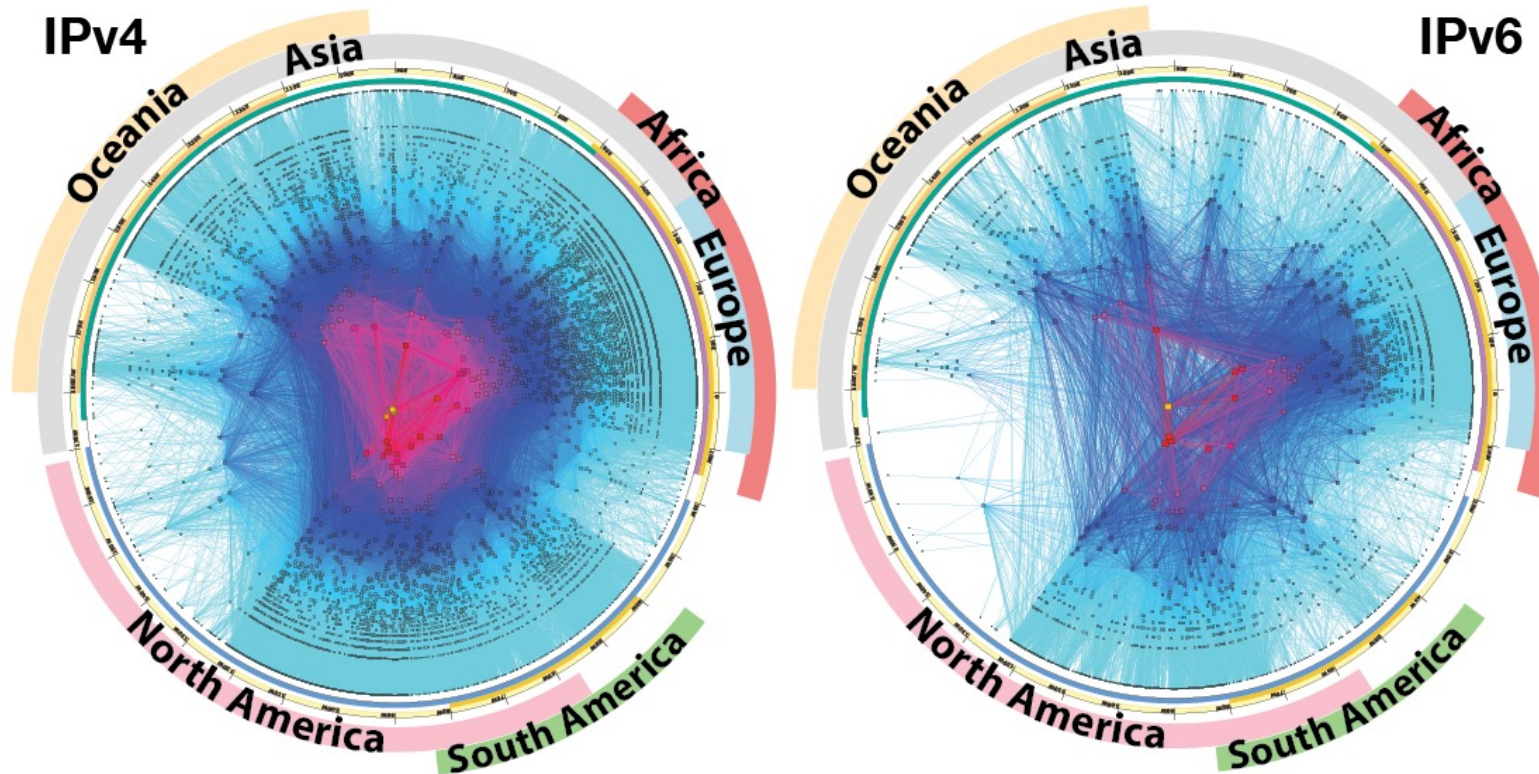


CP – Content Provider    CDN – Content Distribution Network    AP – Application Provider    IXP – Internet Exchange Point

# Mapa de ASes (2015)

## CAIDA's IPv4 vs IPv6 AS Core AS-level Internet Graph

Archipelago July 2015



Copyright © 2015 UC Regents. All rights reserved.

Center for Applied Internet Data Analysis

# Multiplexagem determinística e comutação de circuitos

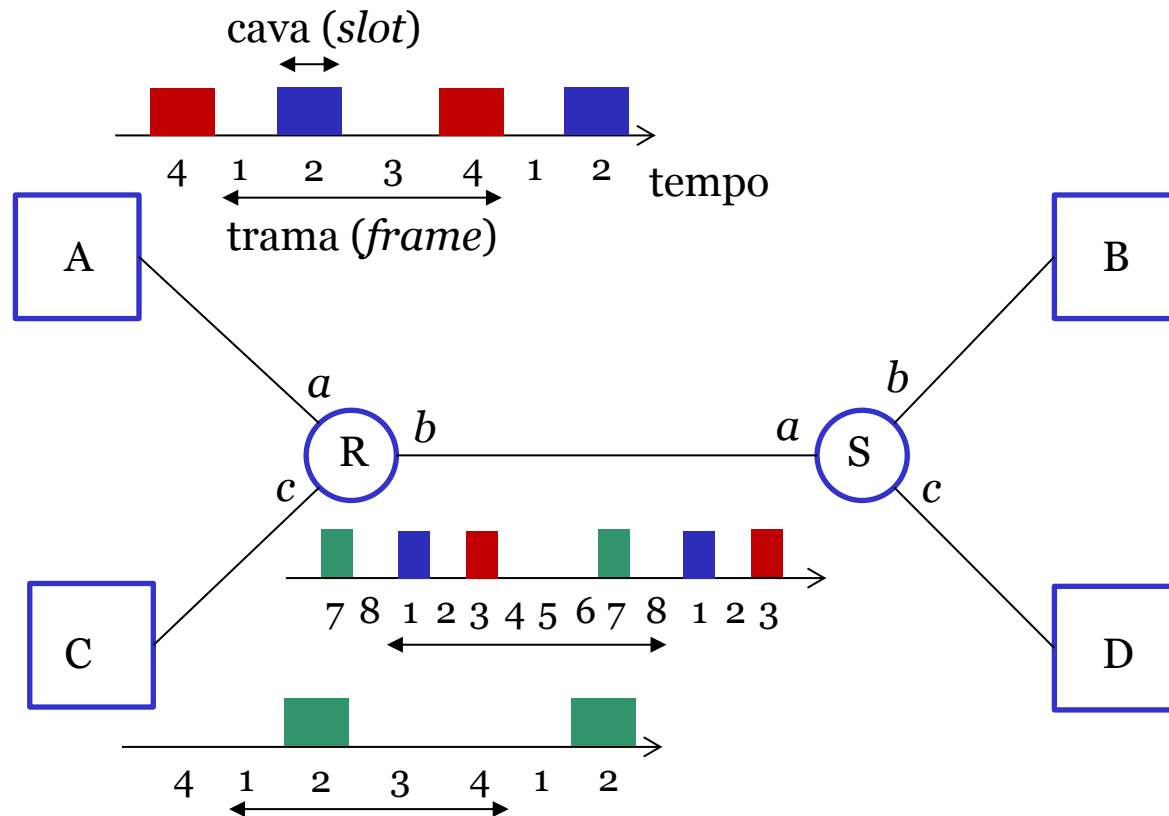


Tabela de expedição em R

Entrada		Saída	
canal	cava	canal	cava
a	2	b	1
a	4	b	3
c	2	b	7

Multiplexagem por divisão no tempo (TDM – *Time Divison Multiplexing*)

# Multiplexagem determinística e comutação de circuitos

## ❑ Multiplexagem

- Divisão de um canal em sub-canais de capacidades fixas (TDM, FDM, WDM, CDM)

## ❑ Comutação

- Circuito: concatenação de sub-canais ao longo de um caminho
- Tabelas de expedição: associação entre pares de entrada (canal, sub-canal) e pares de saída (canal, sub-canal)

## ❑ Circuitos dinâmicos

- Estabelecimento do circuito: atribuições de sub-canais em cada canal de um caminho e preenchimento das tabelas de expedição
- Terminação do circuito: remoção das atribuições e limpeza das tabelas de expedição
- **Bloqueio** se um canal não tiver um sub-canal disponível



# Multiplexagem estatística e comutação de mensagens

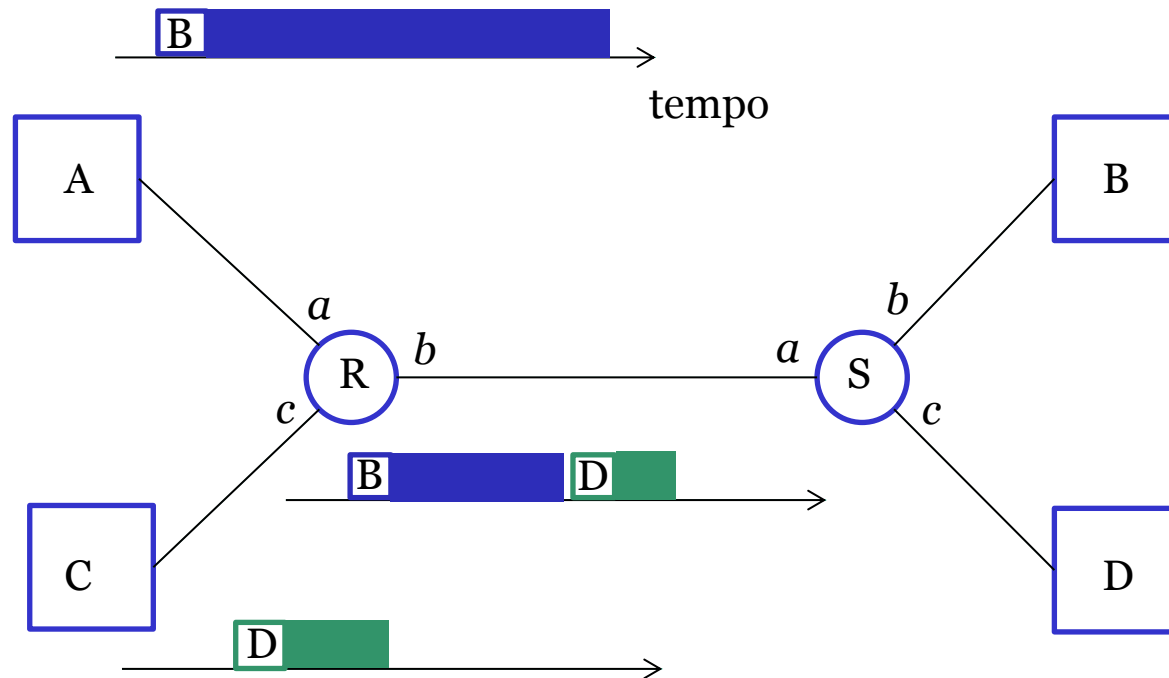


Tabela de expedição em R

destino	porta
B	<i>b</i>
D	<i>b</i>

Tabela de expedição em S

destino	porta
B	<i>b</i>
D	<i>c</i>

# Multiplexagem estatística e comutação de mensagens

## ❑ Multiplexagem

- Partilha assíncrona (no tempo) de um canal entre mensagens
- Cabeçalhos distinguem as mensagens

## ❑ Comutação

- Armazenamento-e-expedição (*store-and-forward*): cada mensagem é recebida na totalidade antes de ser expedida
- Tabelas de expedição: associação entre destinos e portas que aproximam as mensagens dos destinos
- **Congestionamento** se a taxa de chegada de mensagens a um comutador for superior à capacidade deste, conduzindo a atrasos e, possivelmente, a perdas
- **Iniquidade** (*starvation*) quando uma mensagem longa impede o despacho de mensagens curtas

# Multiplexagem estatística e comutação de pacotes por datagramas

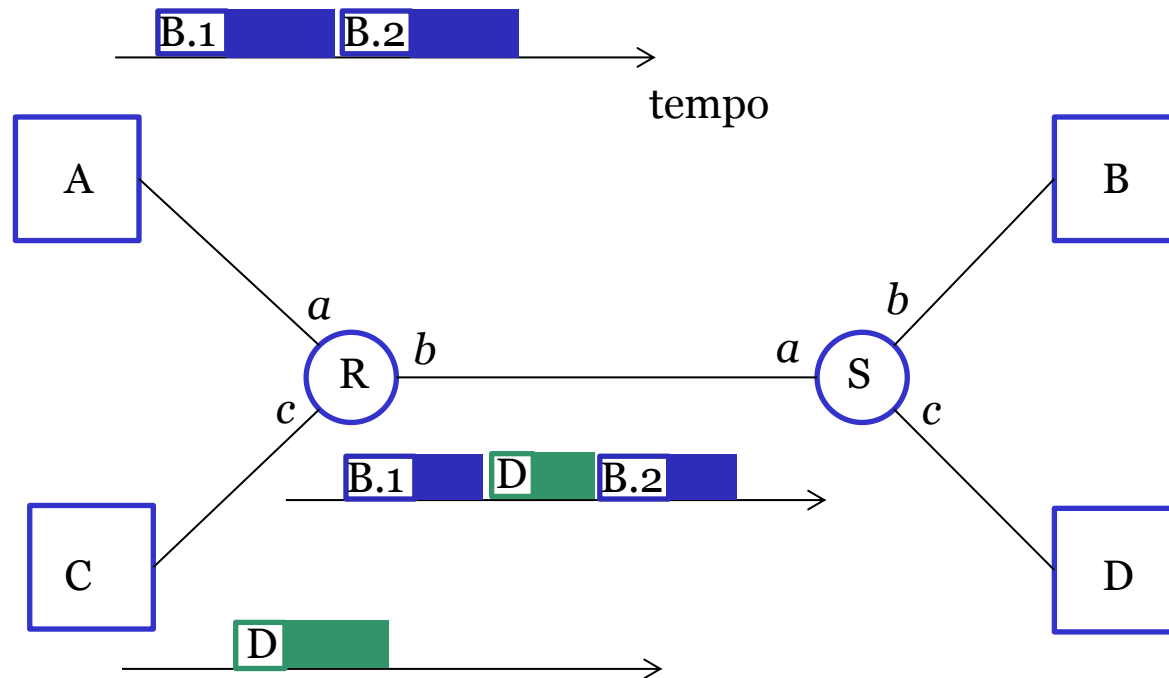


Tabela de expedição em R

destino	porta
B	<i>b</i>
D	<i>b</i>

Tabela de expedição em S

destino	porta
B	<i>b</i>
D	<i>c</i>

# Multiplexagem estatística e comutação de pacotes por datagramas

- ❑ Mensagens e torrentes de dados (*data streams*) divididos em pacotes de pequena dimensão
- ❑ Cabeçalhos dos pacotes contém informação que permite o seu reagrupamento nas mensagens e torrentes de dados originais
- ❑ **Equidade** na partilha dos recursos de transmissão e comutação

# Multiplexagem estatística e comutação de pacotes por circuitos virtuais

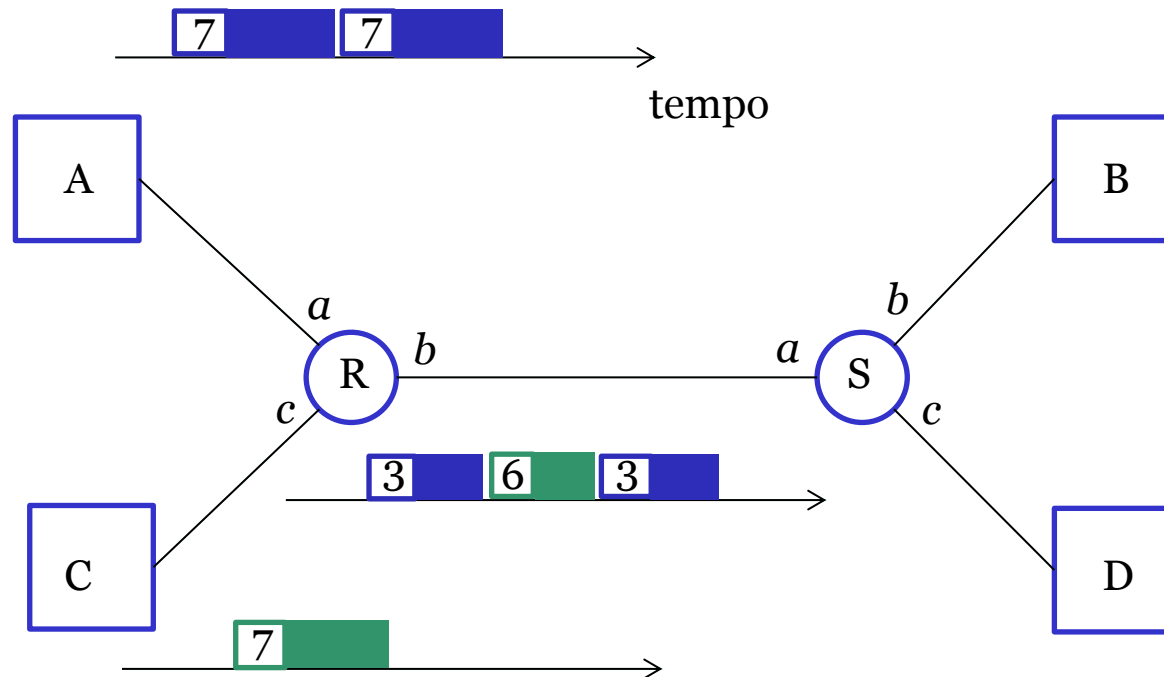


Tabela de expedição em R

Entrada		Saída	
porta	VCI	porta	VCI
<i>a</i>	7	<i>b</i>	3
<i>c</i>	7	<i>b</i>	6

VCI – *Virtual Circuit Identifier*

# Multiplexagem determinística vs. estatística

## ❑ Dados

- $N$  fluxos independentes
- Cada fluxo: débito 16 Mbit/s durante 10% do tempo
- Ligação: 100 Mbit/s

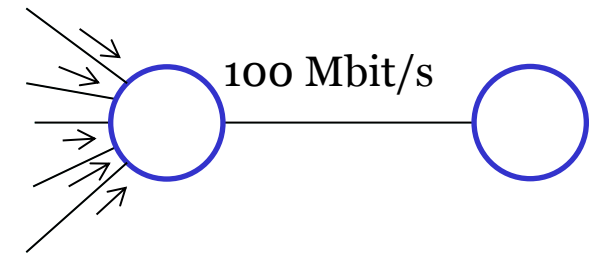
## ❑ Multiplexagem determinística

- Bloqueio para  $N > 6$
- Débito no canal igual ou inferior a 9,6 Mbit/s

## ❑ Multiplexagem estatística

- Probabilidade de congestionamento para  $N = 30$  é  
$$\sum_{i=7}^{30} \binom{30}{i} 0,1^i \times 0,9^{30-i} \approx 0,03$$
- Débito no canal para  $N = 30$ : 48 Mbit/s

$N \times 16 \text{ Mbit/s @ } 10\% \text{ do tempo}$



# Atraso de pacote em uma secção de um caminho



$$d^{switch} + d^{queue} + d^{trans} + d^{prop}$$

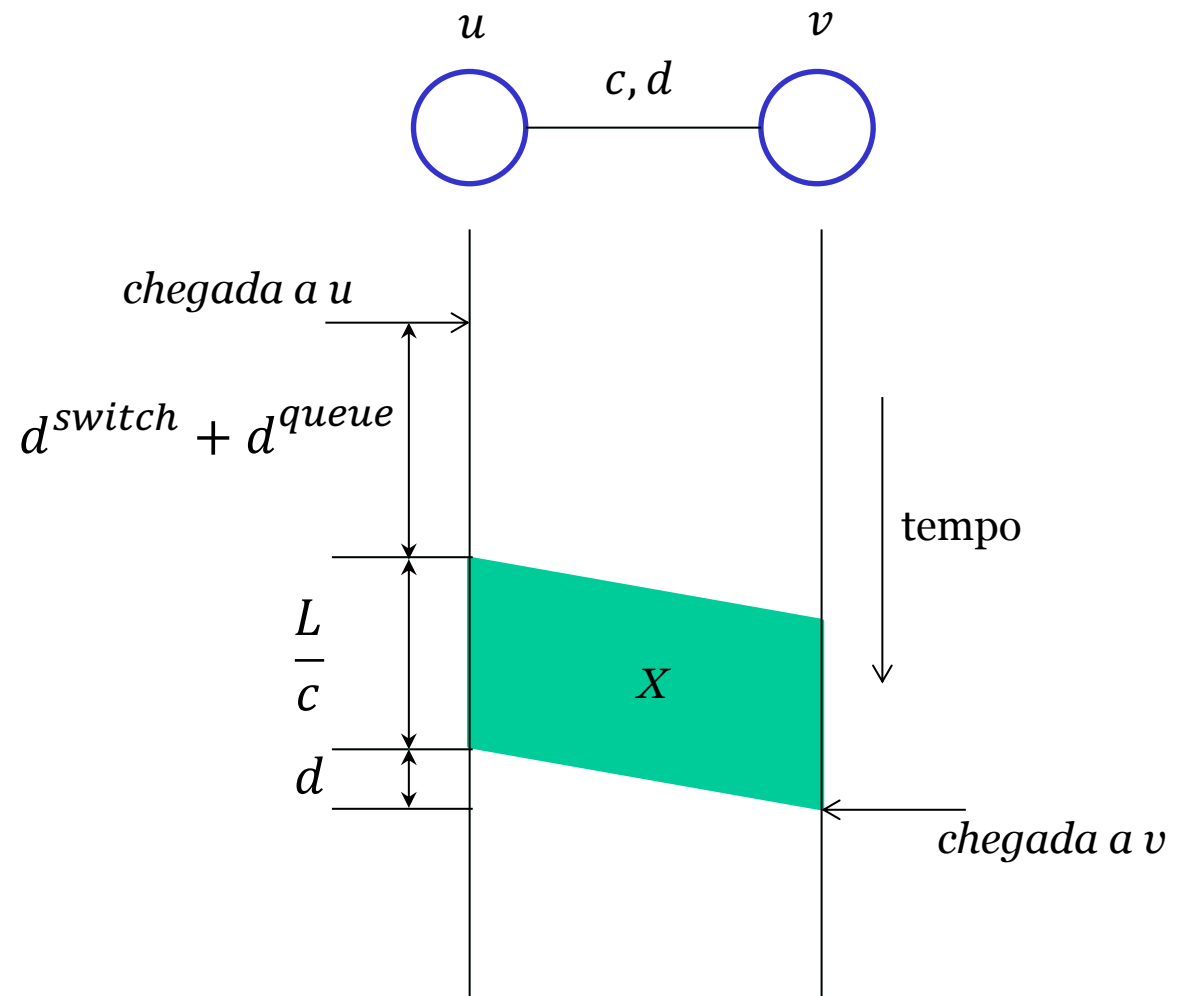
- ❑ Componentes do atraso de um pacote de  $u$  para  $v$ 
  - comutação em  $u$  para  $v$ ,  $d^{switch}$
  - fila-de-espera em  $u$  para  $v$ ,  $d^{queue}$
  - transmissão em  $u$  para  $v$ ,  $d^{trans}$
  - propagação de  $u$  para  $v$ ,  $d^{prop}$
- ❑ Perda de pacotes se o *buffer* em  $u$  para  $v$  estiver cheio

# Atraso de pacote em uma secção de um caminho

- $L$  - dimensão do pacote  $X$  [bits]
- $c$  - capacidade de  $uv$  [bits/s]
- $d$  - propagação em  $uv$  [s]
- $d^X$  - atraso do pacote  $X$  de  $u$  para  $v$  [s]

- $d^{switch} = L/c$
- $d^{prop} = d$

$$d^X = d^{switch} + d^{queue} + \frac{L}{c} + d$$

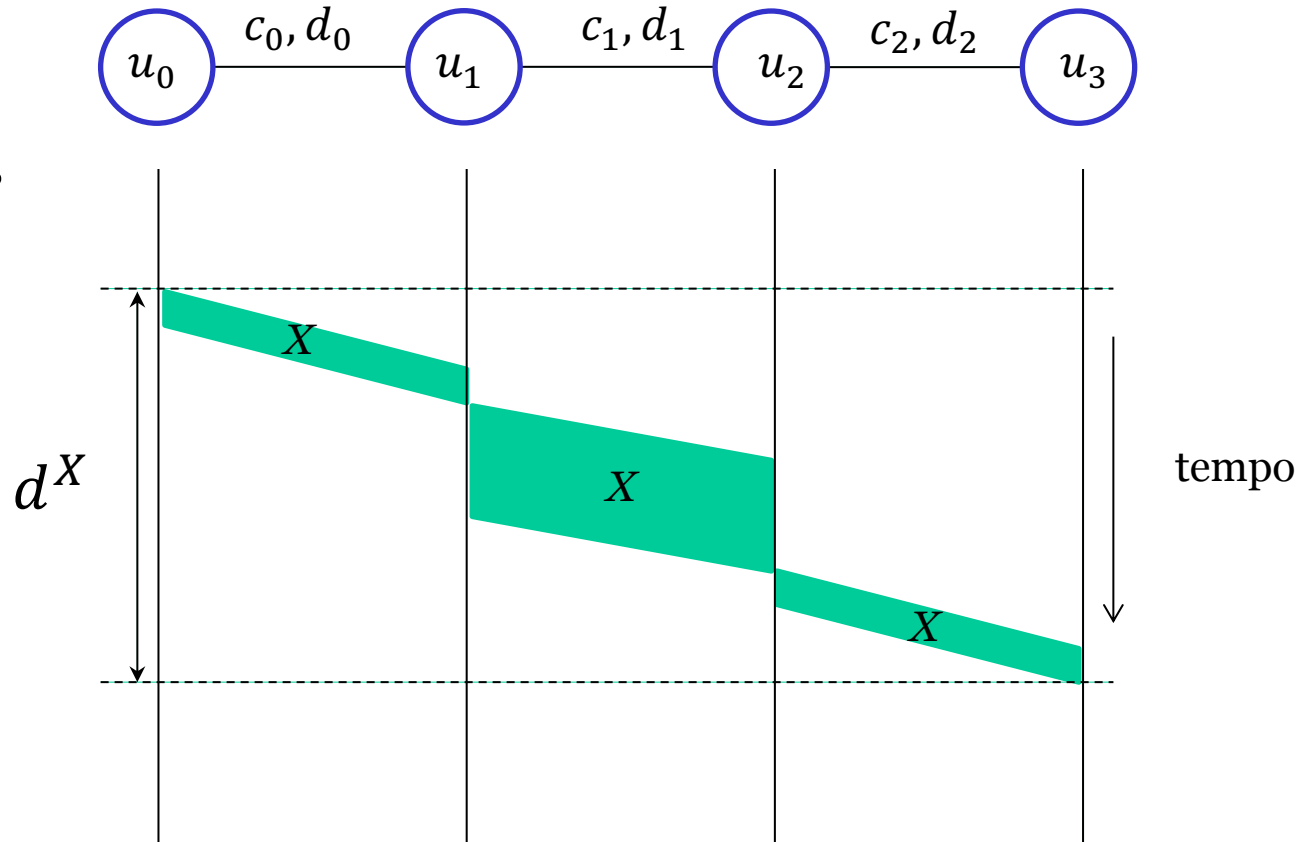




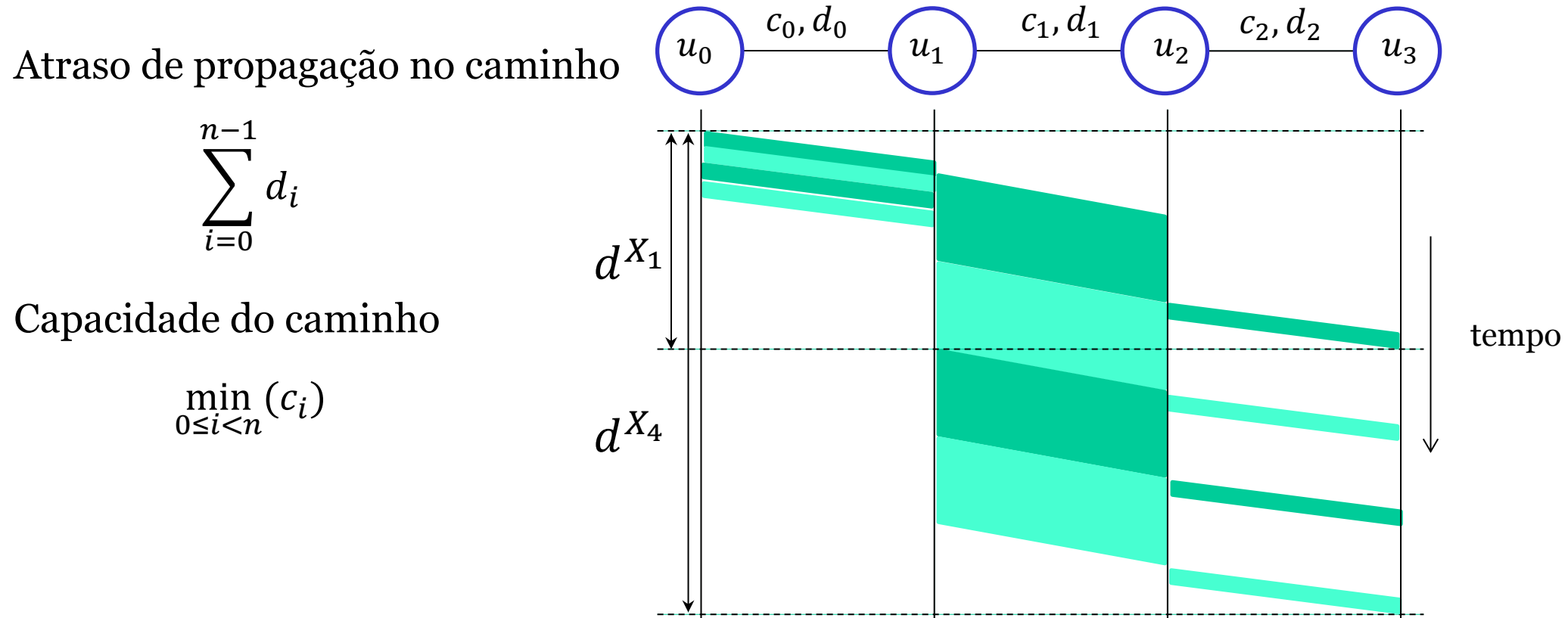
# Atraso de um pacote ao longo de um caminho

Atraso ao longo de um caminho  
=  
soma dos atrasos nas suas secções

$$d^X = \sum_{i=0}^{n-1} \left( \frac{L}{c_i} + d_i \right)$$



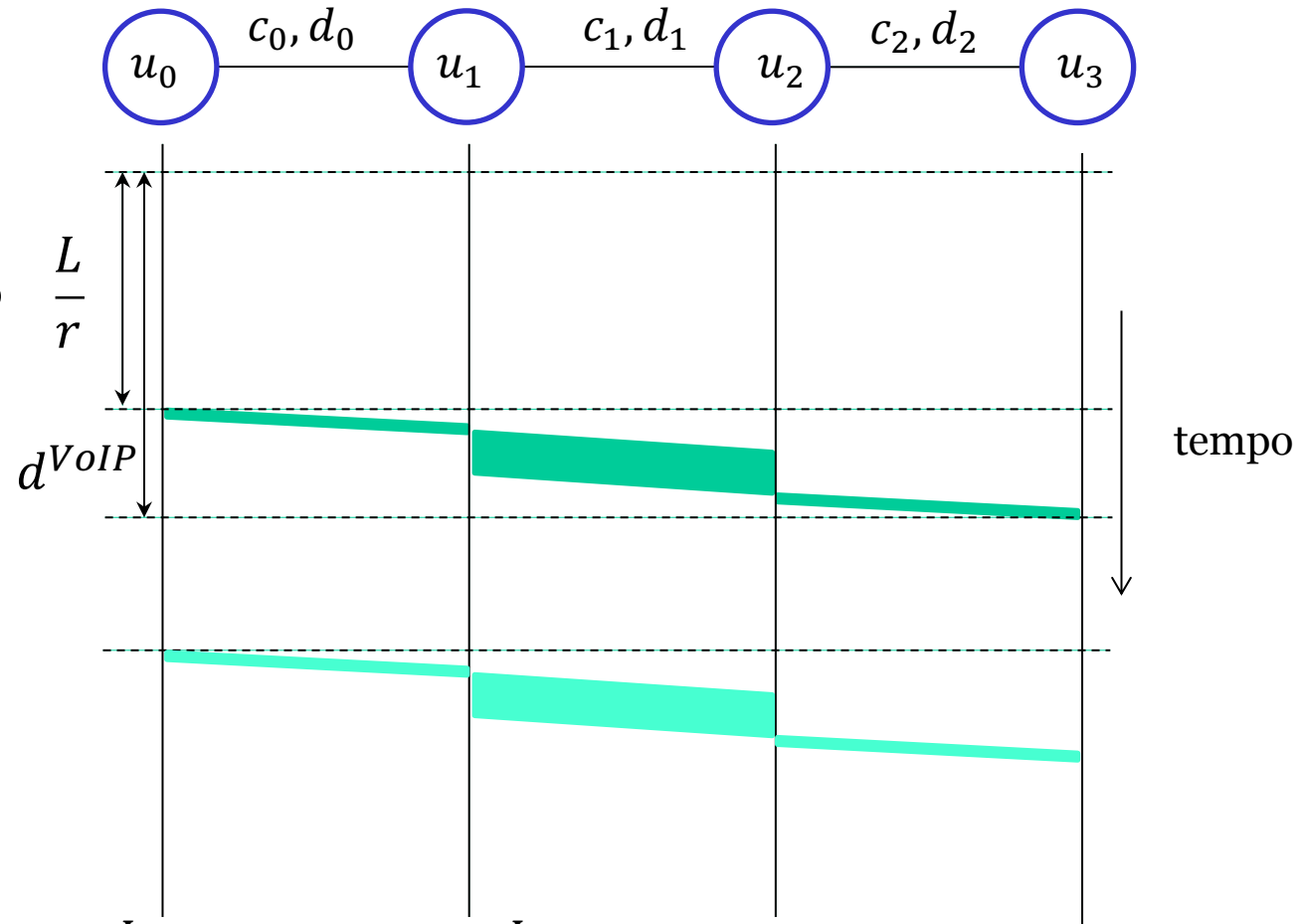
# Latência de mensagem com $N$ pacotes



$$d^{X_N} = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{L}{c_i} + \sum_{i=0}^{n-1} d_i + \frac{(N-1)L}{\min_{0 \leq i < n} (c_i)} \approx \sum_{i=0}^{n-1} d_i + \frac{NL}{\min_{0 \leq i < n} (c_i)}$$

# Latência de uma torrente de áudio (VoIP)

- $r$  - débito de codificação
- $L$  - dimensão dos pacotes
- $d^{VoIP}$  - atraso na comunicação
- $d^{packet} = L/r$

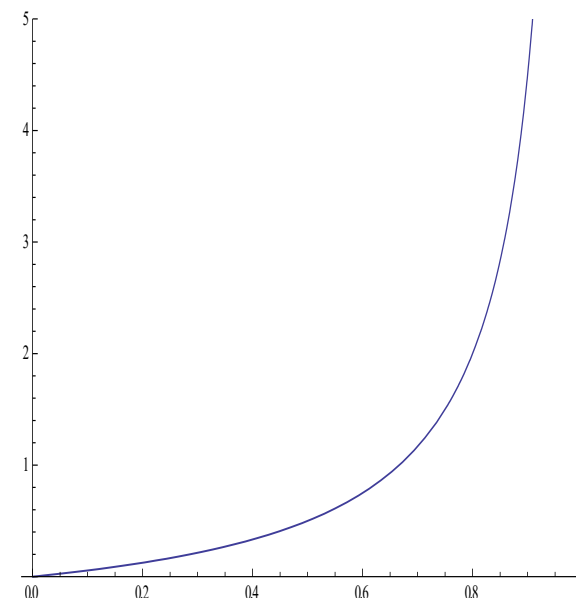
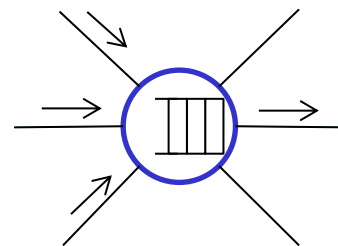


$$d^{VoIP} = \frac{L}{r} + \sum_{i=0}^{n-1} \frac{L}{c_i} + \sum_{i=0}^{n-1} d_i \approx \frac{L}{r} + \sum_{i=0}^{n-1} d_i$$

# Atraso em fila-de-espera

- Pacotes de comprimento fixo:  $L$  [bits]
- Chegada de pacotes ao canal de saída: processo de Poisson com taxa  $\lambda$  [pkt/s] (fila M/D/1)
- Capacidade do canal de saída:  $c$  [bit/s]

- Débito à entrada do canal de saída:  $\lambda \times L$
- Utilização do canal de saída:  $\rho = \lambda \times L / c$
- Probabilidade de um pacote esperar em fila:  $\rho$
- Atraso médio em fila:  $\frac{L}{c} \frac{\rho}{2(1-\rho)}$



# Tamanho dos pacotes na prática

Tipicamente, os pacotes têm entre 64 bytes e 1500 bytes

	10 Mbit/s	100 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
64 bytes	51,2 $\mu$ s	5,1 $\mu$ s	512 ns	51 ns
1500 bytes	1,2 ms	120 $\mu$ s	12 $\mu$ s	1,2 $\mu$ s
64 Kibytes	52,4 ms	5,2 ms	520 $\mu$ s	52 $\mu$ s

Para capacidades elevadas, a granularidade em pacotes pode ser desprezada

# traceroute

tracert (windows), traceroute (linux), [www.traceroute.org](http://www.traceroute.org)

*mtr request - www.it.pt*

<div>www.it.pt</div> <div>Traceroute</div>										
Hop	Host	C	Loss%	ASN	best	Avg	worst	Country	BGP Prefix	ASName
3	<a href="#">D 99-185-40-2.lightspeed.sntcca.sbcglobal.</a>	5	0%	<a href="#">7132</a>	21.6	21.94	22.5	US	99.176.0.0/12	SBIS-AS - AT&T Inte
4	<a href="#">D 71.145.12.202</a>	5	0%	<a href="#">7132</a>	21.7	21.9	22.2	US	71.128.0.0/11	SBIS-AS - AT&T Inte
6	<a href="#">D 71.145.0.4</a>	5	0%	<a href="#">7132</a>	22.3	23.8	27.9	US	71.128.0.0/11	SBIS-AS - AT&T Inte
7	<a href="#">D 151.164.43.214</a>	5	0%	<a href="#">7132</a>	21.1	58.04	204.7	US	151.164.43.0/24	SBIS-AS - AT&T Inte
8	<a href="#">D ppp-151-164-38-141.rcsntx.swbell.net</a>	5	0%	<a href="#">7132</a>	20.8	21.5	22	US	151.164.0.0/16	SBIS-AS - AT&T Inte
9	<a href="#">D asn1299-telia.egsica.sbcglobal.net</a>	5	0%	<a href="#">7132</a>	20.7	24.6	30.6	US	151.164.0.0/16	SBIS-AS - AT&T Inte
10	<a href="#">D las-bb1-link.teliana.net</a>	5	0%	<a href="#">1299</a>	96.7	96.8	97	EU	80.91.248.0/21	TELIA NET TeliaNet G
11	<a href="#">D prs-bb1-link.teliana.net</a>	5	0%	<a href="#">1299</a>	174	176.78	185.8	EU	80.91.248.0/21	TELIA NET TeliaNet G
12	<a href="#">D mno-b1-link.teliana.net</a>	5	0%	<a href="#">1299</a>	186.1	222.78	343.8	EU	80.91.248.0/21	TELIA NET TeliaNet G
13	<a href="#">D dante-ic-125713-mno-b1.c.teliana.net</a>	5	0%	<a href="#">1299</a>	185.8	186.02	186.2	EU	213.248.64.0/18	TELIA NET TeliaNet G
14	<a href="#">D so-6-3-0.rt1.gen.ch.geant2.net</a>	5	0%	<a href="#">20965</a>	194.3	196.84	206.2	EU	62.40.96.0/19	GEANT The GEANT IP
15	<a href="#">D so-7-0-0.rt1.mad.es.geant2.net</a>	5	0%	<a href="#">20965</a>	215.8	216.14	216.8	EU	62.40.96.0/19	GEANT The GEANT IP
16	<a href="#">D fccn-qw.rt1.mad.es.geant2.net</a>	5	0%	<a href="#">20965</a>	227.1	227.3	227.5	EU	62.40.96.0/19	GEANT The GEANT IP
17	<a href="#">D ROUTER9.10GE.Lisboa.fccn.pt</a>	5	0%	<a href="#">1930</a>	226.9	227.26	227.6	PT	193.136.0.0/15	RCCN Rede Ciencia T
18	<a href="#">D UTL.Lisboa.fccn.pt</a>	5	0%	<a href="#">1930</a>	227.1	227.38	227.8	PT	193.136.0.0/15	RCCN Rede Ciencia T
19	<a href="#">D gatekeeper1.ist.utl.pt</a>	5	0%	<a href="#">1930</a>	227.4	227.74	227.9	PT	193.136.0.0/15	RCCN Rede Ciencia T
21	<a href="#">D 193.136.222.254</a>	5	0%	<a href="#">1930</a>	228.2	228.42	228.7	PT	193.136.0.0/15	RCCN Rede Ciencia T
22	<a href="#">D sintra.lx.it.pt</a>	5	0%	<a href="#">1930</a>	227.5	228.08	228.6	PT	193.136.0.0/15	RCCN Rede Ciencia T

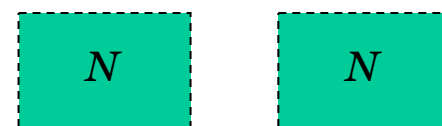
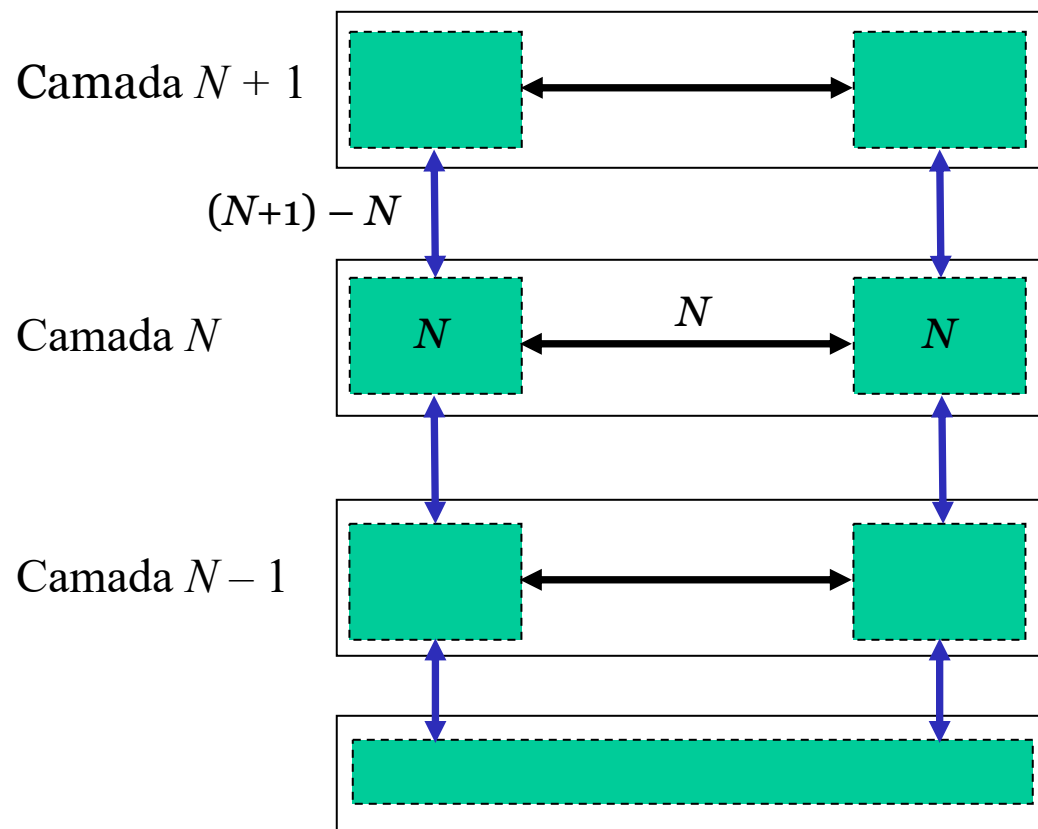
Page rendered in 2.6138 seconds for www.it.pt

# Speedmeter

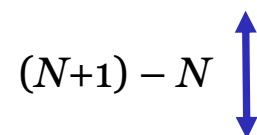
Speedmeter



# Arquitetura modular em camadas



Entidades par da camada  $N$



Interface de serviço entre as camadas  $N$  e  $N + 1$

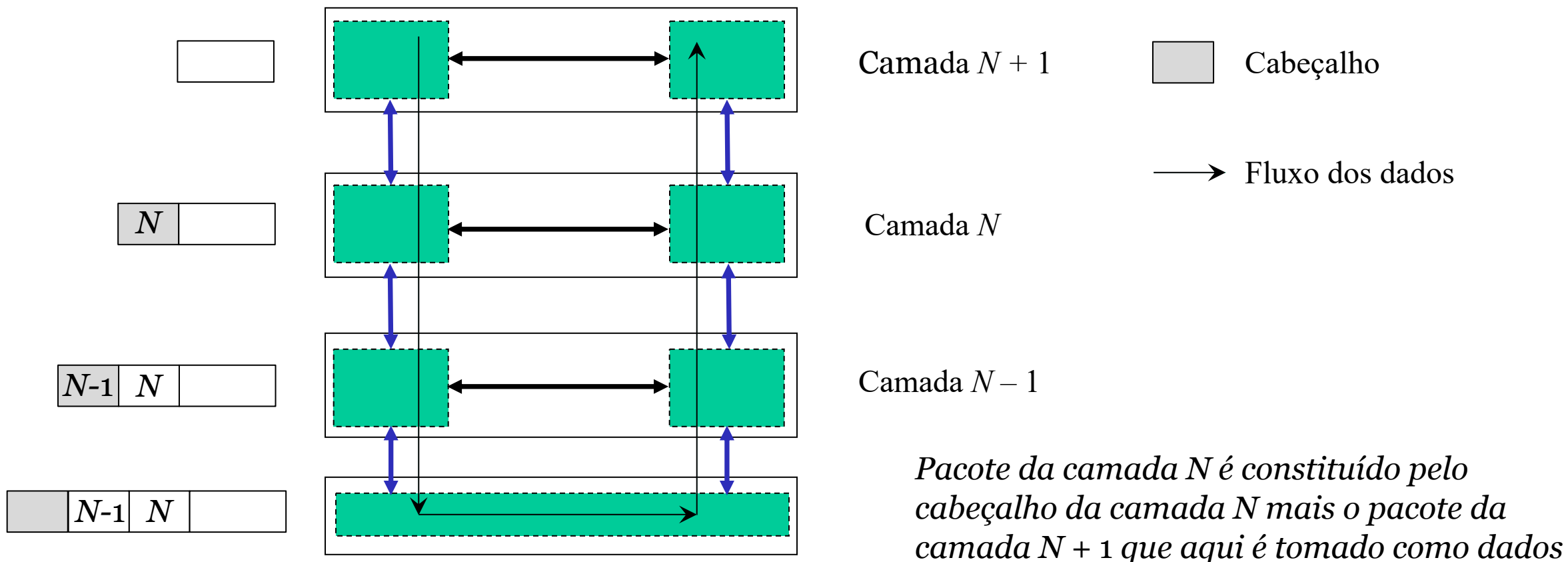


Protocolo da camada  $N$

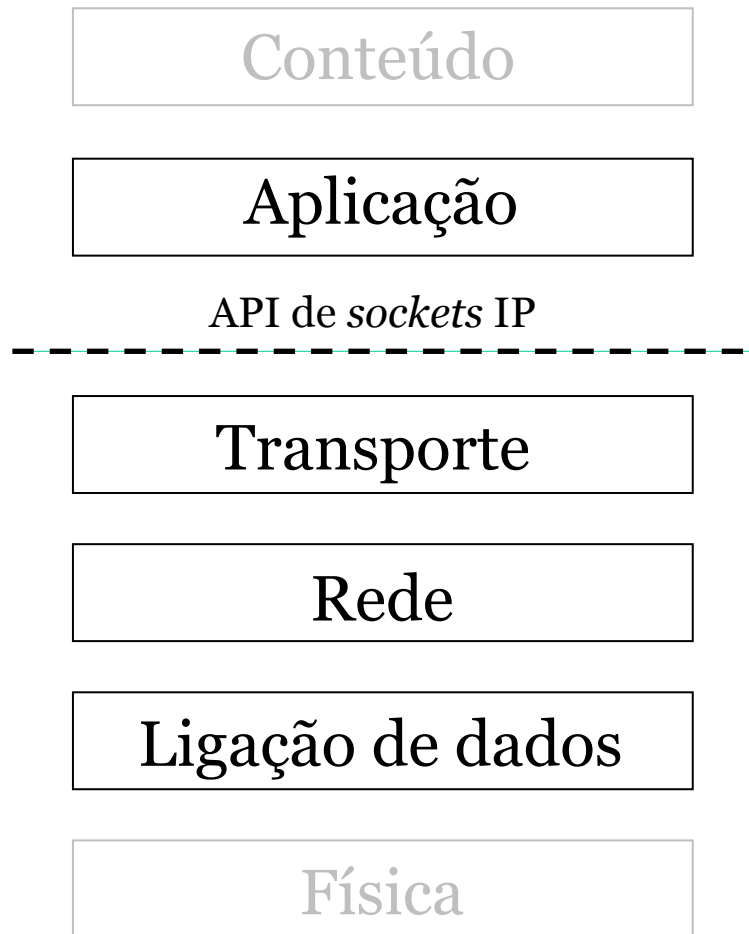
*A camada  $N$  usa os serviços da camada  $N - 1$  para fornecer um serviço (mais sofisticado) à camada  $N + 1$*



# Encapsulamento de pacotes



# Arquitetura da Internet (simplificação)

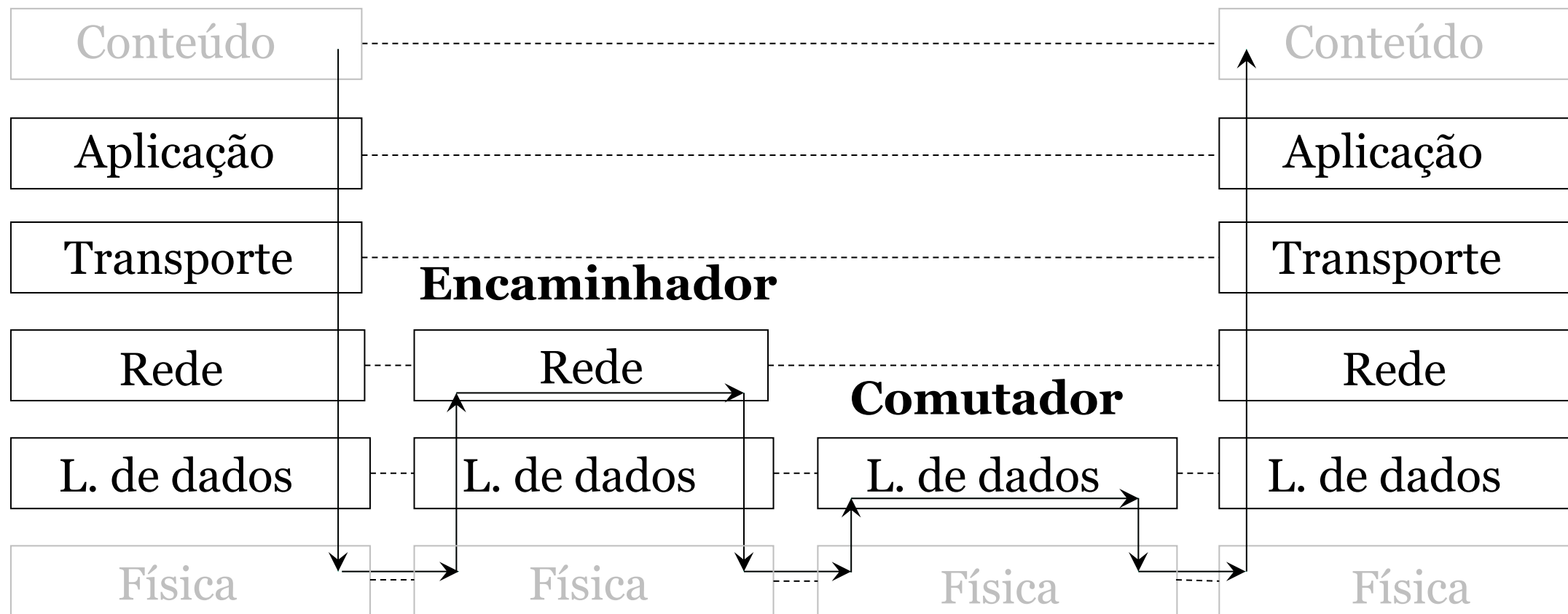


- ❑ Aplicação
  - Protocolos dependentes da aplicação em causa
- ❑ Transporte
  - Controlo de erros e de fluxo extremo-a-extremo, controlo de congestionamento
- ❑ Rede
  - Encaminhamento e expedição globais
- ❑ Ligação de dados
  - Controlo de erros local, encaminhamento e expedição locais, controlo de acesso ao meio
- ❑ **Multiplexagem e identificação em todas as camadas**

# Arquitetura da Internet nos dispositivos

## Sistema terminal

## Sistema terminal



# Identificadores na Internet: nomes e endereços

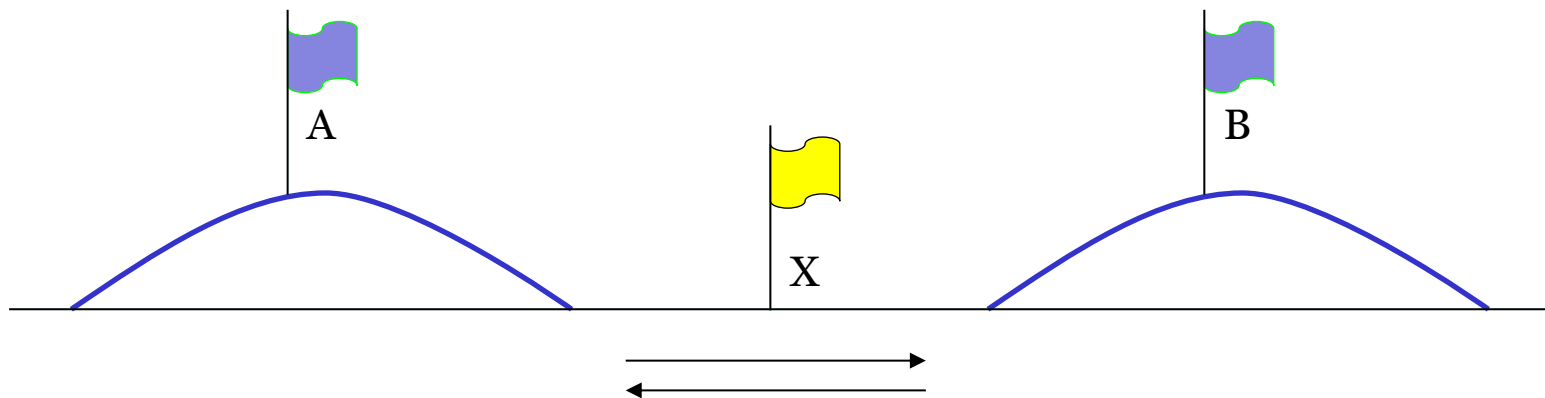
Ap.	Serviço+Nome
Trans.	Porto+Endereço IP
Rede	Endereço IP
L. dados	Endereço MAC

MAC – *Medium Access Control*

- ❑ Serviço
  - http (www), smtp (@)
- ❑ Nomes
  - tecnico.ulisboa.pt, amazon.com
- ❑ Portos:
  - 25, 80, 58000
- ❑ Endereços IP:
  - 192.178.222.79 (IPv4)
  - 2001:db8:3e8:110:9a71:5f4e:74a1:120 (IPv6)
- ❑ Endereços MAC
  - 67-89-AB-CD-EF

# Problema dos dois generais: concordância

- ❑ Os generais A e B são aliados e inimigos do general X
- ❑ A e B só conseguem derrotar X se o ataque for coordenado
- ❑ A decide se o ataque ocorrerá de noite ou de madrugada
- ❑ A comunicação entre A e B é por intermédio de mensageiros que podem ser capturados por X
- ❑ Que protocolo permite a A e a B coordenar o ataque?



# Tentativa de protocolo

- ❑ A envia mensagem a B com informação de ataque
  - Como é que A sabe que B recebeu mensagem?
- ❑ B envia confirmação a A
  - Como é que B sabe que a confirmação chegou a A?
- ❑ A envia confirmação da confirmação a B
  - Como é que A sabe que a confirmação da confirmação chegou a B?
- ❑ ...

# Impossibilidade de concordância

- ❑ Protocolo  $P$  com o qual A e B terminam no mesmo estado: noite ou madrugada
- ❑ Em qualquer execução de  $P$  pelo menos uma mensagem tem que ser entregue de A para B
- ❑ Execução  $E$  de  $P$  com um número mínimo de mensagens entregues;  
Execução  $E'$  com a última mensagem entregue de  $E$  perdida
  - Seja de B para A a última mensagem entregue
  - Estado final de B é o mesmo em  $E$  e em  $E'$
  - Dado  $P$ , estado final de A em  $E'$  é o mesmo de B em  $E'$ ; portanto, é o mesmo de A em  $E$
  - Contradição:  $E'$  contém menos mensagens entregues do que  $E$

# A comunicação é possível!

- ❑ Há problemas que não requerem concordância
  - Por exemplo, a entrega de uma mensagem de A para B pode requerer que A saiba que a mensagem foi entregue, mas não requer que B saiba que A saiba que a mensagem foi entregue
- ❑ Problemas de concordância são possíveis com uma pequena margem de incerteza
  - O protocolo termina com uma pequeníssima probabilidade de o estado final não ser concordante (Monte Carlo)
  - O protocolo não termina com uma pequeníssima probabilidade, mas nas execuções terminantes há concordância (Las Vegas)