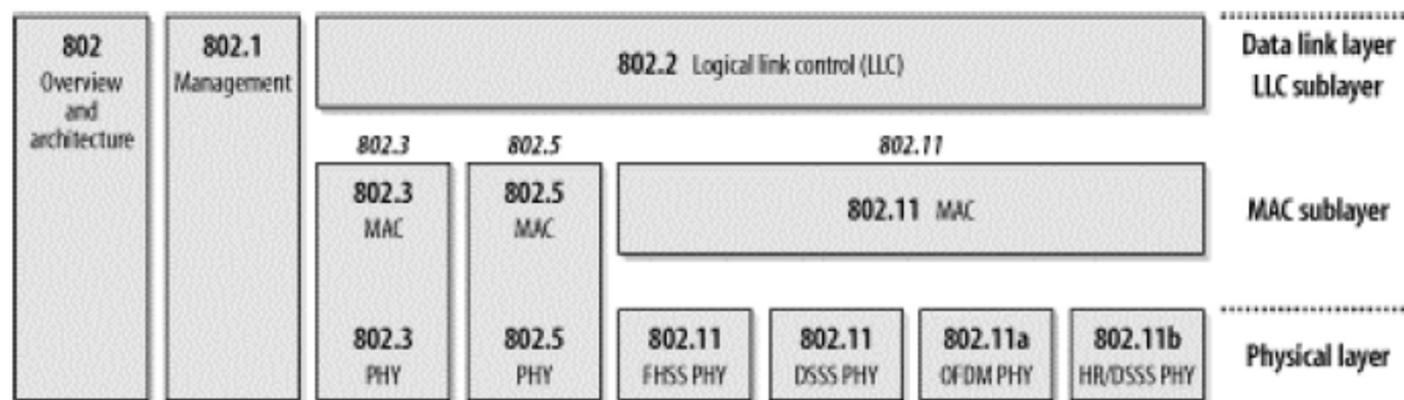


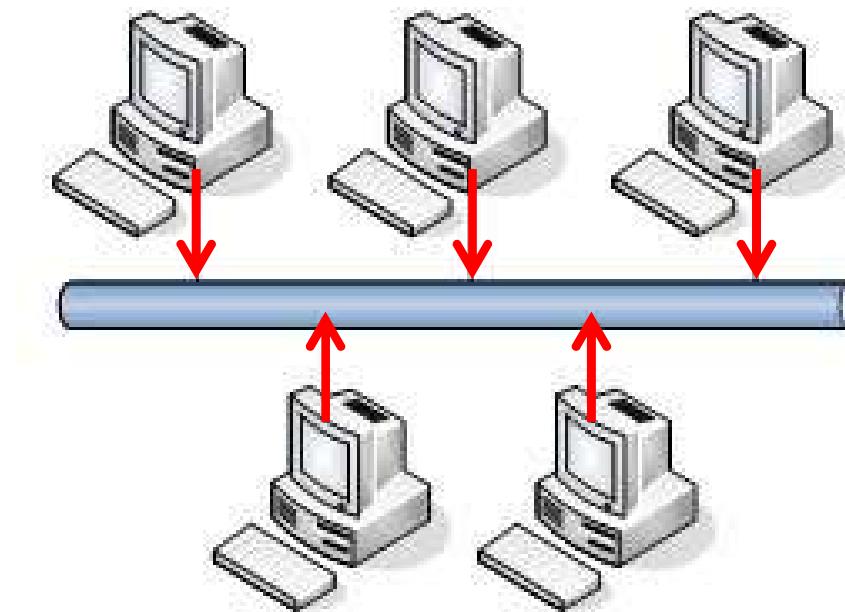
CP4: Sub-Nível de Acesso ao Meio e Redes Locais (refs.)

- Alocação estática versus dinâmica
(Peterson 2021, 2.6; Tanenbaum 2011, 4.1; Stallings Ch. 6)
- Protocolos ALOHA (puro e sincronizado) e sua análise
(Tanenbaum 2011, 4.2)
- O protocolo IEEE 802.3 e IEEE 802.11
(Peterson 2021, 2.6, 2.7; Tanenbaum 2011, 4.3-4.6; Stallings Ch. 16 e 17)
- Interligação de redes
(Peterson 2021, 3.2; Tanenbaum 2011, 4.8; Stallings Ch. 15)
- VLANs (IEEE 802.1Q)
(Peterson 2021, 3.2; Tanenbaum 2011, 4.8)
- Spanning tree protocol (IEEE 802.1D)
(Peterson 2021, 3.2; Tanenbaum 2011, 4.8)



Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (Medium Access Control Sublayer)

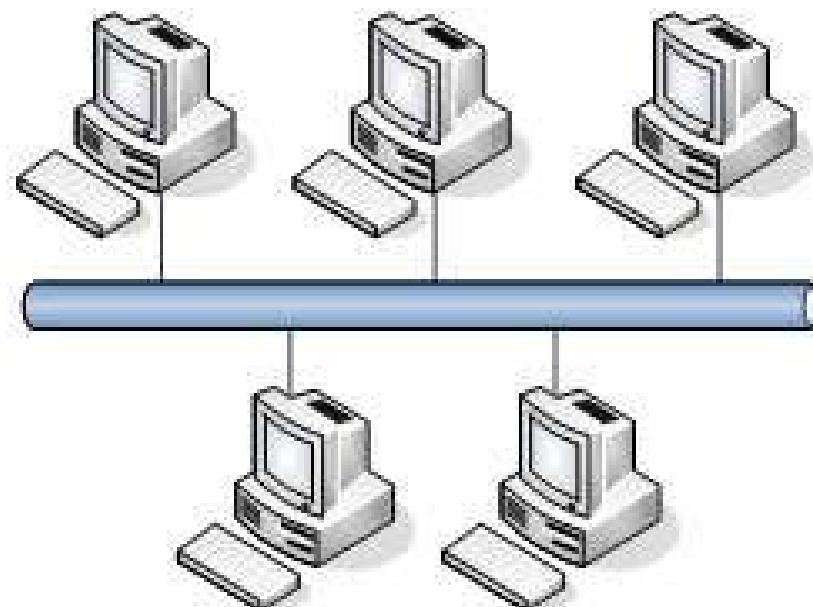
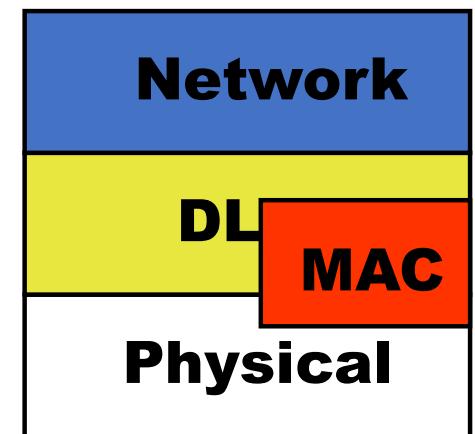
- Como é que controlamos o acesso a um meio de transmissão partilhado por múltiplos utilizadores de forma dinâmica?



Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (Medium Access Control Sublayer)

Medium Access Control (MAC) Sublayer:

- Implementa as funcionalidades de um subnível entre o nível ligação de dados (transmissão de tramas) e o nível físico (detecção das colisões)



Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

- **Alocação dinâmica - hipóteses:**

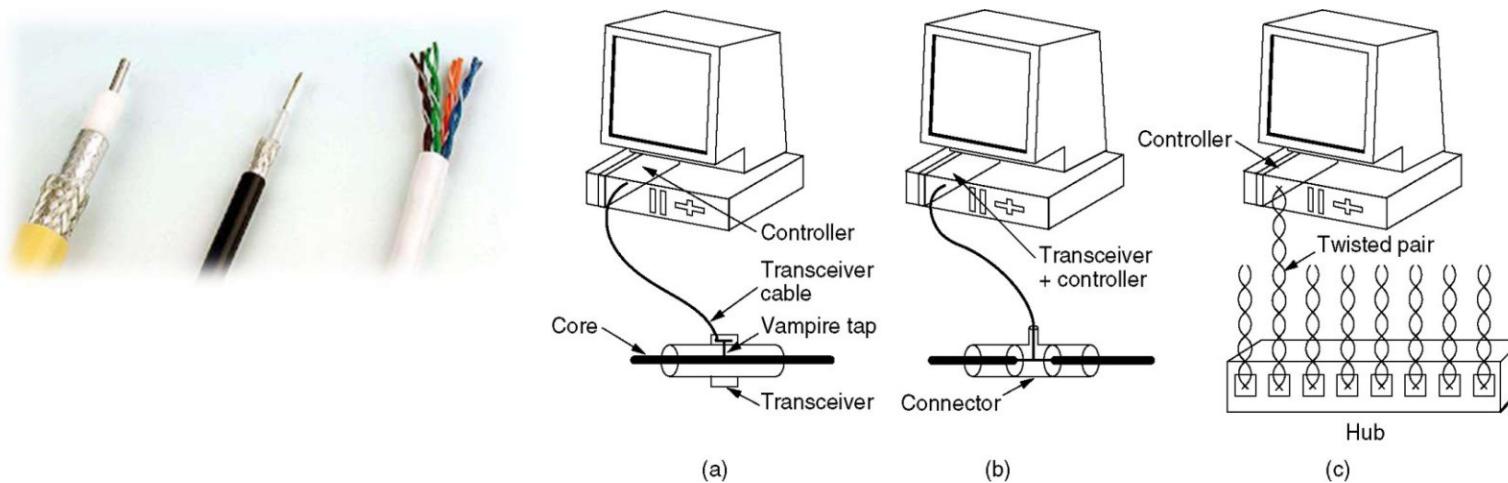
- N estações independentes (não há coordenação)
- Um único canal partilhado por todas as estações
- Colisões (receptor “escuta” duas ou mais transmissões)
- Característica temporal:
 - Tempo contínuo “*Continuous Time*”
 - Tempo às fatias “*Slotted Time*”
- Escuta do canal:
 - Com detecção de portadora “*Carrier Sense*”
 - Sem detecção de portadora “*No Carrier Sense*”

IEEE 802.3/Ethernet

- Nível Físico
 - Cablagem
 - Codificação de Linha (Manchester)
- Nível de Ligação de Dados
 - Estrutura da Trama
 - Protocolo de Controlo de Acesso ao Meio
 - Algoritmo de Resolução de Colisões: *Binary Exponential Backoff*
- Algumas Evoluções da Norma IEEE 802.3/Ethernet
 - Switched Ethernet
 - Fast Ethernet
 - Gigabit Ethernet

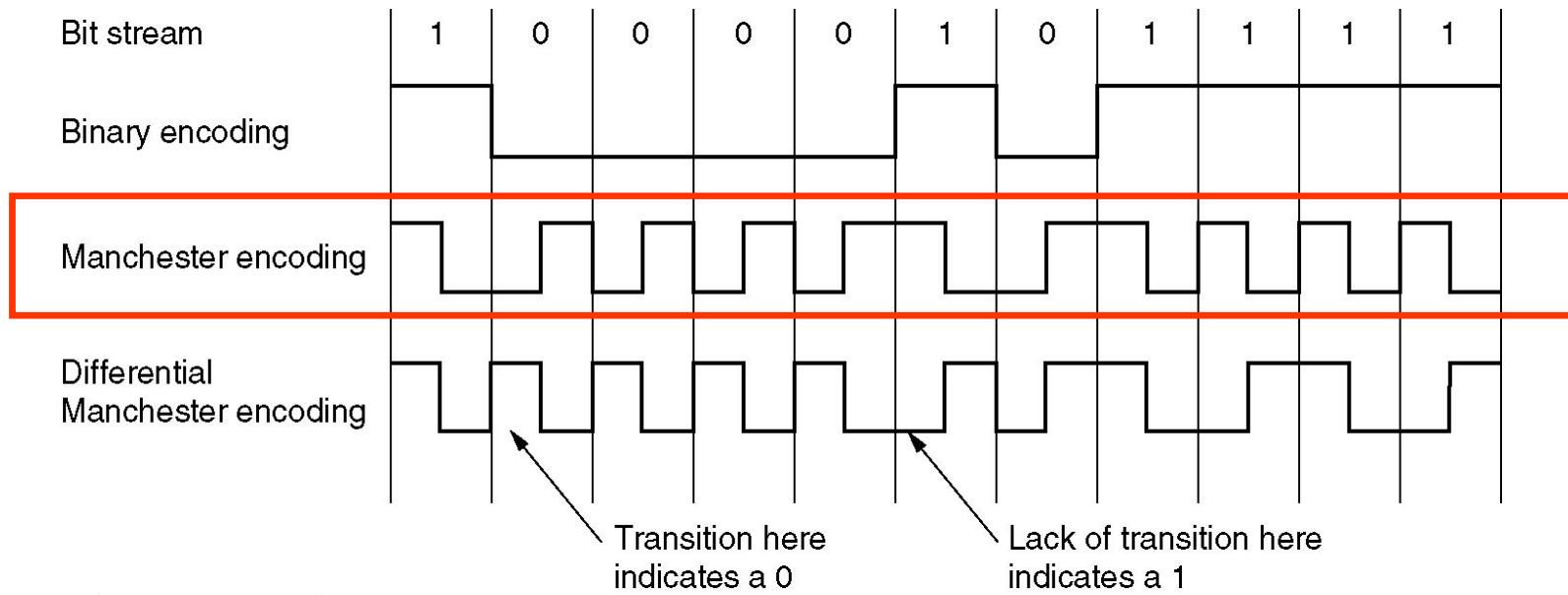
IEEE 802.3/Ethernet: Cablagem

Nome	Cabos	Comp. seg.	Nós/seg.	Características
10Base5	Coaxial grosso	500m	100	Pouco utilizado hoje em dia
10Base2	Coaxial fino	200m	30	Sem Hubs
10Base-T	Par entrançado	100m	1024	Manutenção fácil
10Base-F	Fibra óptica	2000m	1024	Ligações entre edifícios



(a) 10Base5, (b) 10Base2, (c) 10Base-T.

IEEE 802.3/Ethernet: Codificação de Linha

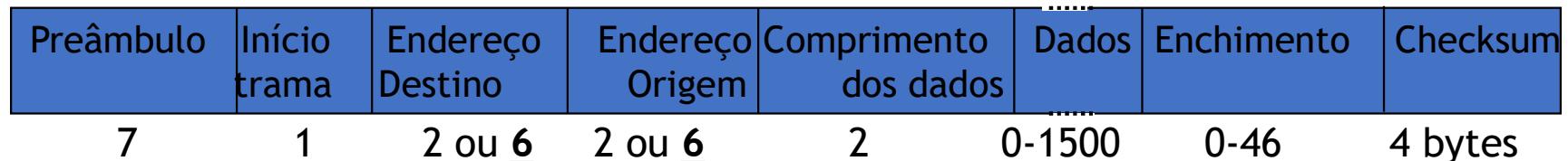


•Código de Manchester:

- 2 x LB;
- $V_{min} = -0,85 \text{ V}$, $V_{max} = +0,85 \text{ V}$;
- DC = 0 V

IEEE 802.3/Ethernet: Estrutura da Trama

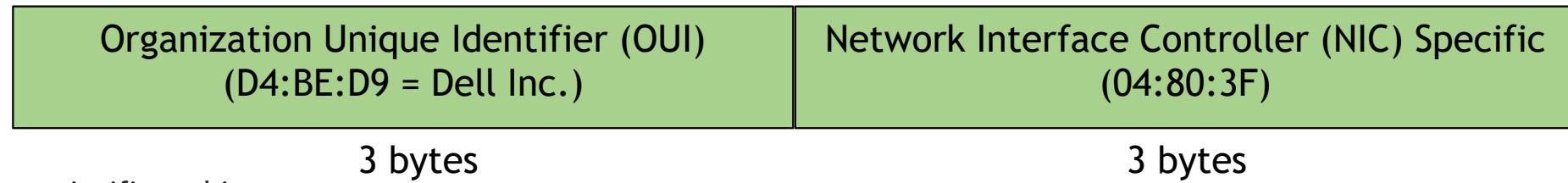
Estrutura da Trama:



Preâmbulo: 7 x 10101010; Início de trama: 10101011

Endereço:
LSB of 1st byte = 0 - endereço “unicast” (e.g., D4:BE:D9:04:80:3F)
LSB of 1st byte = 1 - endereço de grupo “multicast”
todos os bits a 1 - “broadcast”

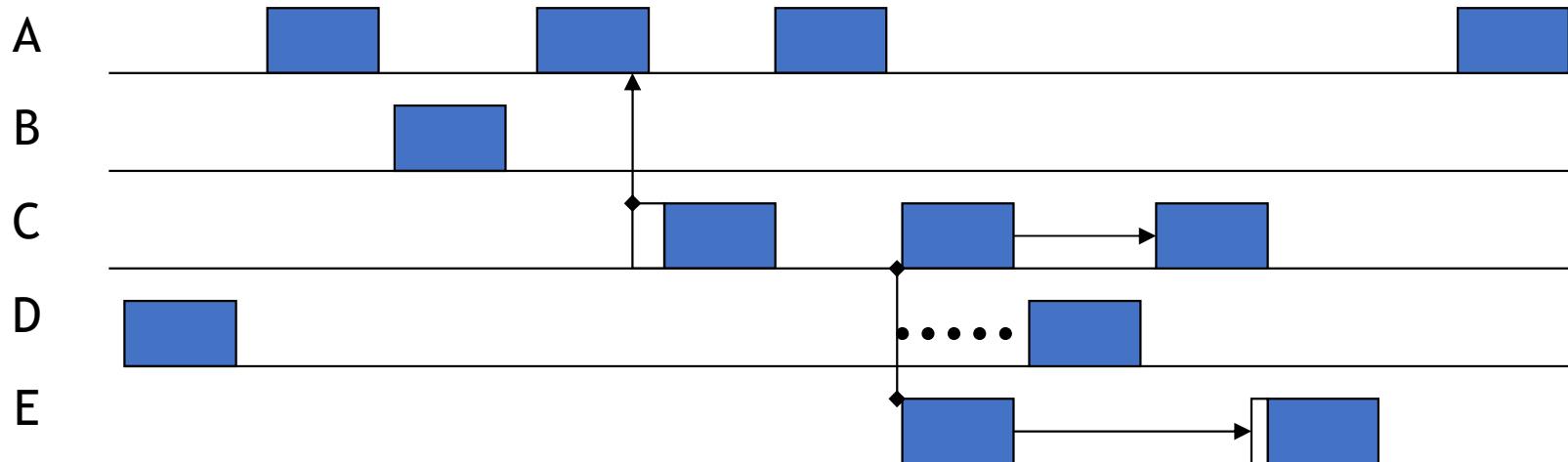
Estrutura do endereço unicast (**universalmente únicos**):



LSB - least significant bit

IEEE 802.3/Ethernet: Protocolo de Controlo de Acesso ao Meio (1)

Utilizador

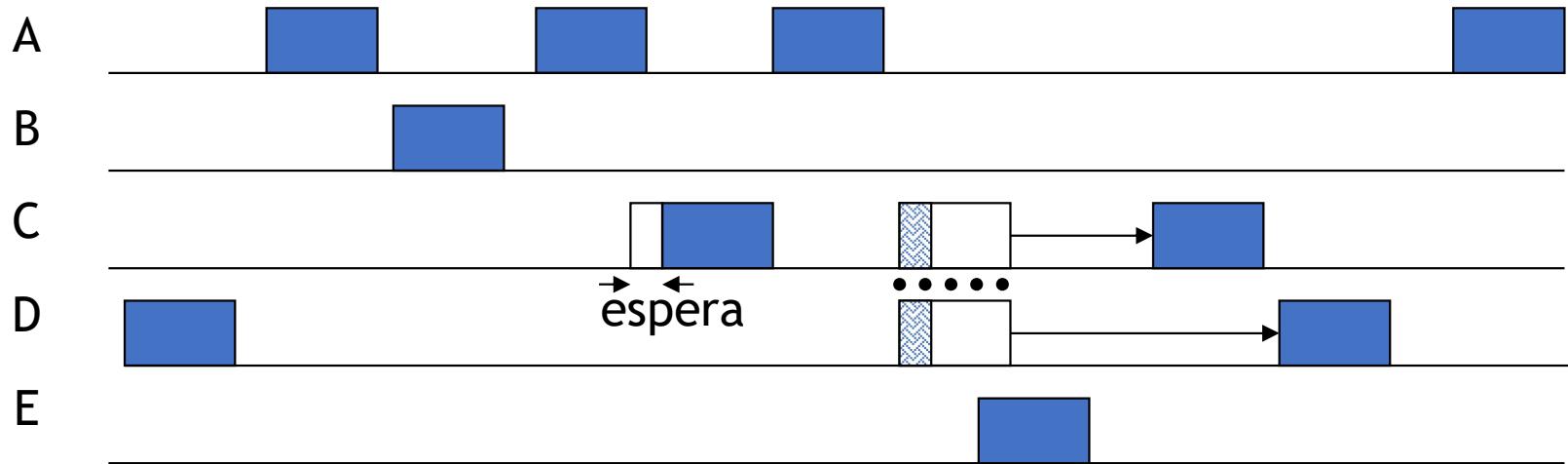


Carrier Sense Multiple Access (CSMA): antes de transmitir escuta o canal

- **CSMA 1-persistente:** se ocupado, transmite logo que esteja livre
- **CSMA não-persistente:** se ocupado, espera um tempo aleatório para nova tentativa
- **CSMA p -persistente:** o tempo é discreto e transmite num slot livre com probabilidade p , se não transmitir repete o processo até transmitir ou outra estação ganhar o acesso ao canal, nessa altura é gerado um tempo aleatório tal como no caso de colisão

CSMA/CD

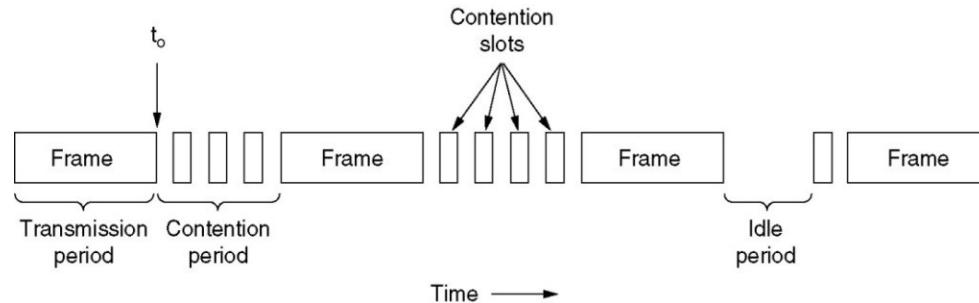
Utilizador



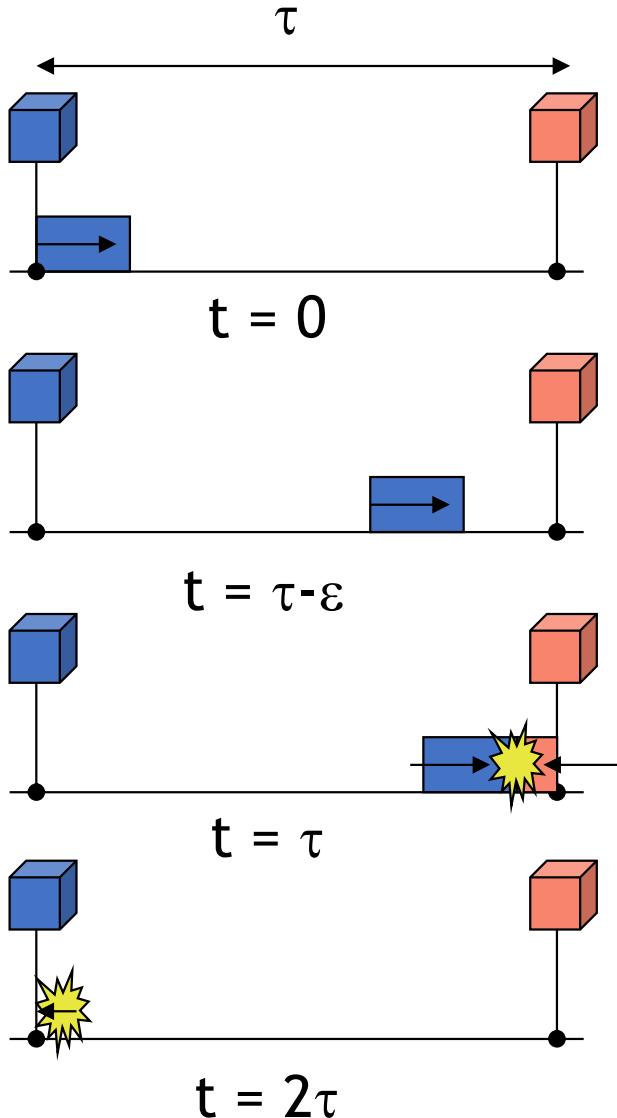
- **Carrier Sense Multiple Access (CSMA):** antes de transmitir escuta o canal
- **Colision Detection (CD):** interrompe a transmissão mal detecta uma colisão
- Tem que esperar o tempo do sinal percorrer duas vezes a distância entre as duas estações mais afastadas (2τ), e.g., 1 km de cabo $\Rightarrow \tau \approx 5\mu\text{s}$

Três estados possíveis:

1. Contenda
2. Transmissão
3. Inactivo



IEEE 802.3/Ethernet: Acesso ao Meio



- Para acesso ao meio utiliza-se **CSMA/CD**
- O tempo $\tau = d/v_p$ corresponde ao tempo de vulnerabilidade da trama.
- A colisão é detectada (CD) por escuta do canal
- Apenas após 2τ (*slot*) pode, o emissor, ter a certeza que a trama não sofreu colisão.
- A detecção de colisões (/CD) implica haver um tamanho mínimo para a trama, $t_{tx} \geq 2\tau$, e a necessidade de bytes de enchimento.

Exercício 3.13 (IEEE 802.3/Ethernet 10Base5):

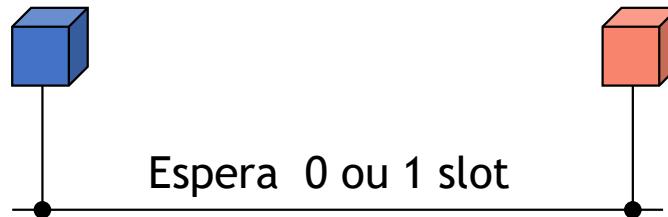
- 2,5 km c/ 4 repetidores, i.e., 5 segmentos a 10 Mbit/s
- Nestas condições $2\tau = 51,2 \mu s$

$$L/R_b \geq 2\tau \Rightarrow L_{min} = 512 \text{ bits}$$

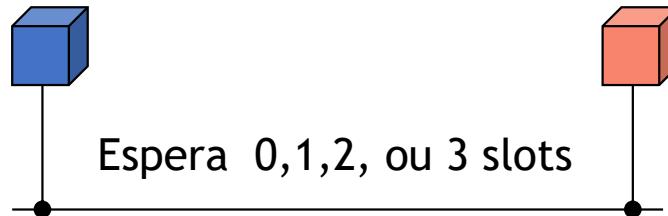
IEEE 802.3/Ethernet: Resolução de Colisões

Binary Exponential Backoff

Depois da 1^a colisão:

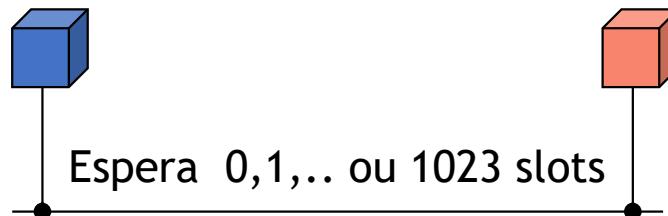


Depois da 2^a colisão:



Depois da i -ésima colisão: Espera 0,1,.. ou $2^i - 1$ slots

Depois da 10^a colisão:



Depois da 16^a colisão desiste

- Tempo de espera para retransmissão tem de ser aleatório.
- Duas escolhas inadequadas:
 - Intervalo de escolha pequeno -> quando a carga é grande a probabilidade da colisão se repetir é elevada
 - Intervalo de escolha grande -> quando a carga é pequena o atraso é desnecessariamente elevado
- Solução - dinâmica e não centralizada:
Binary Exponential Backoff
 - Usa como indicador da carga no sistema o número de colisões consecutivas
 - Adapta o intervalo de escolha de acordo com esse indicador

Ethernet Comutada (Switched Ethernet)

Objectivo: Aumentar o desempenho para ritmos de transmissão elevados, e.g., 100 Mbit/s, através da diminuição da possibilidade de ocorrência de colisões



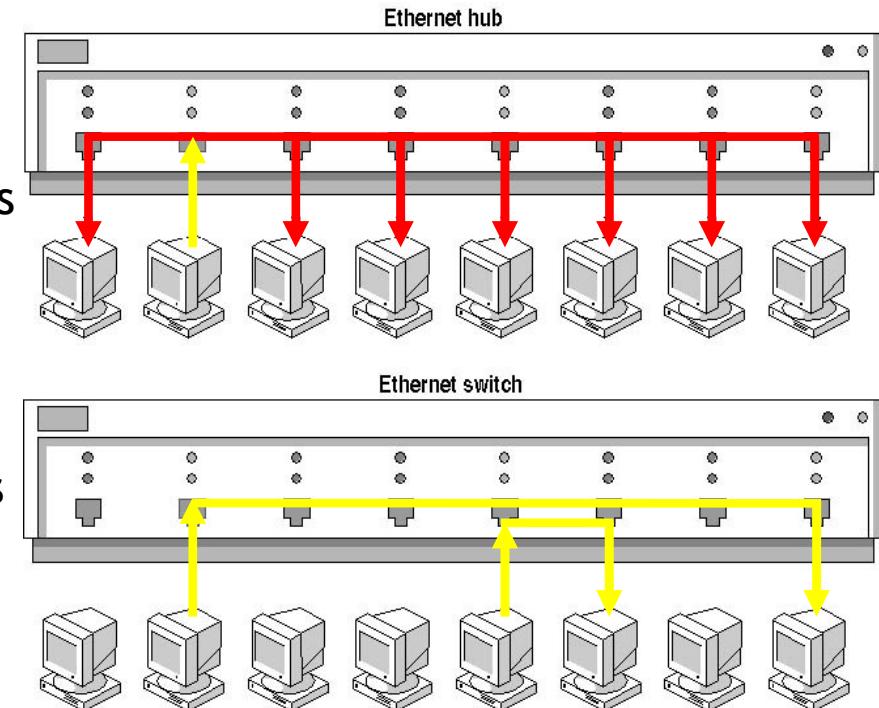
Switch - comutador
Hub - concentrador

Hub (L1) - Quando uma estação transmite todas as outras recebem (domínio de colisão) -> *Repetição*

Switch (L2) - Quando uma estação transmite apenas a estação de destino recebe -> *Comutação*

Comutação:

- Requer processamento do cabeçalho das tramas (i.e., endereços) e tabelas de expedição (próximas aulas)
- Não há colisões, mas há filas de espera que podem originar *overflows*



Ethernet a 100 Mbit/s (Fast Ethernet)

IEEE 802.3u

- Desenvolvimento a par com a Ethernet comutada
- Estrutura de trama idêntica à norma IEEE 802.3
- Baseada na configuração 10BaseT (utiliza concentradores e comutadores)
- Negociação automática do ritmo óptimo de transmissão (10 ou 100 Mbit/s) e do modo de transmissão (half- ou full-duplex)

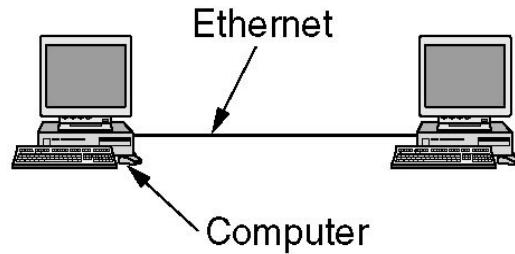
Nome	Cabo	Seg. Máximo	Características
100Base-T4	Par entrançado	100 m	UTP categoria 3 (4 pares), half-duplex
100Base-TX	Par entrançado	100 m	UTP categoria 5 (2 pares), full-duplex
100Base-FX	Fibra óptica	2000m	Duas fibras multimodo, full-duplex

Ethernet a 1 Gbit/s: Gigabit Ethernet (1)

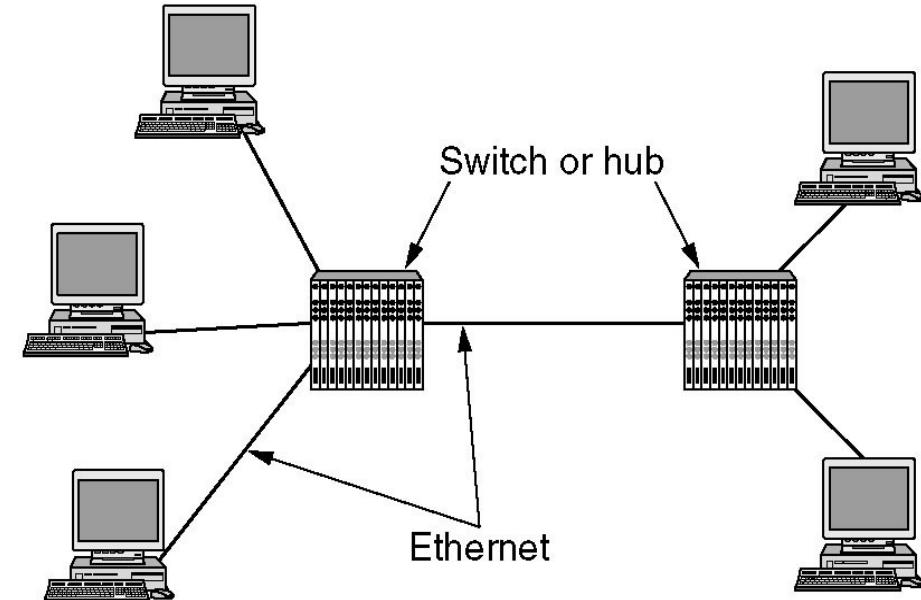
- Estrutura de trama idêntica à norma IEEE 802.3 IEEE 802.3z
- Modos de funcionamento:
 - **Full-duplex (modo normal):** sem colisões => não é usado o CSMA/CD; o comprimento máximo do cabo é determinado pela atenuação do sinal e não pelo tempo de propagação; *utiliza comutadores*
 - **Half-duplex:** com colisões => utilização do CSMA/CD; *utiliza concentradores*
- Métodos para aumentar o comprimento máximo da rede (200 m):
 - Aumento do comprimento da trama (enchimento até 512 bytes)
 - Concatenação de tramas

Nome	Cabo	Seg. Máximo	Características
1000Base-SX	Fibra óptica	550 m	Fibra multimodo (50, 62.5 μ m)
1000Base-LX	Fibra óptica	5000 m	Fibra monomodo (10 μ m)
1000Base-CX	STP (2 pares)	25 m	Pouco usado
1000Base-T	UTP (4 pares)	100 m	UTP cat. 5

Ethernet a 1 Gbit/s: Gigabit Ethernet (2)



(a)



(b)

Todas as ligações Gigabit Ethernet são *point-to-point* em vez de *multidrop*

Versões recentes da Ethernet: 10 GbE

Nome	Cabo	Seg. Máximo	Características
10GBase-SR	Fibra óptica	300 m	Duas fibras multimodo (62.5µm)
10GBase-LR	Fibra óptica	25 km	Duas fibra monomodo (1310 nm)
10GBase-ER	Fibra óptica	40 km	Duas fibra monomodo (1550 nm)
10GBase-LX4	Fibra óptica	10 km 300 m	Duas fibra monomodo/WDM (1310 nm) Duas fibras multimodo (62.5µm)
10GBase-LRM	Fibra óptica	220 m	Duas fibras multimodo (62.5µm)
10GBase-CX4	STP (8 pares)	15 m	Usada em aplicações de interligação para distâncias curtas, e.g., intra-rack
10GBase-T	UTP (4 pares)	100 m	UTP cat. 5 ou UTP cat. 7

- Estrutura de trama idêntica à norma IEEE 802.3
- Não usa CSMA/CD, i.e., apenas modo de funcionamento sem colisões
- Comunicações ponto-a-ponto Full-Duplex
- Comprimento máximo das tramas passa de 1518 para 1522 bytes para suportar o protocolo das Virtual LANs (VLANs) - IEEE 802.1Q
- Uso opcional de tramas “PAUSE” para efectuar controlo de fluxo - receptor envia trama “PAUSE” com indicação da duração da pausa; trama PAUSE com tempo de espera “zero” activa de novo a estação emissora

Interligação de Redes

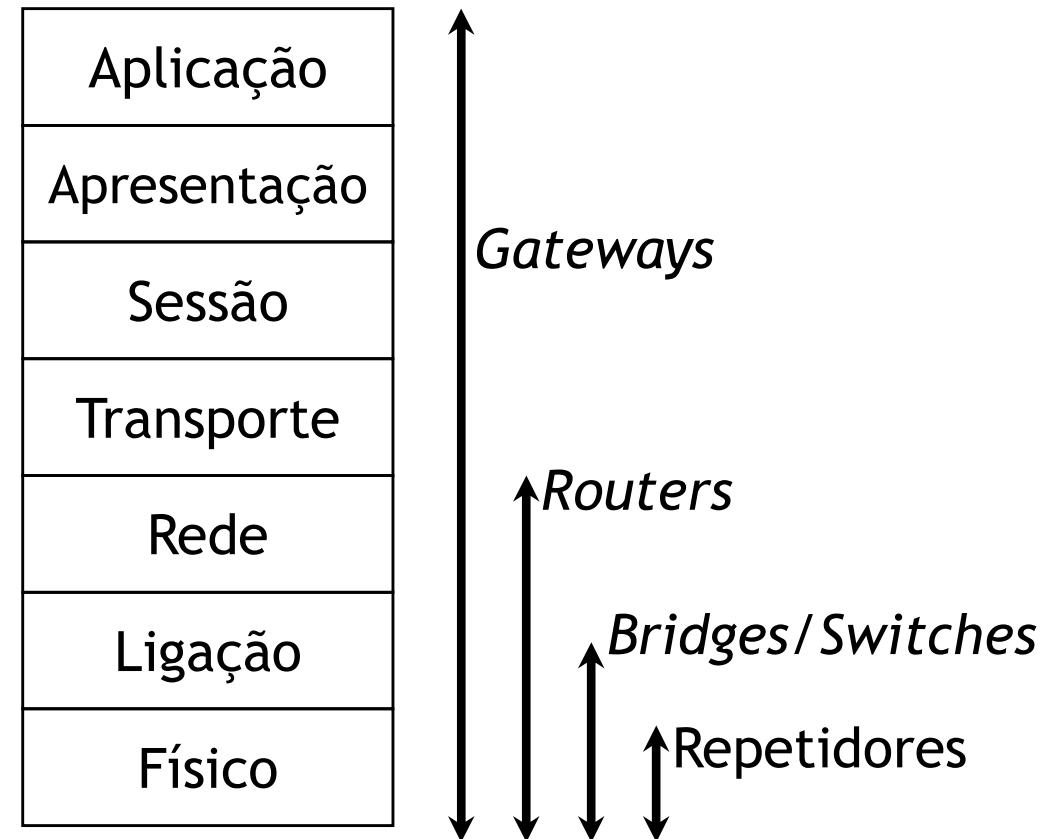
- Motivação
- Interligação de redes locais - Comutador *Ethernet*
- Redes Locais Virtuais (*Virtual LANs*)
 - IEEE 802.1Q
- *Spanning Tree Protocol*
 - IEEE 802.1D

Motivação

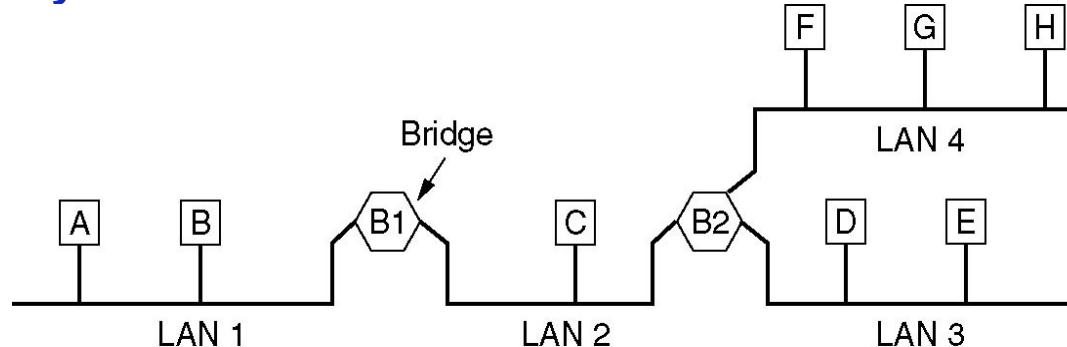
1. Necessidade de interacção entre dispositivos situados em redes distintas, e.g., interligação de diferentes departamentos de uma empresa
2. Redução dos custos de cablagem em organizações espalhadas geograficamente, e.g., interligação através de ligações sem fios
3. Segmentação de uma rede de modo a não violar o comprimento máximo permitido, e.g., mais do 2,5 km para a Ethernet
4. Aumentar o desempenho através da separação de tráfego, e.g., através do agrupamento de terminais em diferentes LANs
5. Aumentar a fiabilidade, e.g., um nó defeituoso numa rede pode deturpar o funcionamento de toda a rede
6. Aumentar a segurança, e.g., permite isolar o tráfego mais sensível e evitar que seja visível por computadores a operar em modo promíscuo

Dispositivos para interligação de redes

- Repetidores
- Bridges
- Switches
- Routers
- Gateways



Interligação de Redes Locais



- Originalmente as bridges possuíam apenas 2 portos: realizavam sobretudo adaptação de redes de tecnologias diferentes (e.g., 10Base2 <-> 10BaseT)
- Actualmente é mais comum usar comutadores (*switches*) sendo neste contexto designados também como multiport bridges.
- Interligação de diferentes redes em modo transparente, i.e., sem alterações no hardware ou no software da rede (*plug & play*)
- As *bridges* transparentes operam em modo promíscuo, i.e., aceitam todas as tramas transmitidas em todas as redes a que estão ligadas
- Exemplo:
 - Uma trama na LAN1 destinada a A é descartada por B1 (*filtering*)
 - Uma trama na LAN1 destinada a C ou F é expedida por B1 para a LAN2 (*forwarding*)
- Cada *bridge* possui uma base de dados - tabela de expedição - actualizada dinamicamente onde regista o endereço MAC de cada estação e a interface (LAN) a que pertence (*aprendizagem*)
- Uma trama com destino desconhecido é expedida por todas as interfaces da *bridge*, excepto por aquela por onde chegou (*flooding*)

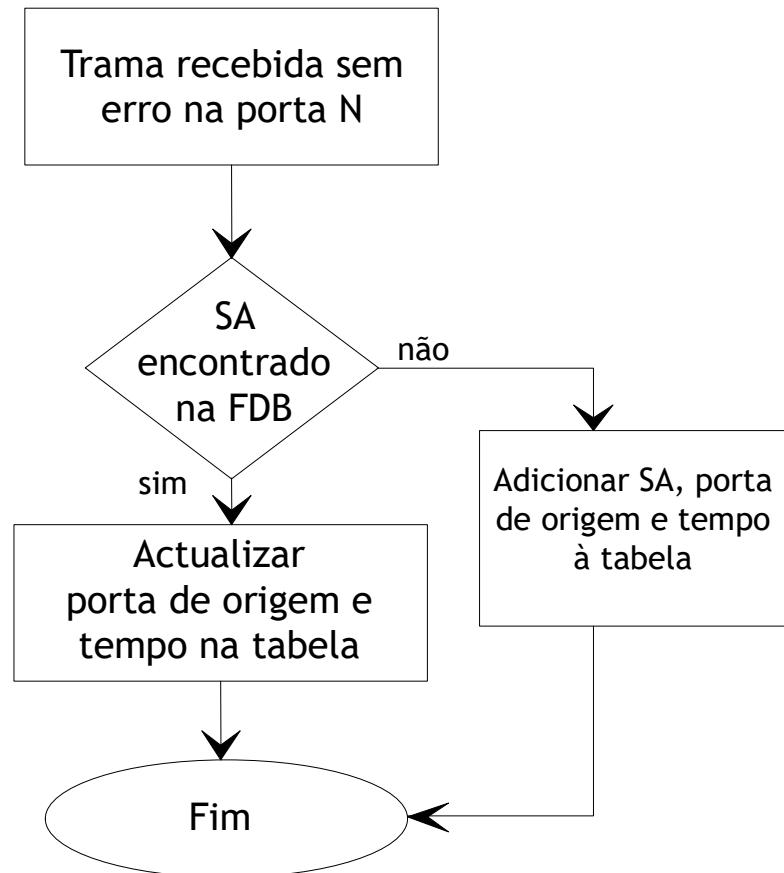
Processo de aprendizagem do switch

FDB

Endereço	Porta	Tempo

SA - Endereço Origem

DA - Endereço Destino

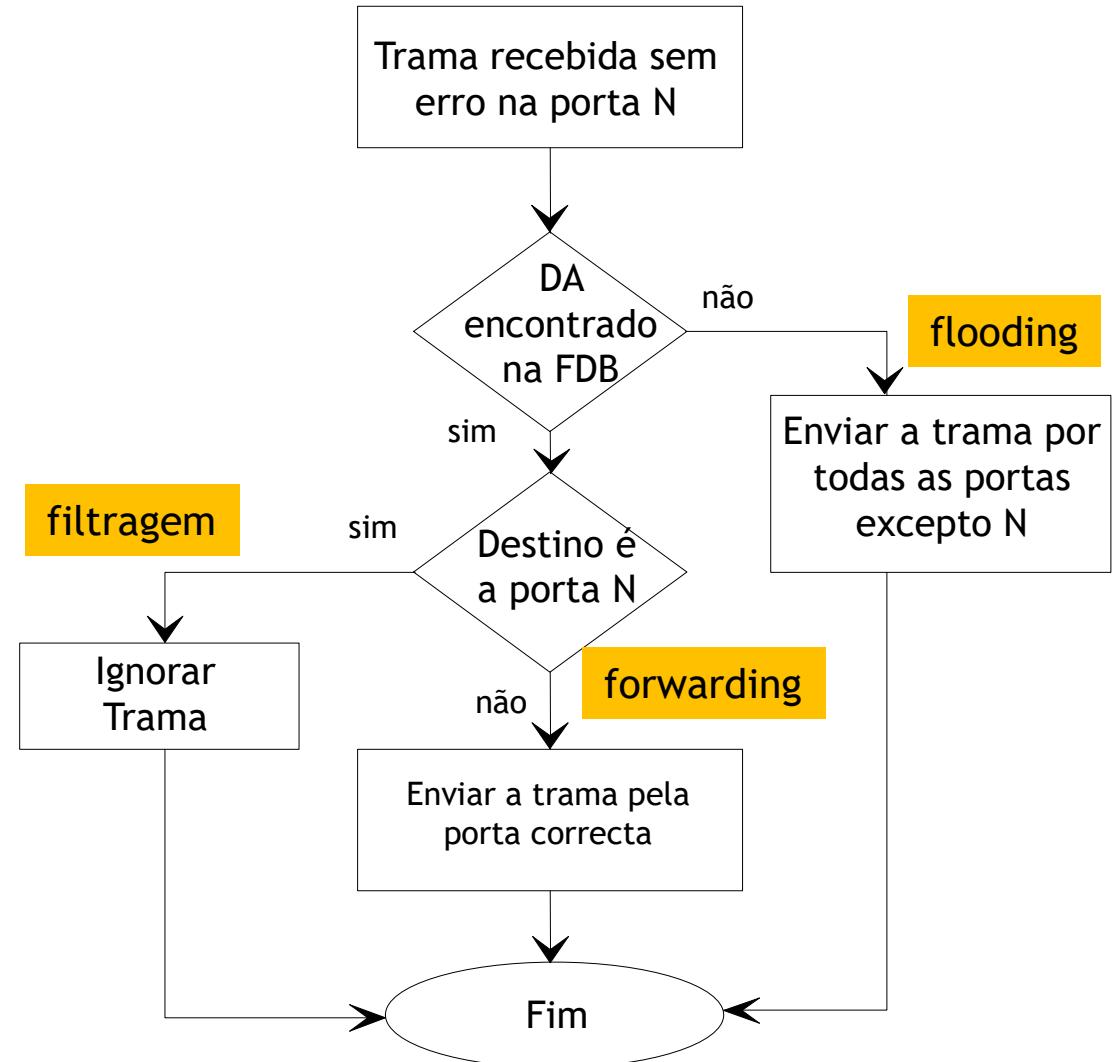


Processo de *forwarding* do switch

FDB

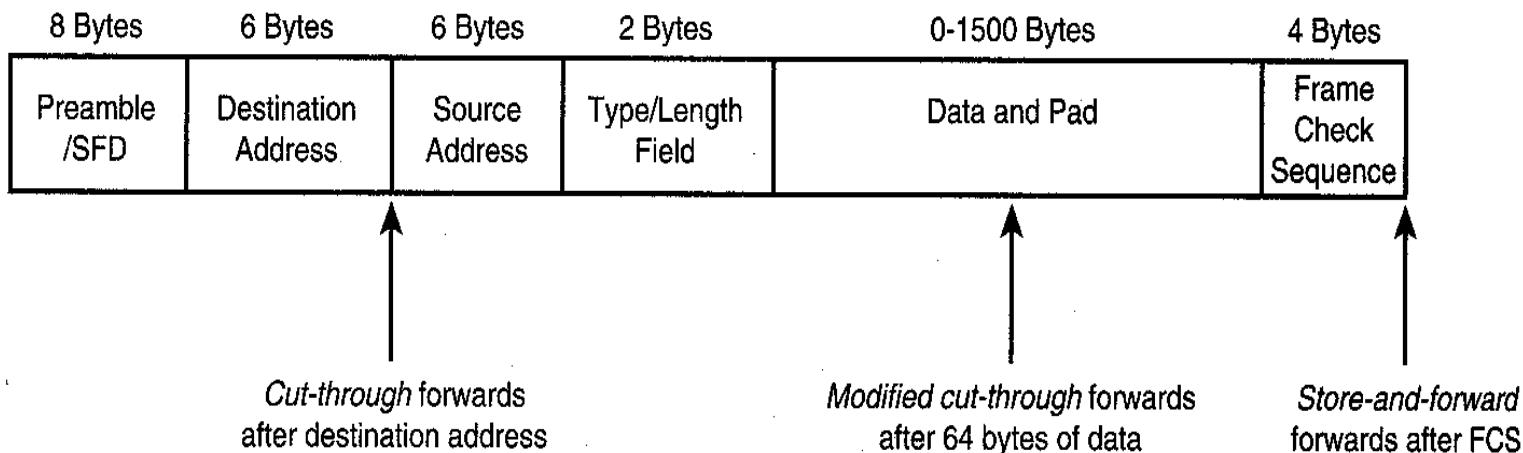
Endereço	Porta	Tempo

SA - Endereço Origem
DA - Endereço Destino

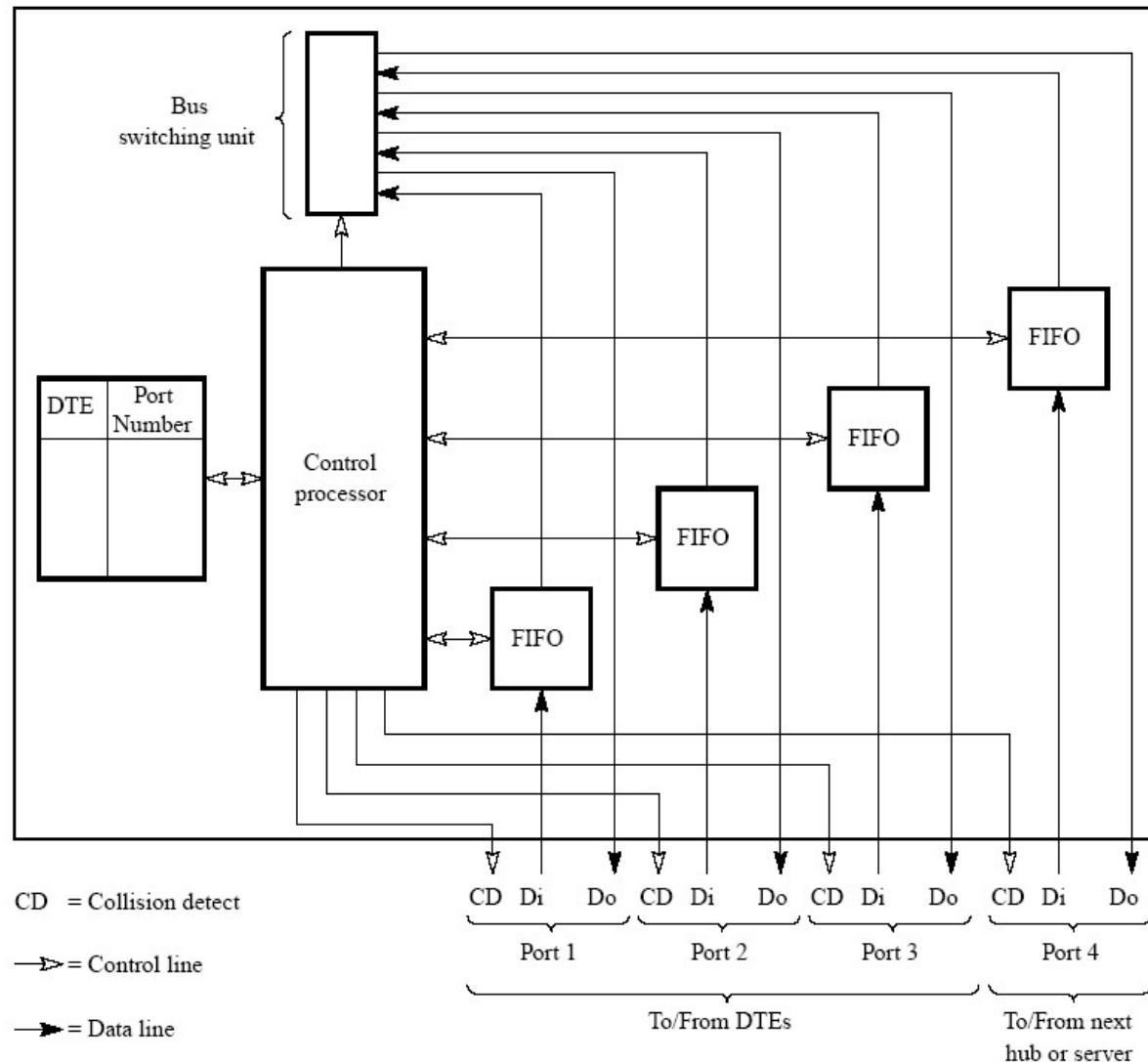


Modos de comutação do switch

- *Cut-through*
- *Modified Cut-through*
 - garante que não houve colisão na trama
- *Store-and-Forward*
 - garante que não houve erros nem colisão na trama

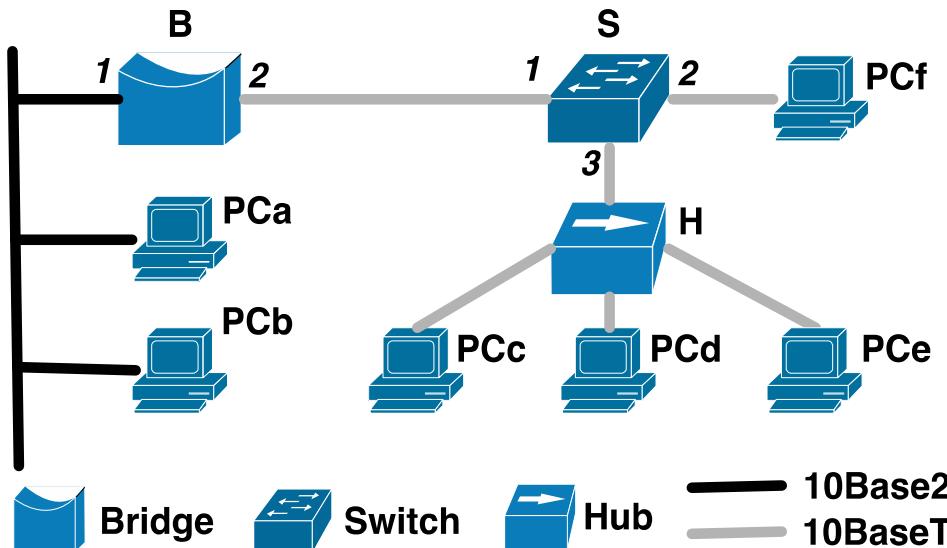


Exemplo da arquitectura interna de um switch



Actualização e utilização da tabela de expedição (*bridges* e *switches*) (1)

Exemplo Prático



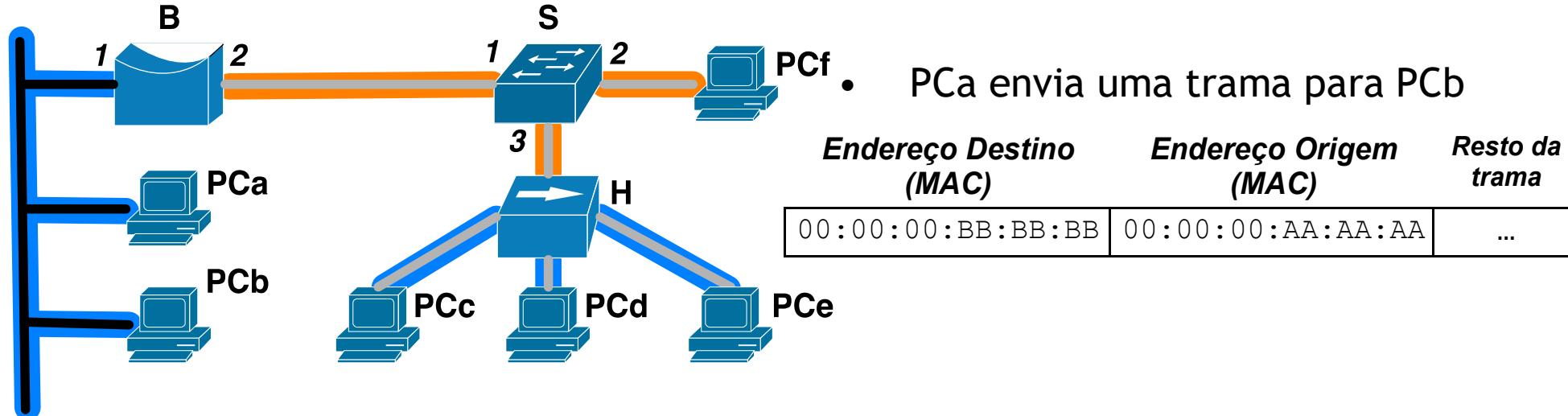
PC	Endereço (MAC)
PCa	00:00:00:AA:AA:AA
PCb	00:00:00:BB:BB:BB
PCc	00:00:00:CC:CC:CC
PCd	00:00:00:DD:DD:DD
PCe	00:00:00:EE:EE:EE
PCf	00:00:00:FF:FF:FF

- Inicialmente as tabelas de expedição de *bridges* e *switches* estão vazias

Bridge - B		
Endereço (MAC)	Porta	Instante

Switch - S		
Endereço (MAC)	Porta	Instante

Actualização e utilização da tabela de expedição (bridges e switches) (2)

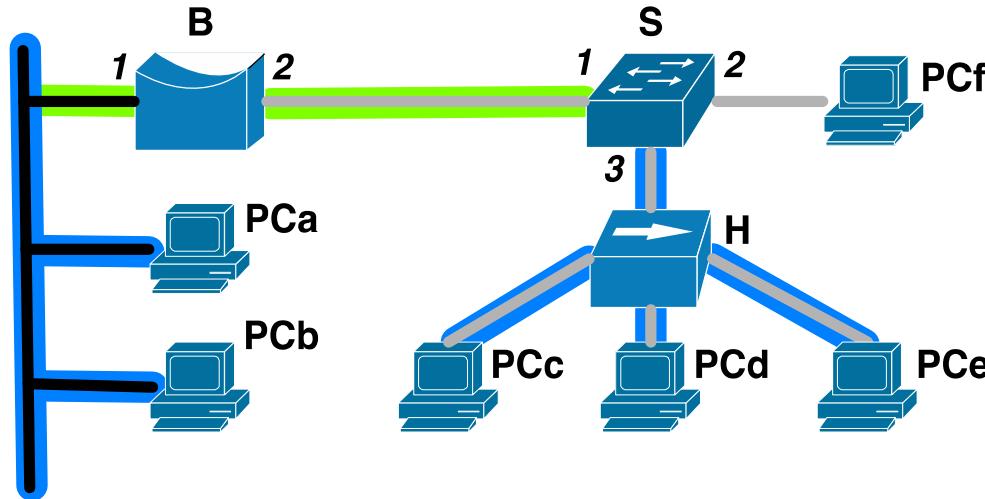


- A aprendizagem é efectuada associando a **origem** da trama à porta por onde é recebida
- No caso em que o **destino** não se encontra na tabela de expedição a trama é enviada por todas as portas menos pela qual foi recebida (**flooding**).

Bridge - B		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0

Switch - S		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0001

Actualização e utilização da tabela de expedição (bridges e switches) (3)



- PCd envia uma trama para PCa

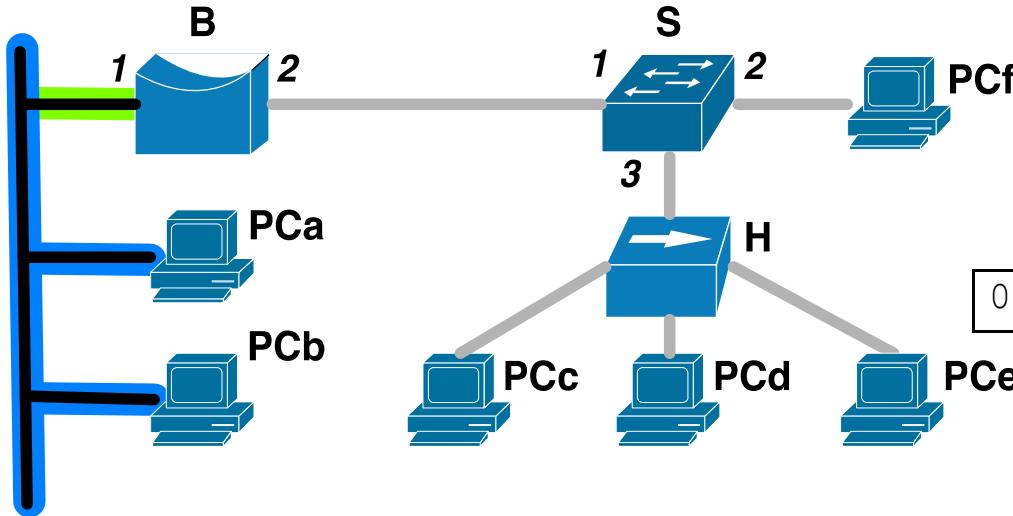
Endereço Destino (MAC)	Endereço Origem (MAC)	Resto da trama
00:00:00:AA:AA:AA	00:00:00:DD:DD:DD	...

- A aprendizagem é efectuada associando a **origem** da trama à porta por onde é recebida
- No caso em que o **destino** é presente na tabela de expedição a trama é enviada pela porta respectiva (**forwarding**).

<i>Bridge - B</i>		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0
00:00:00:DD:DD:DD	2	1.0001

<i>Switch - S</i>		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0001
00:00:00:DD:DD:DD	3	1.0

Actualização e utilização da tabela de expedição (bridges e switches) (4)



- PCb envia uma trama para PCa

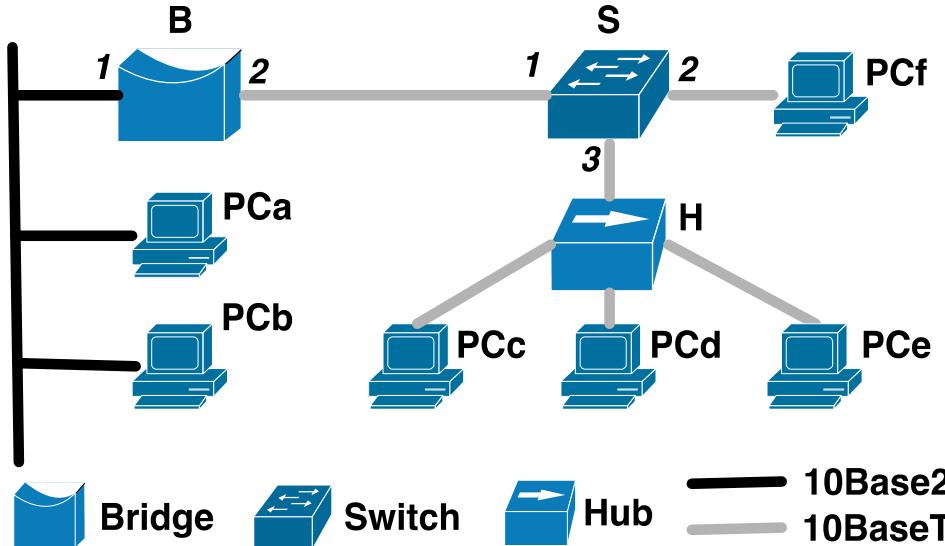
Endereço Destino (MAC)	Endereço Origem (MAC)	Resto da trama
00:00:00:AA:AA:AA	00:00:00:BB:BB:BB	...

- A aprendizagem é efectuada associando a **origem** da trama à porta por onde é recebida
- No caso em que o **destino** é presente na tabela de expedição a trama é enviada pela porta respectiva (**filtering**).

Bridge - B		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0
00:00:00:DD:DD:DD	2	1.0001
00:00:00:BB:BB:BB	1	2.0

Switch - S		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0001
00:00:00:DD:DD:DD	3	1.0

Actualização e utilização da tabela de expedição (bridges e switches) (5)



- Nenhum dos PCs emite qualquer trama durante algum tempo.

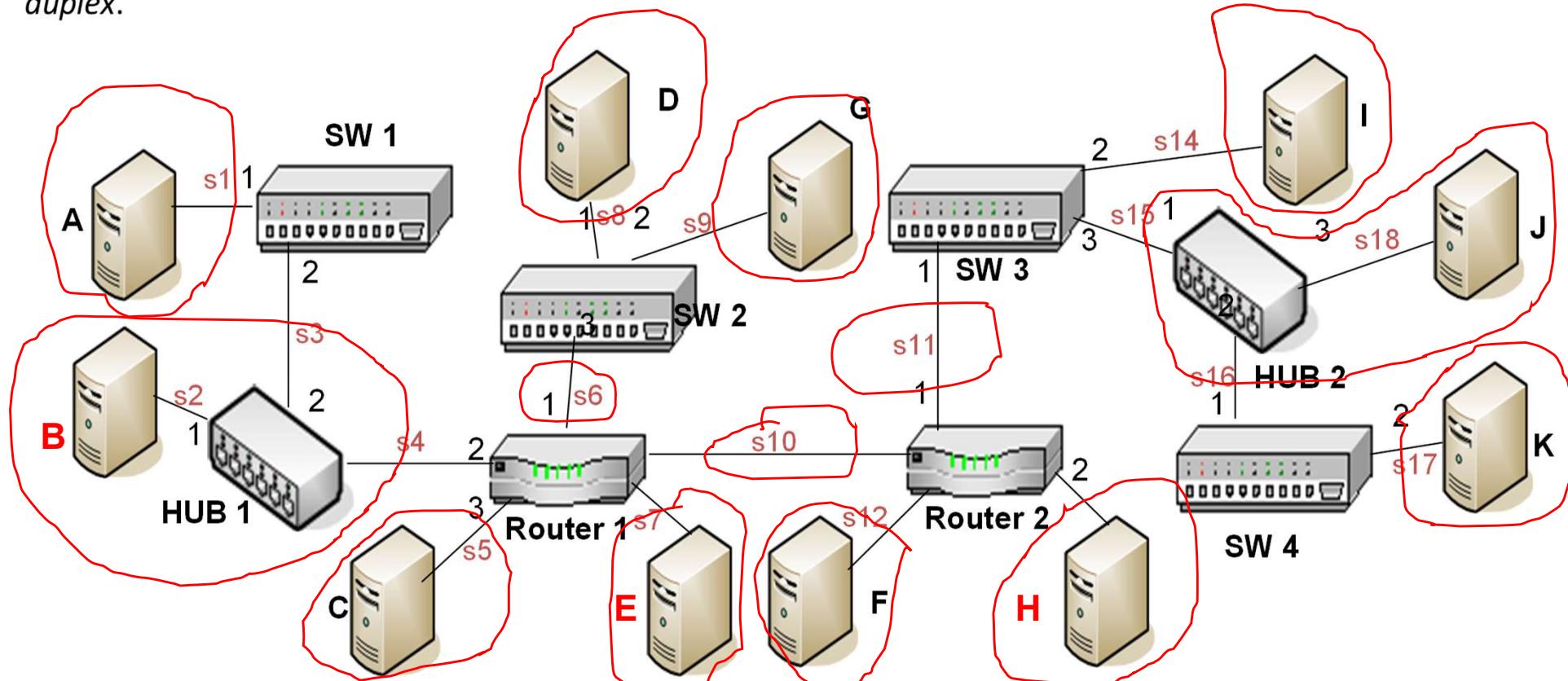
- Após algum tempo sem receber tramas correspondentes a uma determinada entrada essa entrada é eliminada da tabela de expedição.

Bridge - B		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:DD:DD:DD	2	1.0001
00:00:00:BB:BB:BB	1	2.0

Switch - S		
Endereço (MAC)	Porta	Instante
00:00:00:AA:AA:AA	1	0.0001
00:00:00:DD:DD:DD	3	1.0

Exercício 3.16

- 1) Considere a seguinte topologia de rede constituída por *switches* (*sw*), repetidores (*hubs*), *routers* e PC (DTE). Considere ainda que as diferentes redes ligadas ao *router* não comunicam entre si. As ligações são todas *half-duplex*.



- Assinale na figura os domínios de colisão e indique o respetivo número 14
- Assinale na figura os domínios de difusão e indique o respetivo número 8
- Considerando que os *switches* têm as tabelas de comutação (FDB) vazias e que são enviadas as 3 mensagens abaixo referidas (1), (2), (3). Indique quais os troços que as mensagens atravessam assumindo que a ordem de envio é a que está apresentada e indique como ficam as tabelas (FDB) dos *switches* 1 e 4 depois do envio de todas as mensagens.

- Mensagem enviada de I para K s14 s11 s15 s16 s18 s17
- Mensagem enviada de A para Router1 s1 s3 s2 s4
- Mensagem enviada de J para I s18 s15 s16 s14

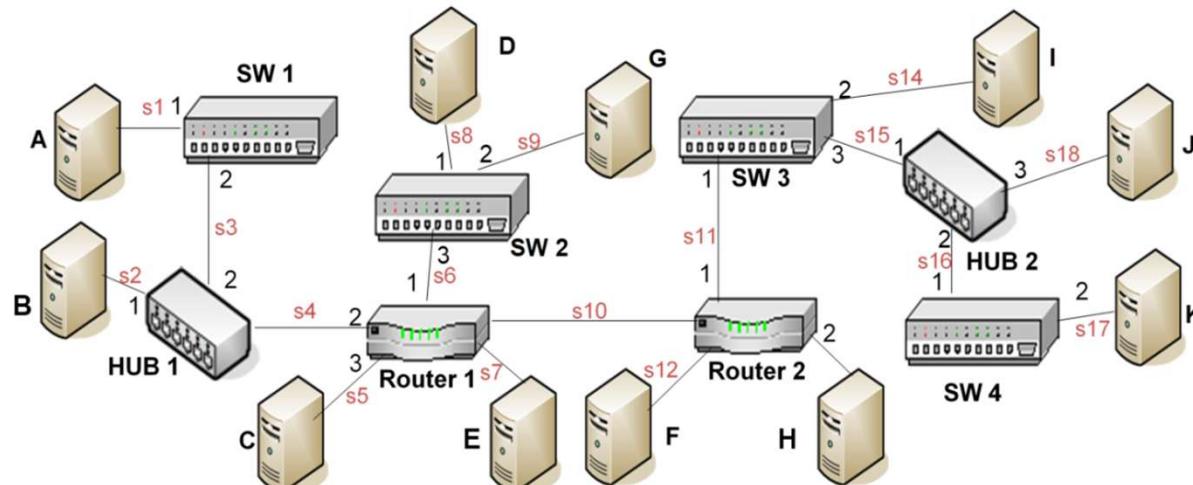
SW1	
MAC	Porta
A	1

SW4	
MAC	Porta
I	1
J	1

d) Assumindo agora que os *switches* têm as tabelas (FDB) todas preenchidas diga quais as tabelas de comutação dos *switches* Sw1 e Sw3.

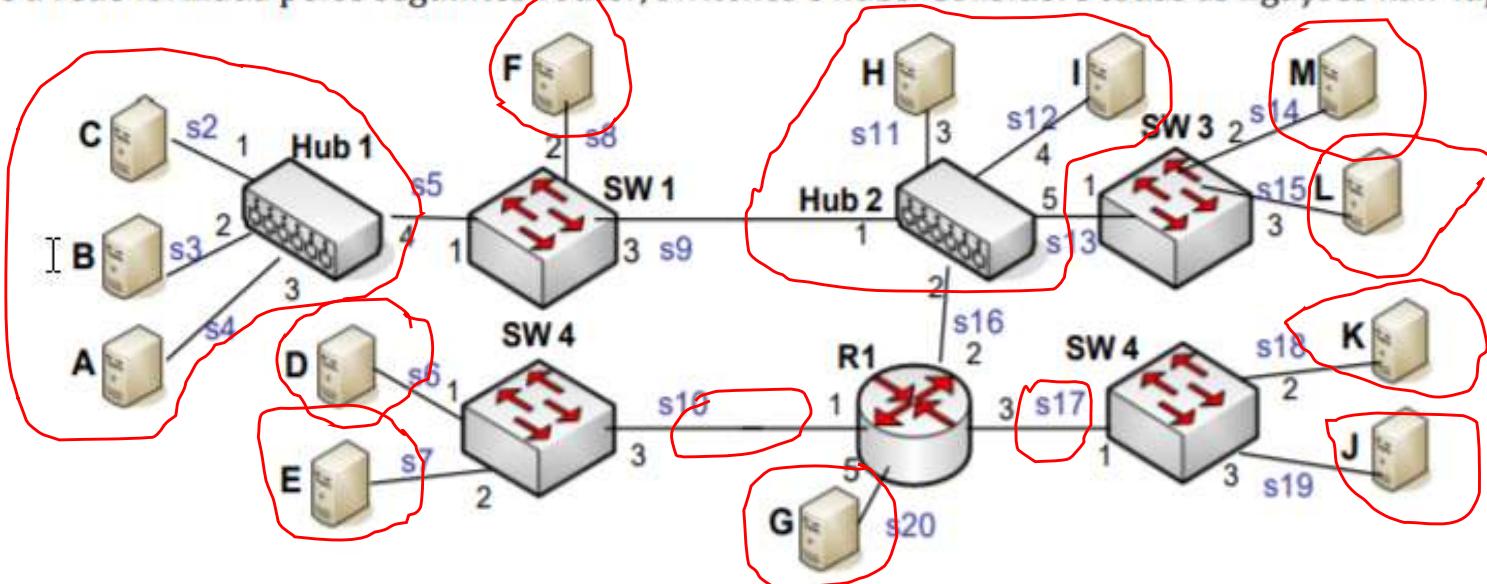
SW1	
MAC	Porta
A	1
B	2

SW3	
MAC	Porta
I	2
J	3
K	3
Router	2



Exercício 3.17

17) Considere a rede formada pelos seguintes router, switches e hubs. Considere todas as ligações half-duplex.



17.1) Assinale na rede e indique o número de domínios de colisão: _____ e difusão: _____

18) Considere que as seguintes mensagens são enviadas de forma consecutiva e pela ordem indicada. Indique quais os troços (s2...s21) que as mensagens percorrem (considere tabelas comutação switch vazias):

18.1) F envia um Echo request para I

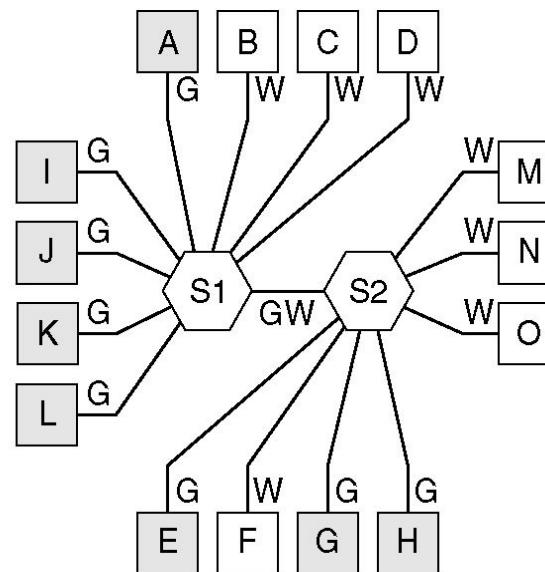
18.2) I envia um Echo reply para F

Virtual LANs (VLANs)

- Conceito
- Objectivo
- Norma IEEE 802.1Q - Estrutura da trama
- Exemplos de aplicação de VLANs:
 - Rede comutada simples
 - Rede comutada com vários *switches*. Conceito de *trunk*
 - Encaminhamento entre VLANs

VLANs - conceito

- Organização lógica, e.g. organizacional, segurança, optimização do tráfego (carga), difusão por grupos, e não apenas geográfica dos terminais.
- Exemplo:
 - Rede organizada em duas redes locais virtuais (VLANs) G e W



Hipóteses:
1. Portos
2. IPs
3. MACs

VLANs - objectivo (1)

- Objectivo

- Criação de redes locais virtuais sobre uma rede local física composta por um ou mais equipamentos activos
- Vários domínios de broadcast num (ou mais) *switch* (*logical broadcast domain*)

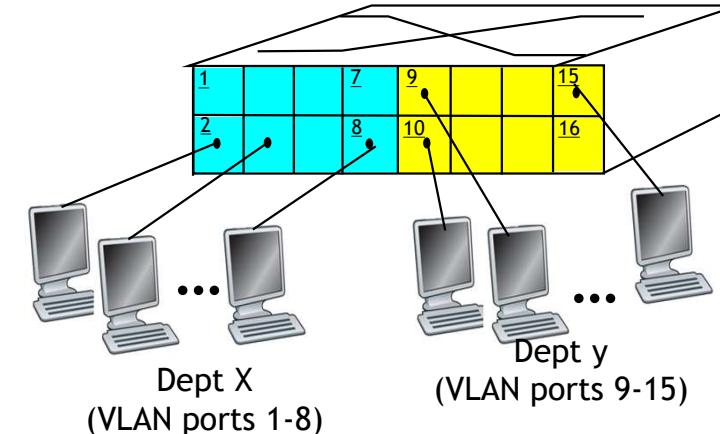
Definido nas normas IEEE 802.1Q e 802.3ac (1998)

VLANs - objectivo (2)

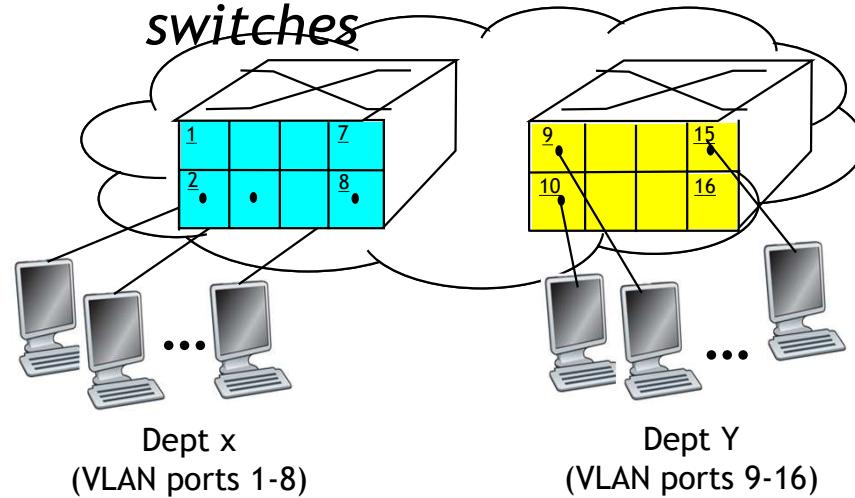
- **Port-based VLAN:** portas do *switch* são agrupadas (software de gestão do *switch*) de modo a parecer um único (*single*) *switch* físico

.....

- *Switches* supportando VLANs podem ser configurados de modo a definir **múltiplas LANs virtuais sobre uma única infra-estrutura física**



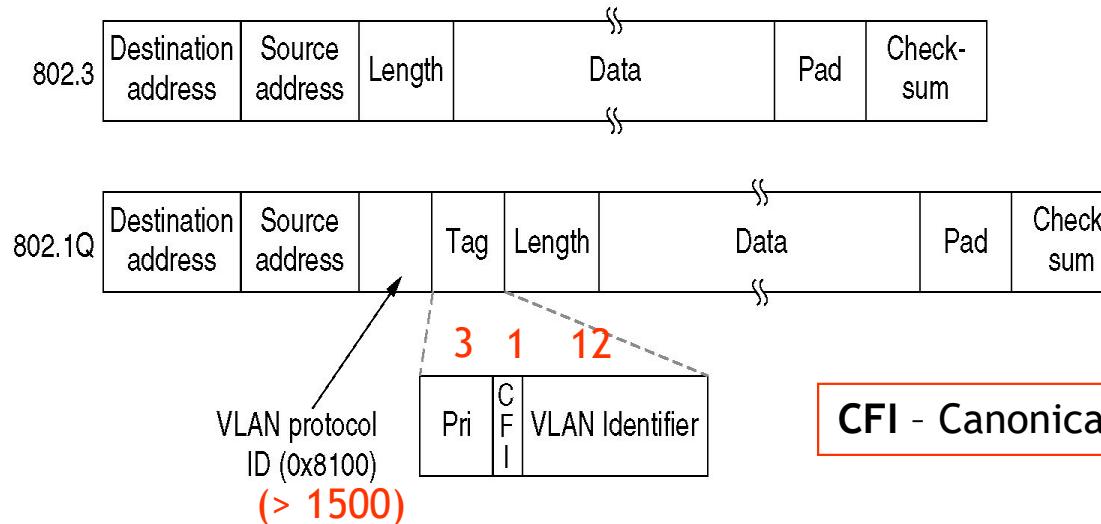
... operação como multiple *virtual switches*



VLANs - objectivo (3)

- Implementação num só *switch*
 - No *switch* é definido em cada porta o VLAN ID - VLAN a que a porta está associada
 - Os *switches* só encaminham tramas entre duas portas se elas pertencerem à mesma VLAN
 - Os *switches* só encaminham tramas de *broadcast* para as portas pertencentes à VLAN onde ele foi originado

Norma IEEE 802.1Q



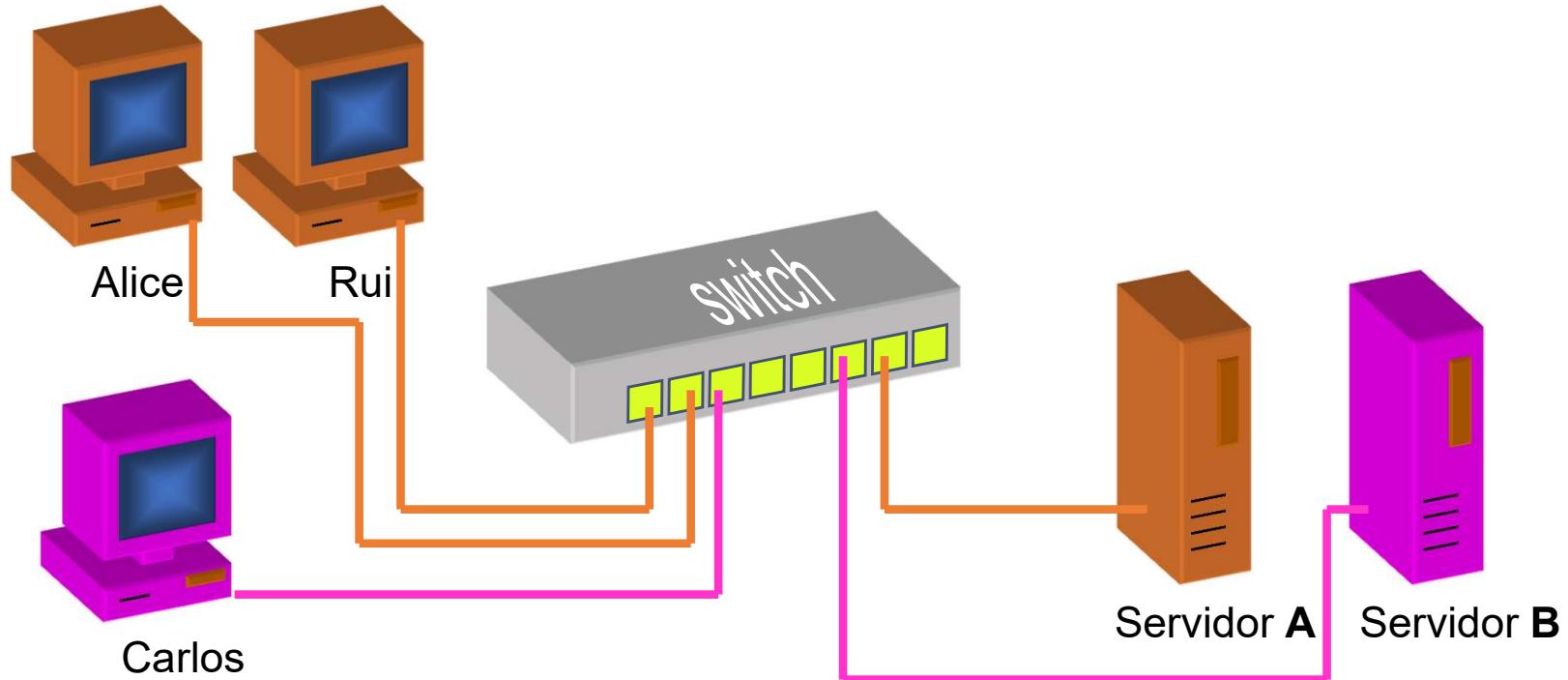
O tamanho máximo da trama passa de 1518 bytes para 1522 bytes

- Cada trama contém um identificador da VLAN (VLAN ID) - 12 bits
- A máquina de origem não tem que gerar o identificador (compatibilidade com a norma 802.3) => gerado pela primeira *bridge/switch* no caminho
- A expedição das tramas é efectuada com base no VLAN ID
- As *bridges* compatíveis com IEEE 802.1Q constroem dinamicamente tabelas de expedição com base nas tramas que surgem nas suas interfaces
- Exemplo:
 - Se uma *bridge* recebe uma trama no porto 3 com VLAN ID = 4 significa que existe uma estação pertencente a VLAN 4 ligada ao porto 3

Exemplos de aplicação

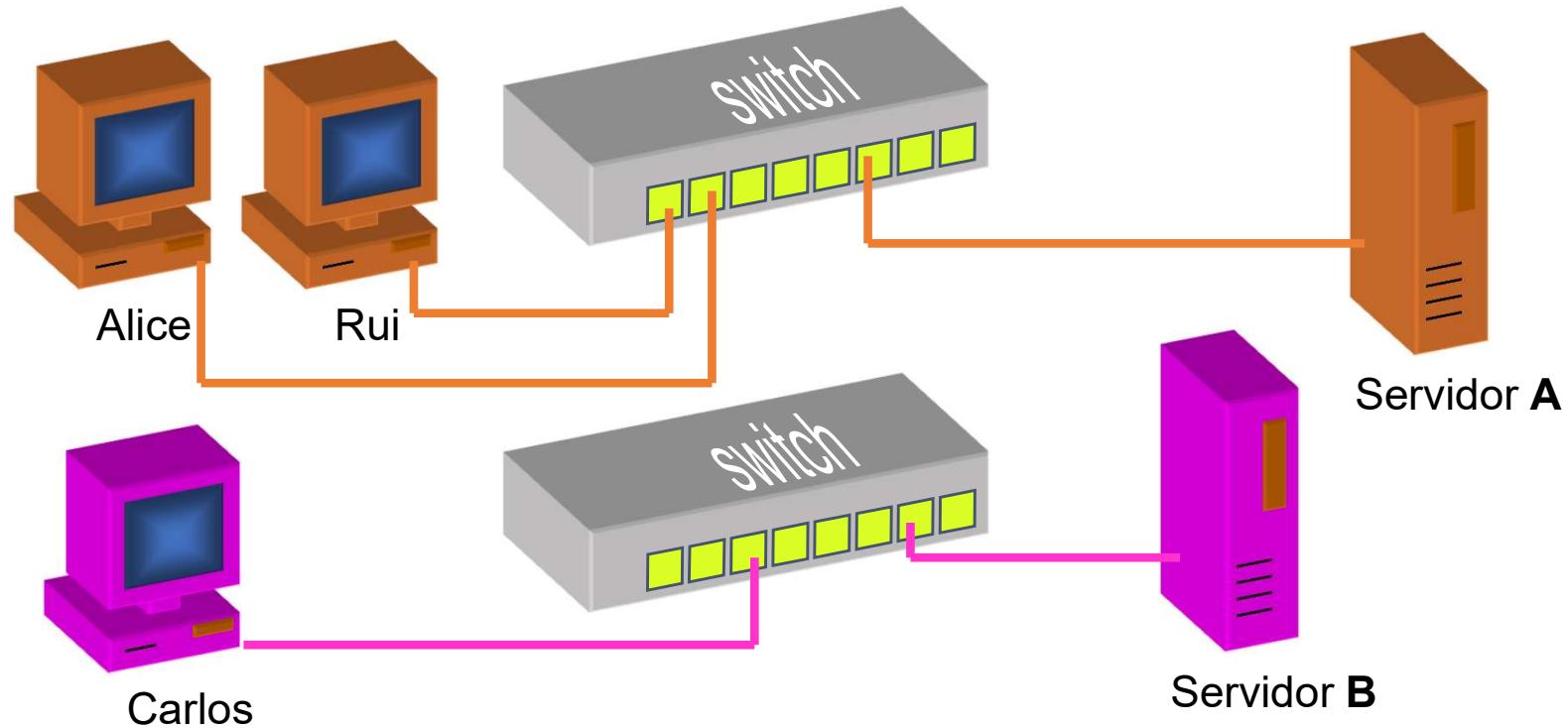
Rede comutada simples

- Alice e o Rui trabalham com o servidor A
- Carlos trabalha com o servidor B



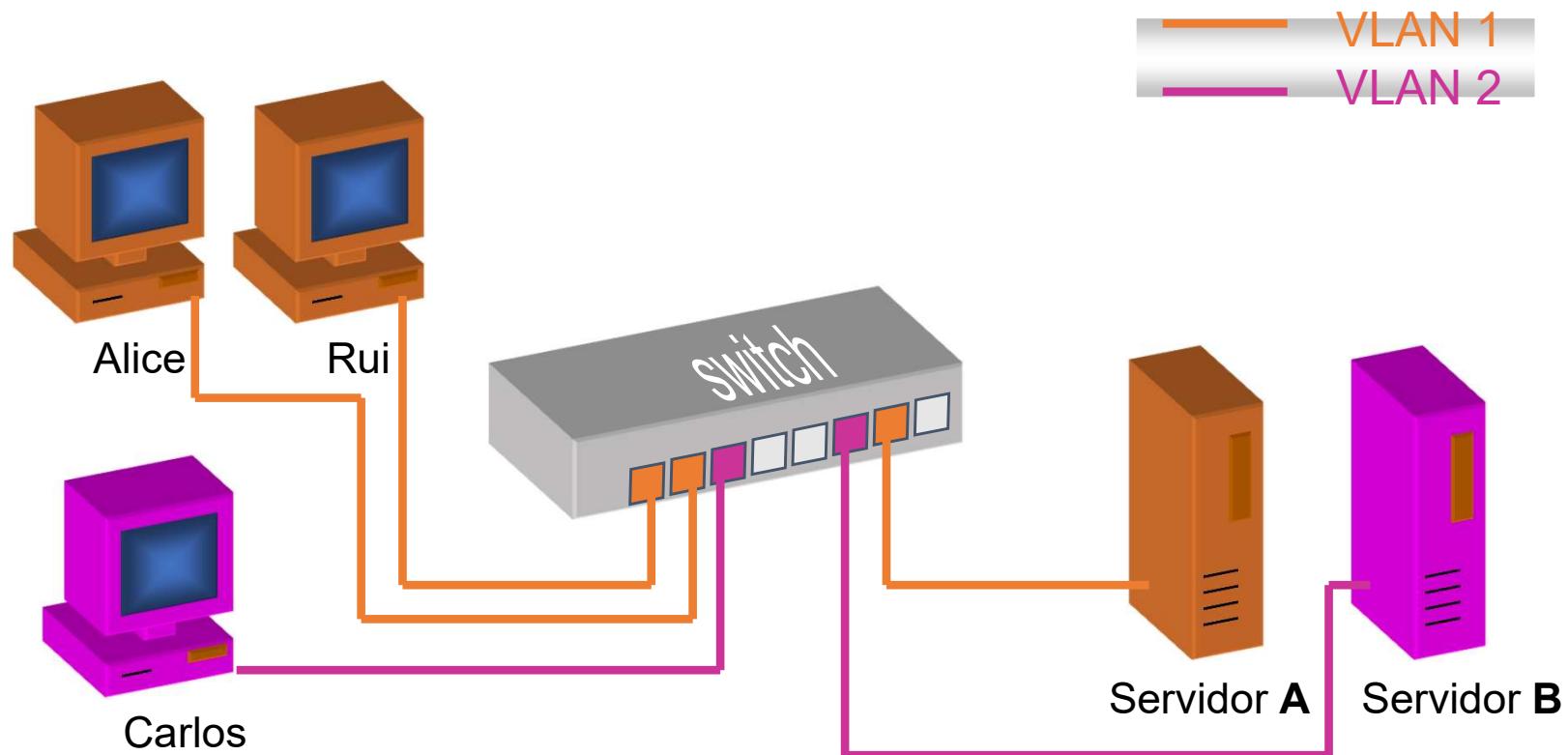
Solução 1: dividir a rede com switches

- Maneira simples de dividir a rede
- Necessita de dois switches



Solução 2: uso de VLANs para dividir a rede

- Do ponto de vista funcional é equivalente à solução anterior mas, **requer apenas um switch**
- As VLAN 1 e 2 são separadas

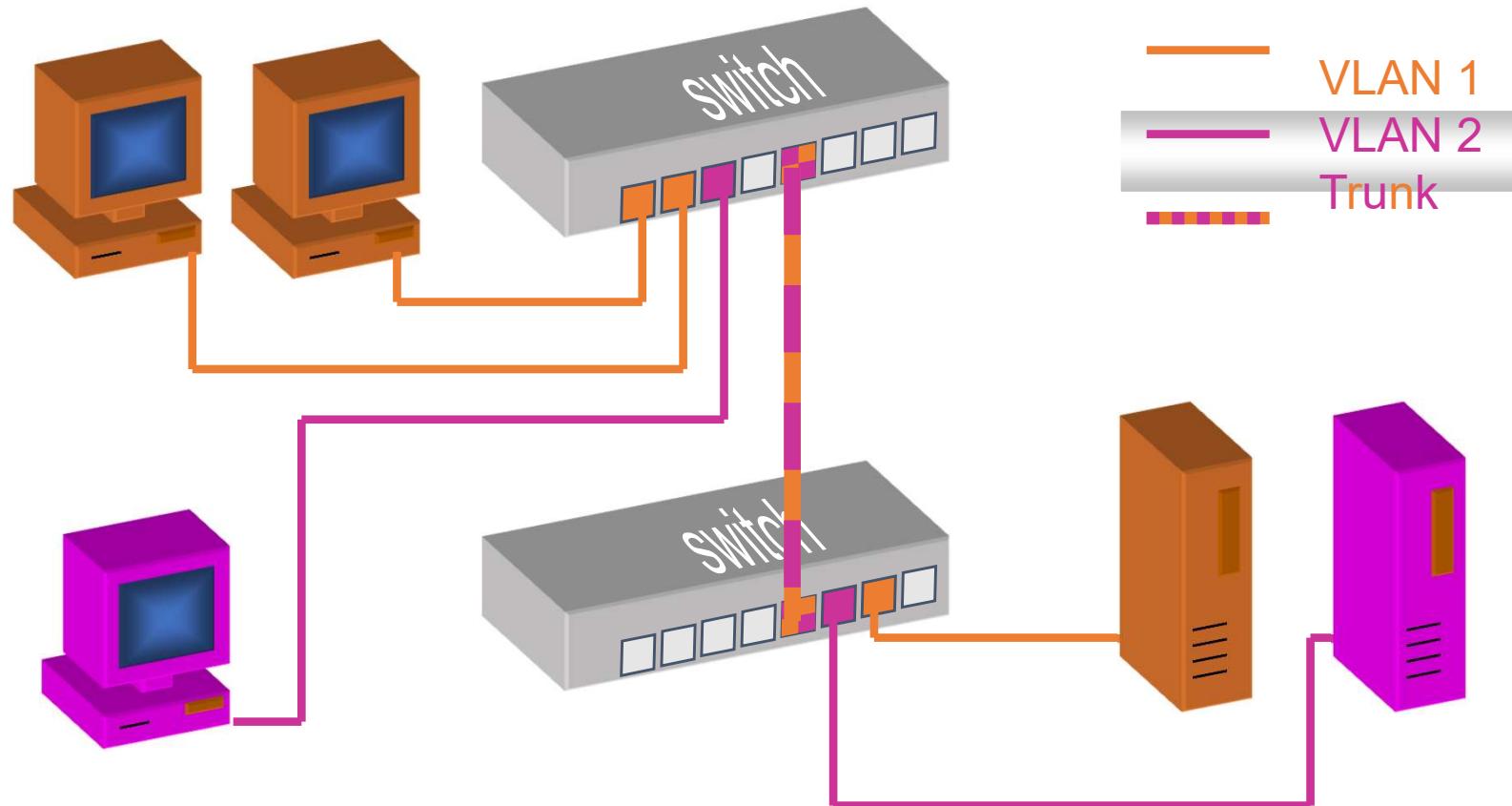


Packet tracer - <https://www.youtube.com/watch?v=aBOzFa6ioLw>

Exemplo de aplicação

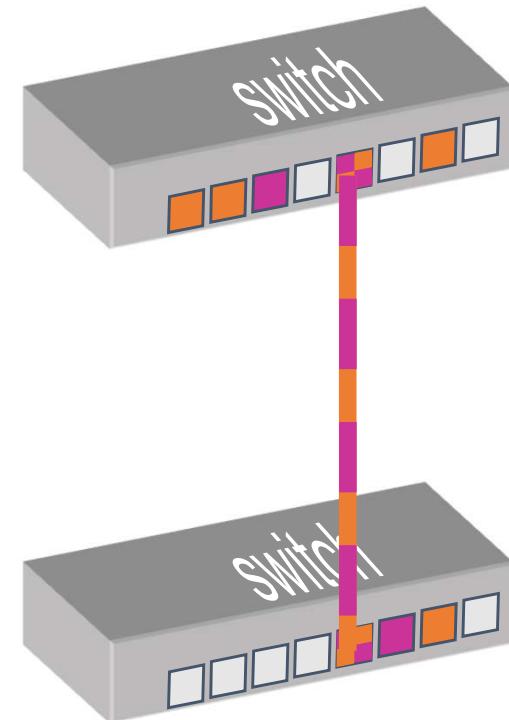
Rede comutada com vários switches - Ligação trunk

- Uma ligação *trunk* transporta o tráfego das VLANs entre *switches* e permite expandir a rede/VLANs.

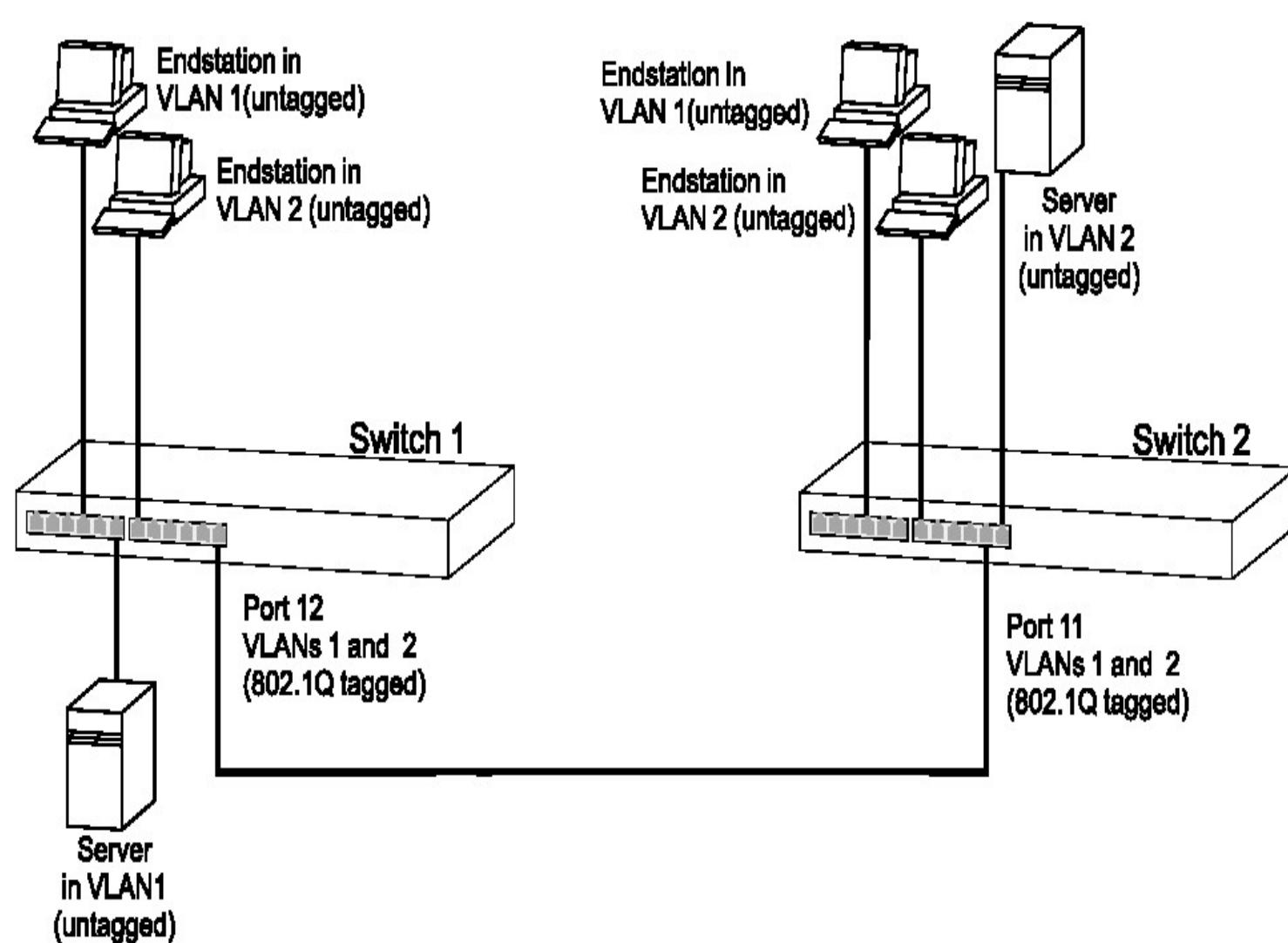


Ligaçāo *trunk*

- A ligação *trunk* transporta tráfego de múltiplas VLANs. É apenas necessário uma única ligação *trunk* para todas as VLANs
- As tramas na ligação *trunk* são marcadas (*tagged*) para indicarem a que VLAN pertencem, ou seja a porta de ligação entre switches (*Tag Port*) realiza o *tagging* das tramas propagadas:
 - Associa à trama o identificador da VLAN a que ela pertence
 - Recalcula o CRC da trama
- Só nas ligações *trunk* as tramas são marcadas (*tagged*)
- Utilizada principalmente para interligar *switches*



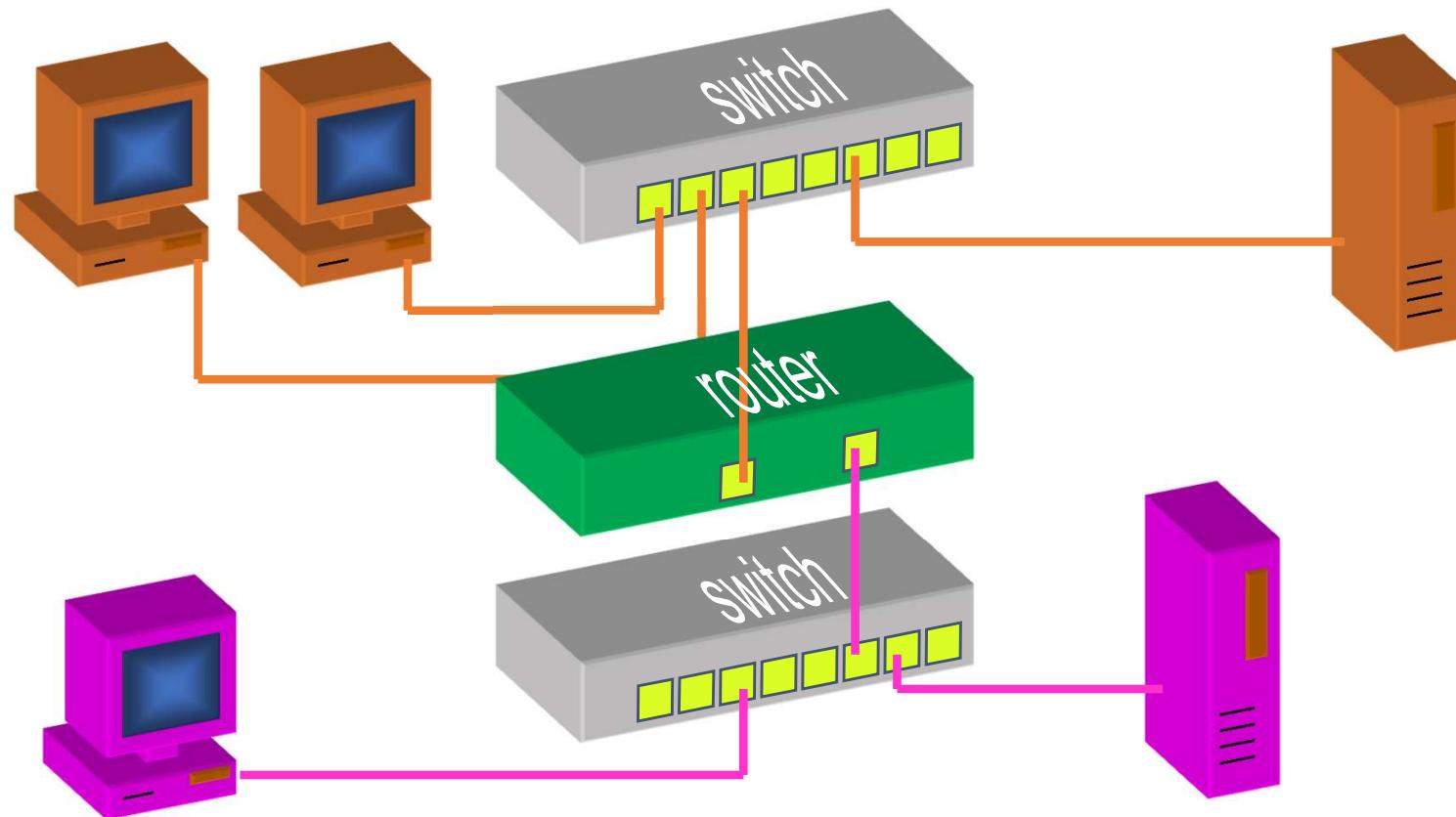
Exemplo de ligação *trunk*



Exemplo de aplicação

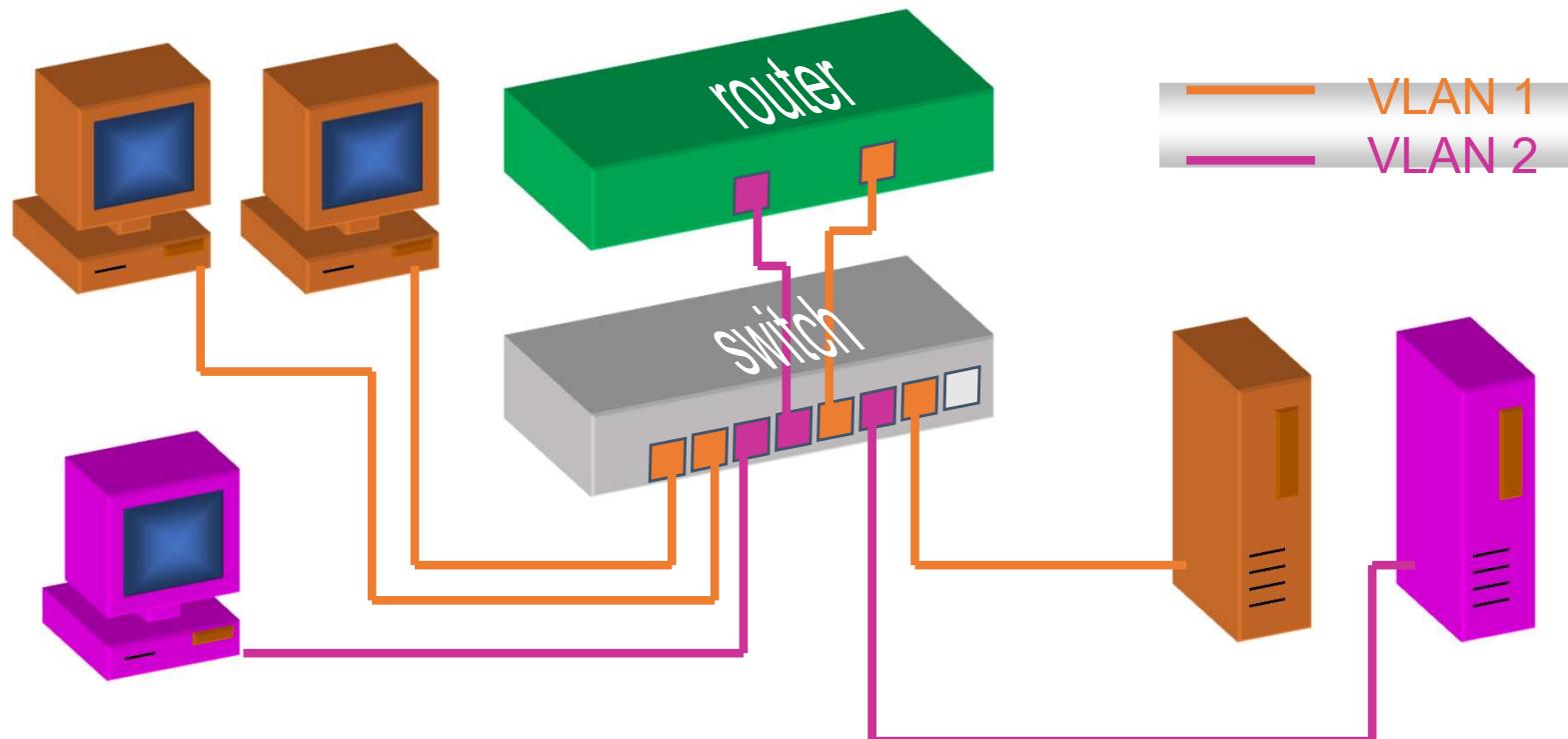
Encaminhamento entre VLANs -
Adicionar *routing* sem VLANs

- Duas redes com encaminhamento entre elas



Encaminhamento entre VLANs - Adicionar *routing* com VLANs

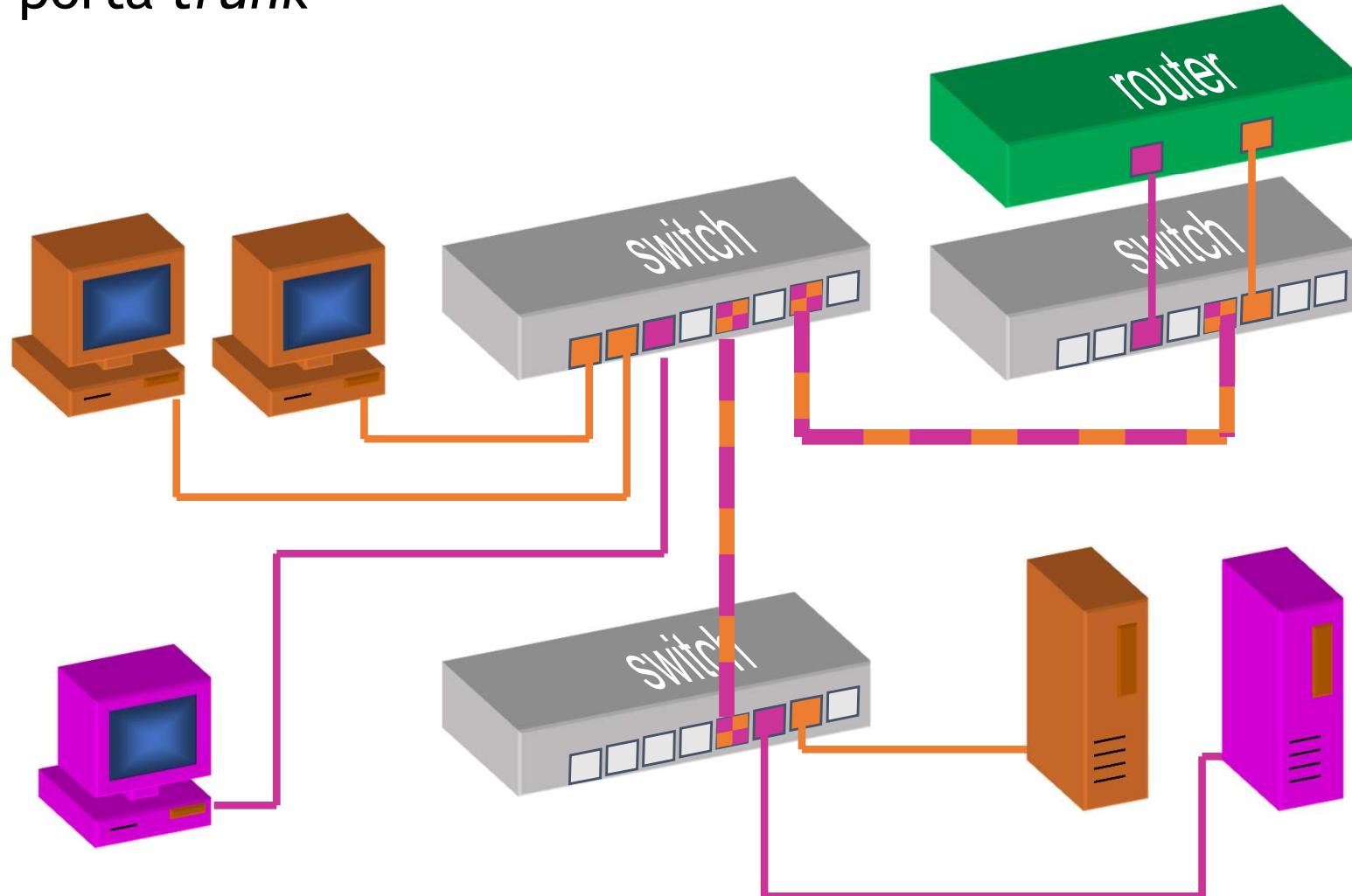
- Duas redes com encaminhamento entre elas
 - Muito simples se existir apenas um *switch*. O que acontece se forem mais que um...



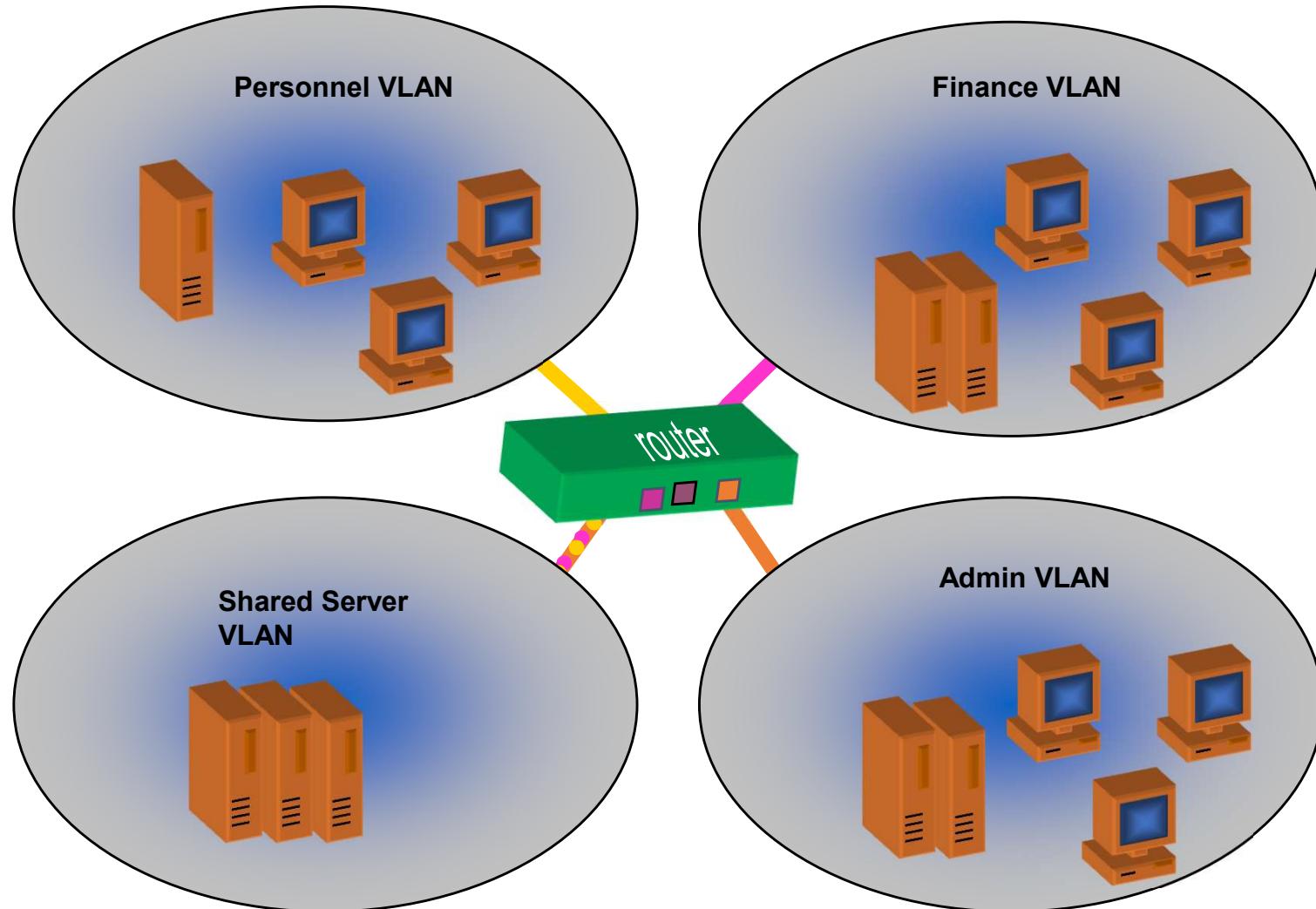
<https://www.practicalnetworking.net/stand-alone/routing-between-vlans/>

Routers podem estar em qualquer sítio

- Na maioria das vezes no *backbone*.
- A ligação ao *router* pode ser através de uma única porta *trunk*



Exemplo, vista lógica



Exercício 3.21

Considere a seguinte figura onde se representa uma rede onde existem duas VLANs definidas, VLAN10 e VLAN20.

- 1) Indique, justificando, qual seria o resultado de um ping nas seguintes situações:
 - a) PC1 para PC2 ?

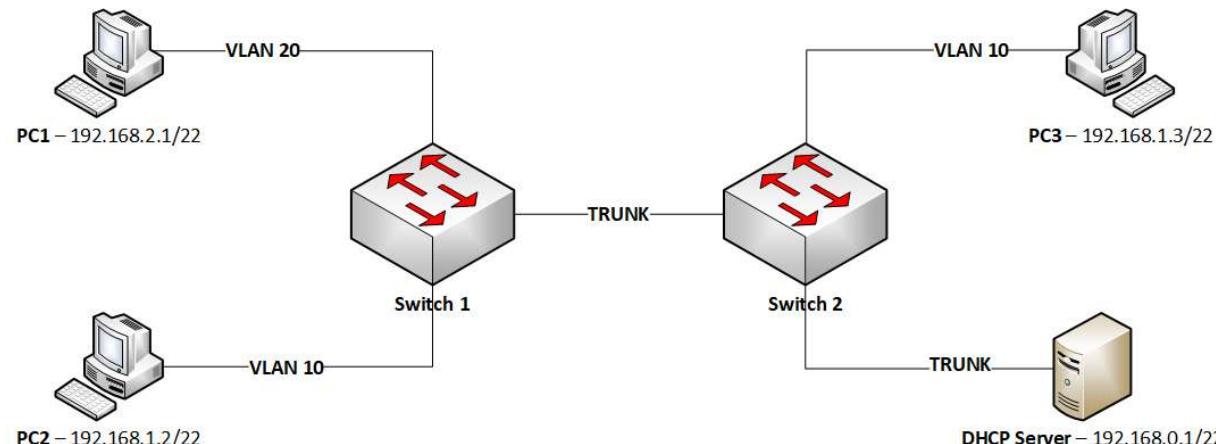
Não funciona, porque o PC1 e o PC2 encontram-se ligados a portos pertencentes a VLANs diferentes (VLAN10 e VLAN20).

- b) PC2 para PC3 ?

Funciona, porque o PC2 e o PC3, embora se encontrem em switches diferentes, estão ligados a portos pertencentes à mesma VLAN (VLAN10) e os switches repectivos estão interligados por portas configuradas em modo trunk.

- 2) Considere o envio de uma trama Ethernet 802.3 entre o PC2 e PC3. Indique onde é colocada a etiqueta que identifica a VLAN10 e onde é que essa etiqueta é retirada. Qual a função da etiqueta ?

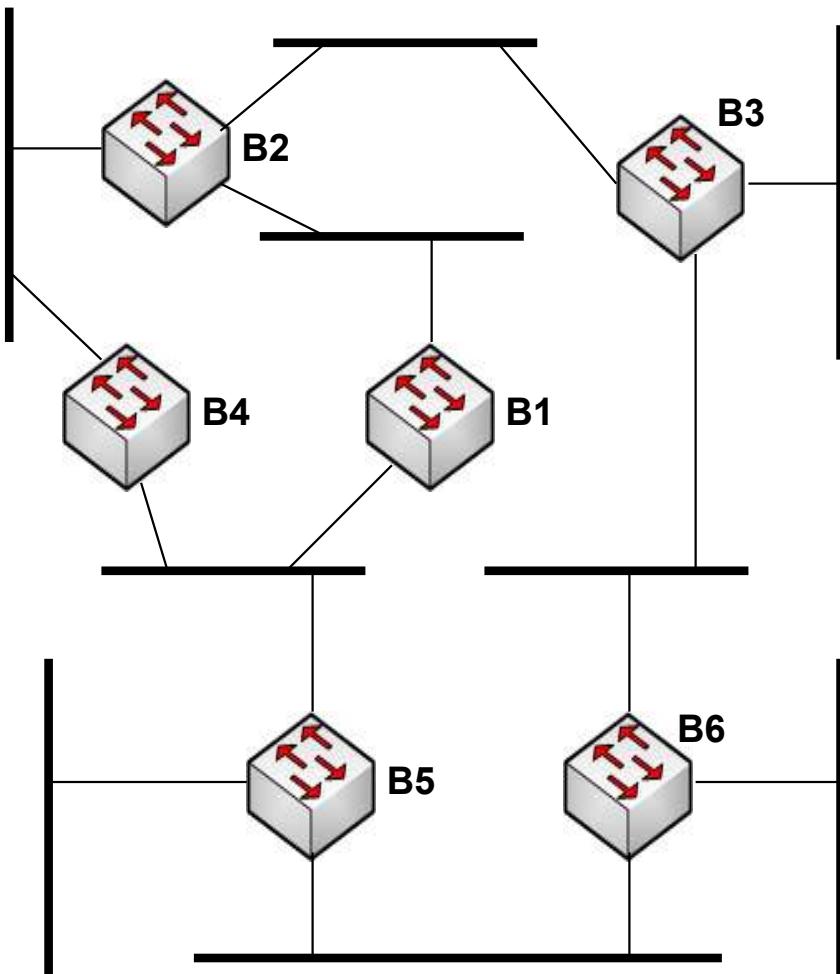
A etiqueta é colocada pelo Switch 1 e é retirada pelo Switch 2. A sua função é identificar a VLAN10 na ligação trunk entre os switches, visto que nessa ligação podem passar tramas de todas as VLANs.



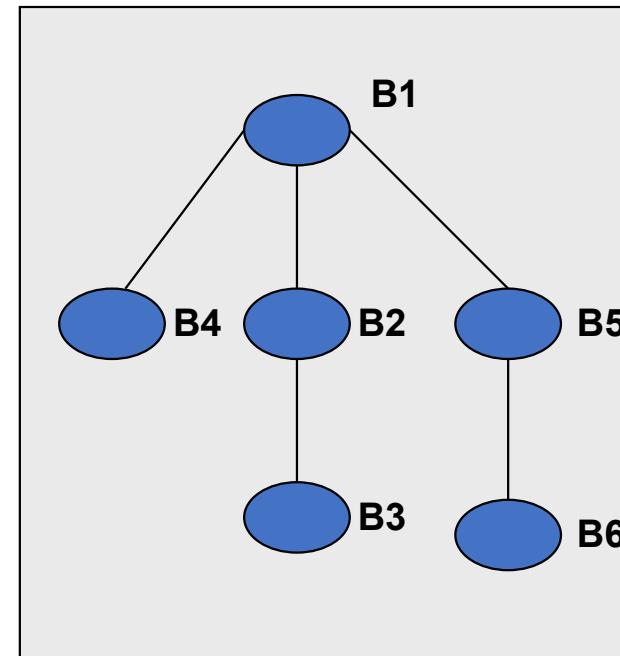
Protocolo *Spanning Tree*

- Protocolo *Spanning Tree*
 - MAC Bridge Spanning Tree Protocol (STP)(802.1D)
 - Publicação original pelo IEEE 802.1D-1990
 - Revisão versão IEEE 802.1D-1998
 - Revisão versão IEEE 802.1D-2004
- Protocolos Relacionados
 - 802.1w - *Rapid Spanning Tree Protocol* (RSTP)
 - 802.1s - *Multiple Spanning Tree Protocol* (MSTP)

Exemplo de Aplicação do Protocolo



Topologia de Rede em Árvore

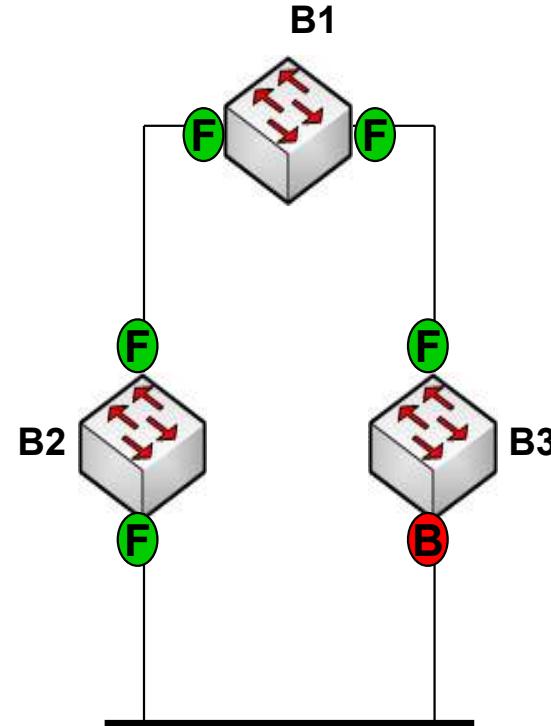


Características do Protocolo

- As *Bridges* transmitem mensagens entre elas que permitem calcular a topologia em árvore
- As mensagens trocadas entre as *Bridges* designam-se por *Bridge Protocol Data Units* (BPDUs)
- As portas têm diferentes estados possíveis
 - *Blocking* - Descarta as tramas que recebe
 - *Listening* - Construção da topologia activa
 - *Learning* - Preenchimento da tabela encaminhamento
 - *Forwarding* - Envio / Recepção de tramas
 - *Disabled* - Administrativamente desligada

Estados *Forwarding* e *Blocking*

- Para realizar a comutação de tramas as portas têm de estar no estado *Forwarding*
- Para prevenir os ciclos as portas ficam no estado *Blocking* e não reenviam as tramas recebidas
- Os estados *Listening* e *Learning* são usados para cálculo da topologia de rede
- No estado *Disabled* não existe troca de tramas



Funções
das portas



As portas que estão no estado *Forwarding* ou são ***Root Ports*** ou ***Designated Ports***. Todas as outras portas são ***Blocked Ports***.

Troca de Mensagens BPDU's

- Troca de informação entre as *Bridges*
 - As mensagens trocadas entre as *Bridges* são do tipo BPDU's
 - As mensagens BPDU's de configuração (C-BPDU's - 35 octetos) são enviadas pelas *Bridges* para eleger a *root bridge* e definir o estado dos portos.
 - As mensagens de mudança de topologia (TC-BPDU - 4 octetos) são enviadas pelas *Bridges* para anunciar uma mudança de topologia na sequência de uma alteração na rede

Exemplo de uma C-BPDU

<i>Protocol Identifier</i>	2
<i>Protocol Version Identifier</i>	1
<i>BPDU Type</i>	1
<i>Flags (TCA, Reserved, TC)</i>	1
<i>Root Identifier</i>	8
<i>Root Path Cost</i>	4
<i>Bridge Identifier</i>	8
<i>Port Identifier</i>	2
<i>Message Age</i>	2
<i>Max Age</i>	2
<i>Hello Time</i>	2
<i>Forward Delay</i>	2

Campos da Mensagem C-BPDU

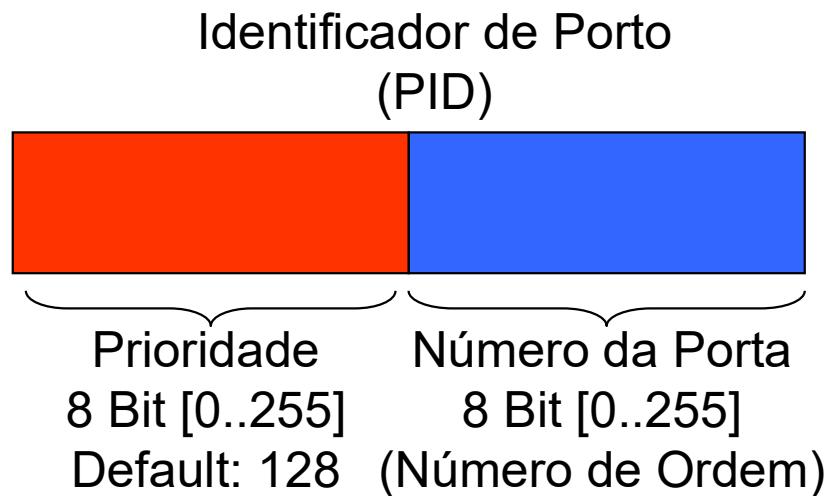
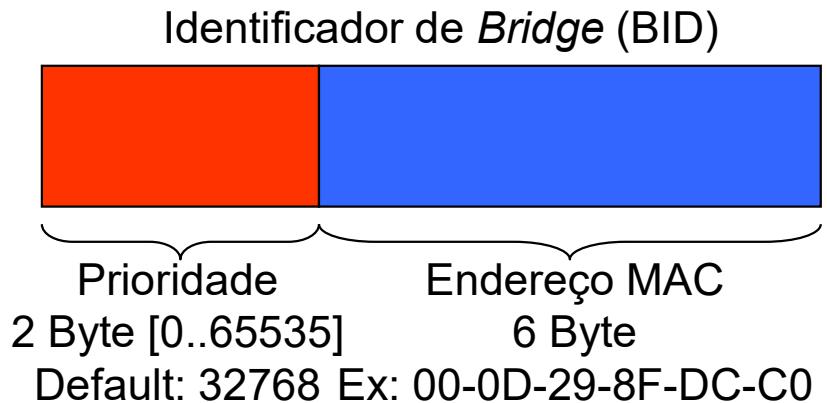
- Protocol ID = 0x0000
- Protocol Version ID = 0x00
- Protocol Type = 0x00
- Root Identifier = ID da *Root Bridge*
- Root Path Cost = Custo do caminho até à Root Bridge (é armazenado o melhor caminho)
- Bridge Identifier = ID da *Bridge* que envia a BPDU
- Port Identifier = ID do porto por onde sai a BPDU

Campos da Mensagem C-BPDU

- Message Age = (Na *Root Bridge*=0, nas outras tem um incremento correspondente ao número de *Bridges* por onde passou)
- Max Age = Tempo de armazenamento das BPDUs
- Hello Time = Tempo entre cada envio de BPDUs
- Forward Delay = Tempo de cálculo da topologia de rede

Identificadores *Bridge* / Porto

- Identificador de *Bridge* mais prioritário:
 - 1º - A *Bridge* com menor valor de prioridade;
 - 2º - Em caso de valores de prioridade iguais, menor valor de endereço MAC
- Identificador de Porta mais prioritário:
 - 1º - A porta com menor valor de prioridade;
 - 2º - Em caso de valores de prioridade iguais, menor valor do número de ordem da porta.



Distância - Custos dos Segmentos

- Inicialmente o custo original era calculado pela fórmula:

$$Custo = \frac{1000}{R_b [Mbps]}$$

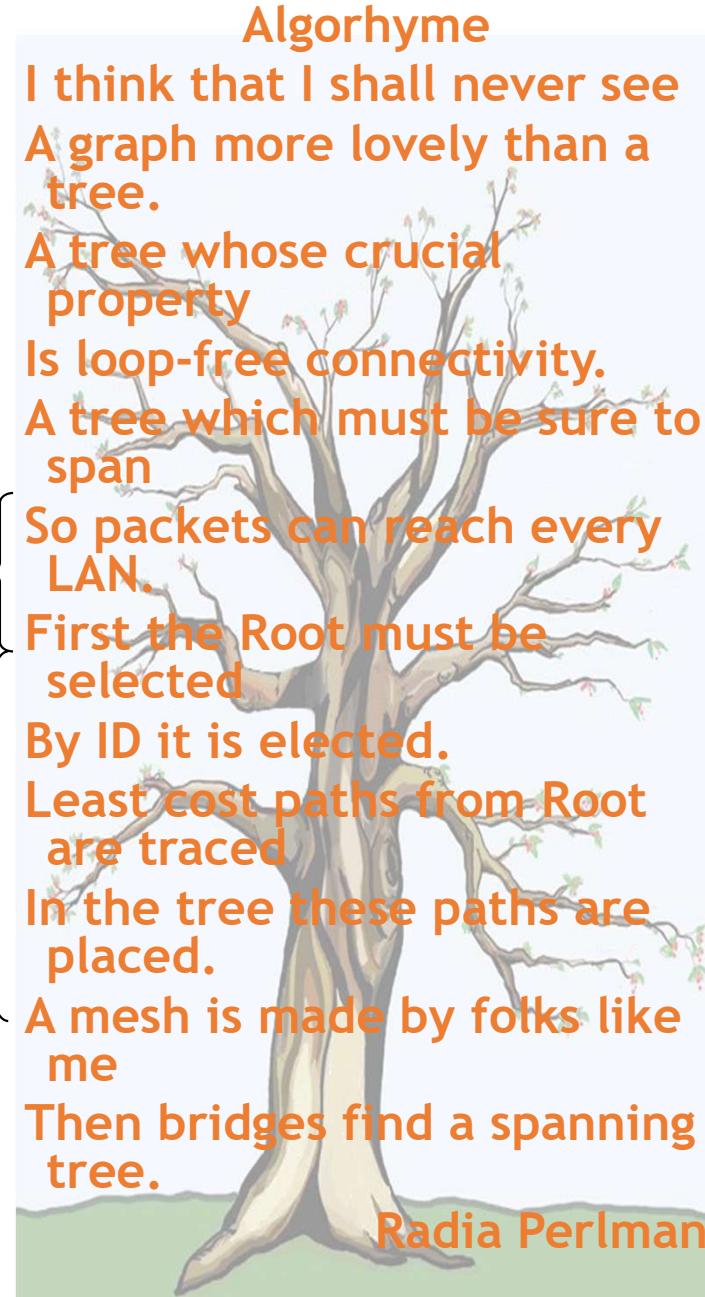
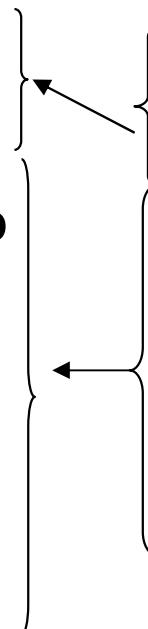
- Com o aparecimento da rede Gigabit surgiu o problema de cálculo de valores superiores a 1000 Mbps porque o valor usado é um valor inteiro.
- Foi decidido, pelo IEEE, modificar o custo e usar uma escala não linear apresentada na tabela e que é usada actualmente.

Tabela de Custos dos Segmentos

R_b	Custo
4 Mbps	250
10 Mbps	100
16 Mbps	62
100 Mbps	19
1 Gbps	4
10 Gbps	2

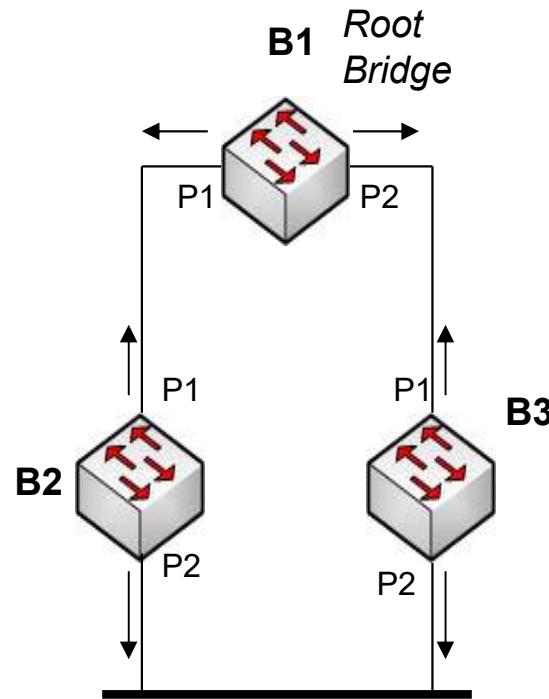
Algoritmo Spanning Tree

- Algoritmo desenvolvido por Radia Perlman
- Integrado na especificação IEEE 802.1D-1990
- 1º é eleita a *Bridge Root Bridge* pelo seu *Bridge ID*
- 2º São eleitas as portas *Root Port* para cada *Bridge* que não é *Root Bridge*
- 3º São eleitas as portas *Designated Port* para cada segmento



Eleição da *Root Bridge*

- As *Bridges* enviam as BPDUs com o seu BID assumindo-se como *Root Bridge*
- Todas as *Bridges* ficam a conhecer os valores BID das outras *Bridges*
- A *Bridge* com o menor valor de BID é eleita como *Root Bridge*
- No exemplo apresentado a B1 é a *Root Bridge*



Identificadores das *Bridges*

B1: 32768-000D298FDCC0

B2: 32768-000D298FDCC1

B3: 32768-000D298FDCC2

Eleição dos Root Ports

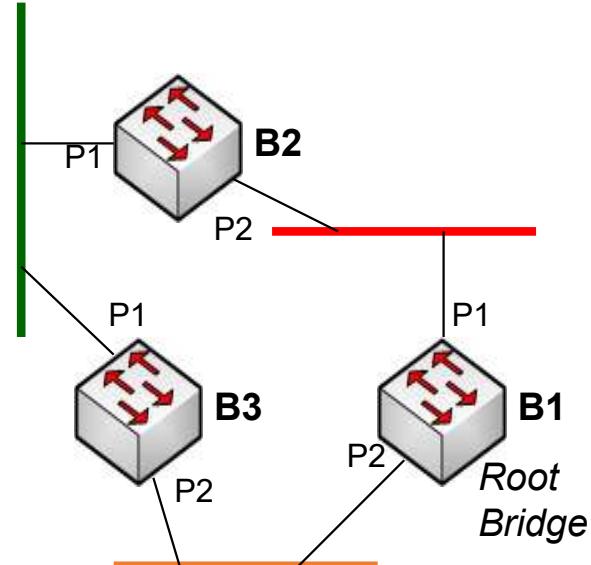
- *Root Port*: porta usada pela *Bridge* para "chegar" à *Root*
- Cada *Bridge* calcula o valor de custo do caminho de cada porta até à *Root Bridge* (*RPC*)
- A porta *Root Port* (*RP*) de cada *Bridge* é a porta com menor custo

Porta	PC	RPC	RP
B1-P1	4	0	-
B1-P2	100	0	-
B2-P1	19		
B2-P2	4		
B3-P1	19		
B3-P2	100		

PC (*Port Cost*) – O custo associado à porta



RPC (*Root Path Cost*) – Custo do caminho até à *Root Bridge*
 RP (*Root Port*) – Porta *Root Port* de cada *Bridge*



	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100

Eleição dos Root Ports

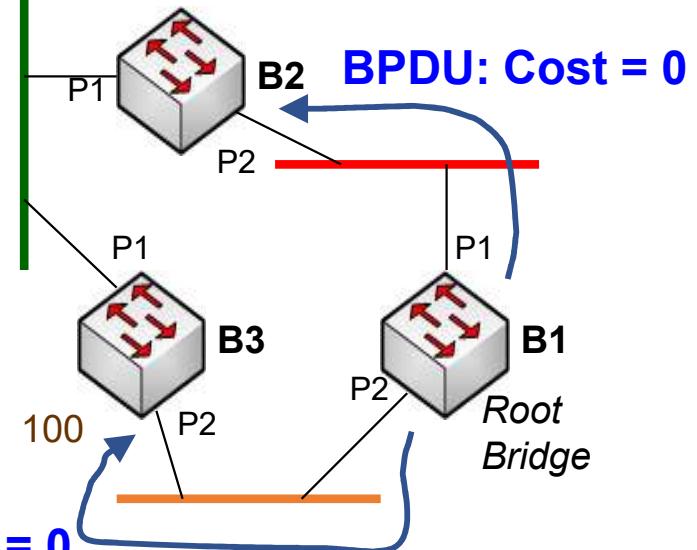
- Cada *Bridge* calcula o valor de custo do caminho de cada porta até à *Root Bridge* (RPC)
- A porta *Root Port* (RP) de cada *Bridge* é a porta com menor custo

Porta	PC	RPC	RP
B1-P1	4	0	-
B1-P2	100	0	-
B2-P1	19		
B2-P2	4	4	X
B3-P1	19		
B3-P2	100	100	X

$$\text{B3-P2: RPC} = (0) + 100 = 100$$

O RPC é calculado (incrementado) na *bridge* destino

$$\text{B2-P2: RPC} = (0) + 4 = 4$$



Protocol Identifier
Protocol Version Identifier
BPDU Type
Flags (TCA, Reserved, TC)
Root Identifier (B1)
Root Path Cost (0)
Bridge Identifier (B1)
Port Identifier (P2)

RPC (*Root Path Cost*) – Custo do caminho até à *Root Bridge*
 RP (*Root Port*) – Porta *Root Port* de cada *Bridge*

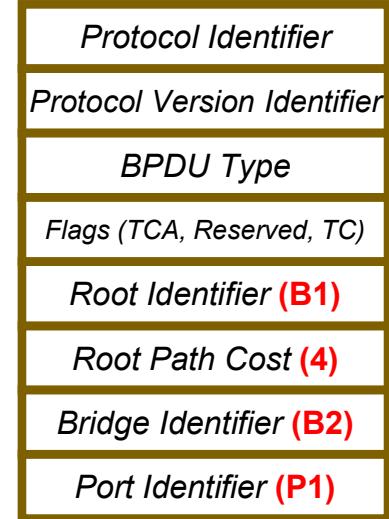
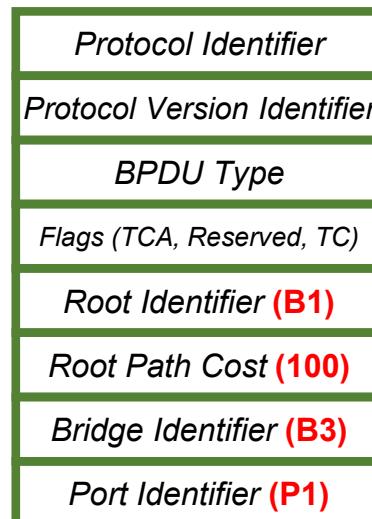
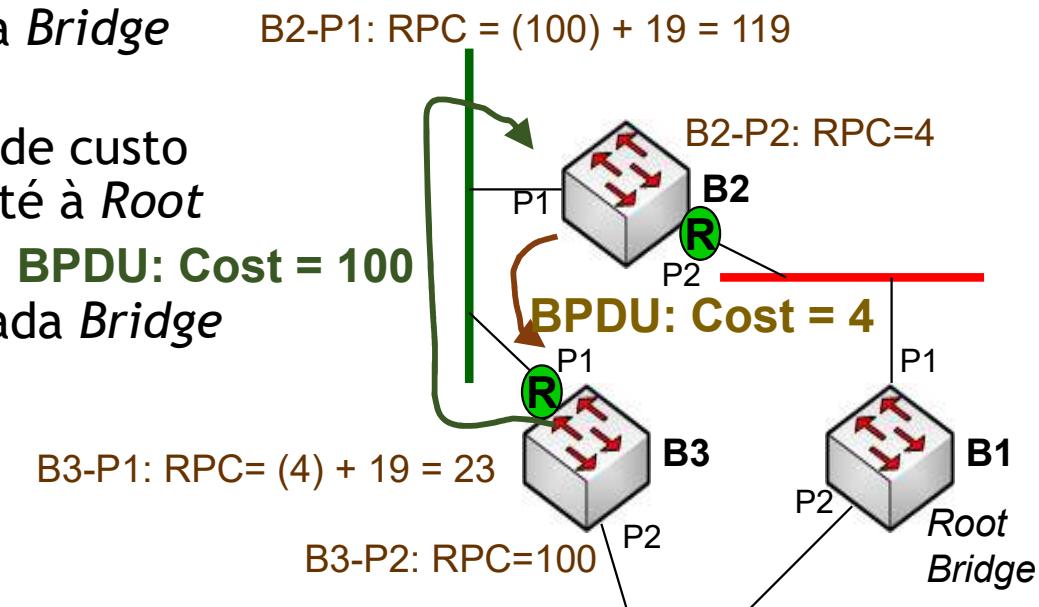
	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100

Eleição dos Root Ports

- *Root Port*: porta usada pela *Bridge* para “chegar” à *Root*
- Cada *Bridge* calcula o valor de custo do caminho de cada porta até à *Root Bridge* (RPC)
- A porta *Root Port* (RP) de cada *Bridge* é a porta com menor custo

Porta	PC	RPC	RP
B1-P1	4	0	-
B1-P2	100	0	-
B2-P1	19	119	-
B2-P2	4	4	X
B3-P1	19	23	X
B3-P2	100	100	-

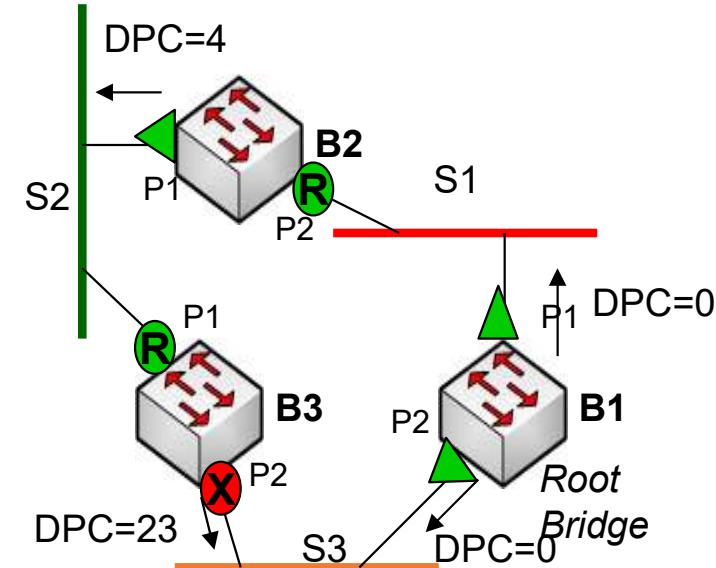
	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100



Eleição dos *Designated Ports*

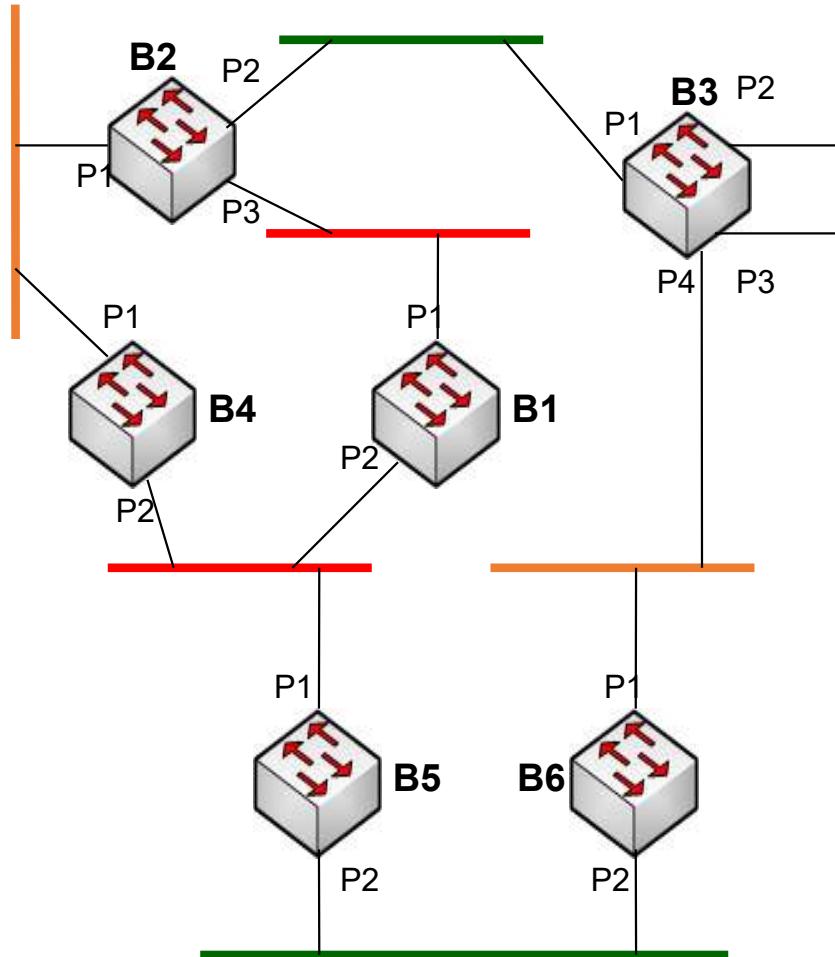
- Cada segmento tem associado uma porta *Designated Port* de uma *Bridge* ligada a ele
- O custo de saída DPC das portas que não são *Root Port* é o valor de entrada RPC da *Root Port*
- É *Designated Port* de um segmento a porta com menor custo que está ligada a esse segmento
- O custo até à *Root* é do ponto de vista dos segmentos e não das *bridges*

	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100



Porta	PC	RPC	RP	DPC	DP
B1-P1	4	0	-	0	X
B1-P2	100	0	-	0	X
B2-P1	19	119	-	4	X
B2-P2	4	4	X	-	-
B3-P1	19	23	X	-	-
B3-P2	100	100	-	23	-

Exercício 3.18



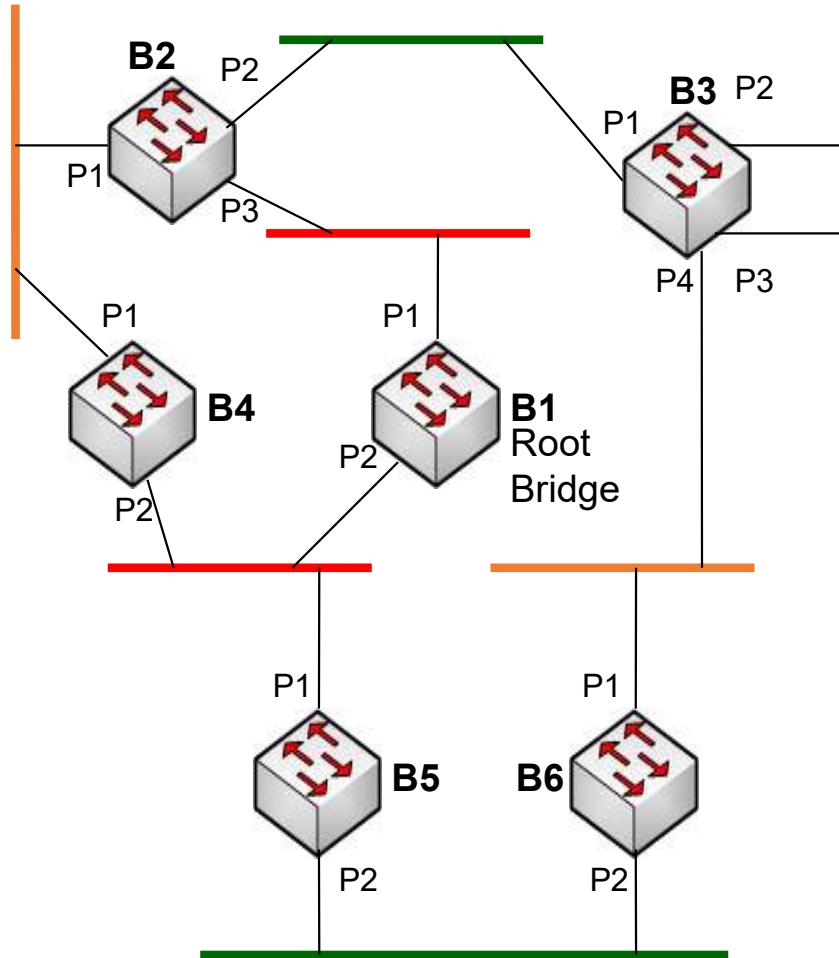
	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100

Identificadores das *Bridges*

- B1)** 32768:00-0D-29-8F-DC-C1
- B2)** 32768:00-0D-29-8F-DC-C2
- B3)** 32768:00-0D-29-8F-DC-C3
- B4)** 32768:00-0D-29-8F-DC-C4
- B5)** 32768:00-0D-29-8F-DC-C5
- B6)** 32768:00-0D-29-8F-DC-C6

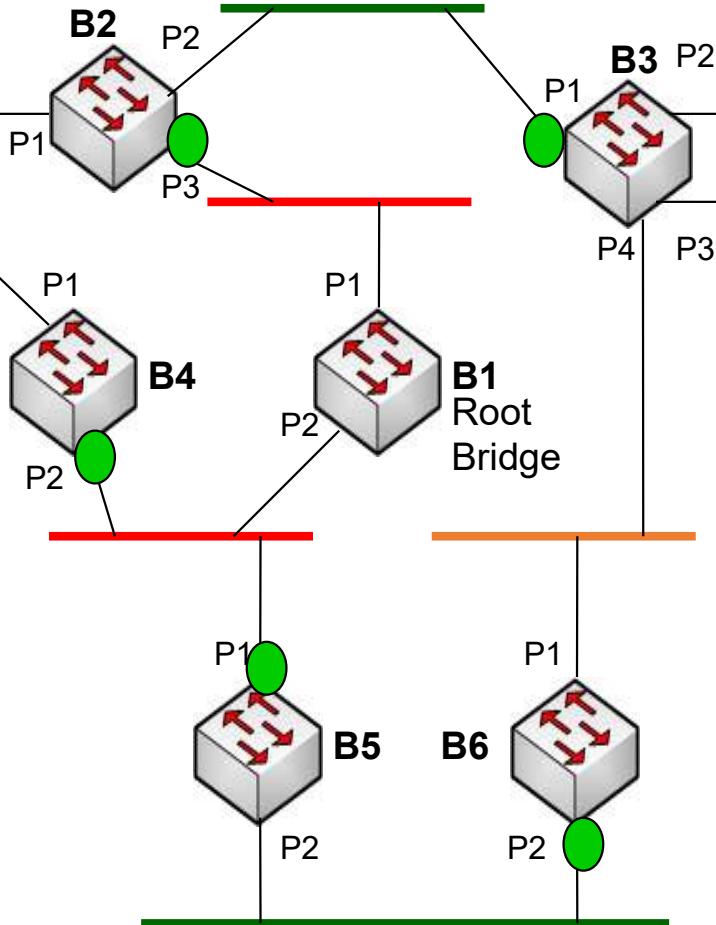
Todas as portas das Bridges têm a prioridade por omissão

Eleição da *Root Bridge*



	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100

Valores de Cálculo de Root Path Cost

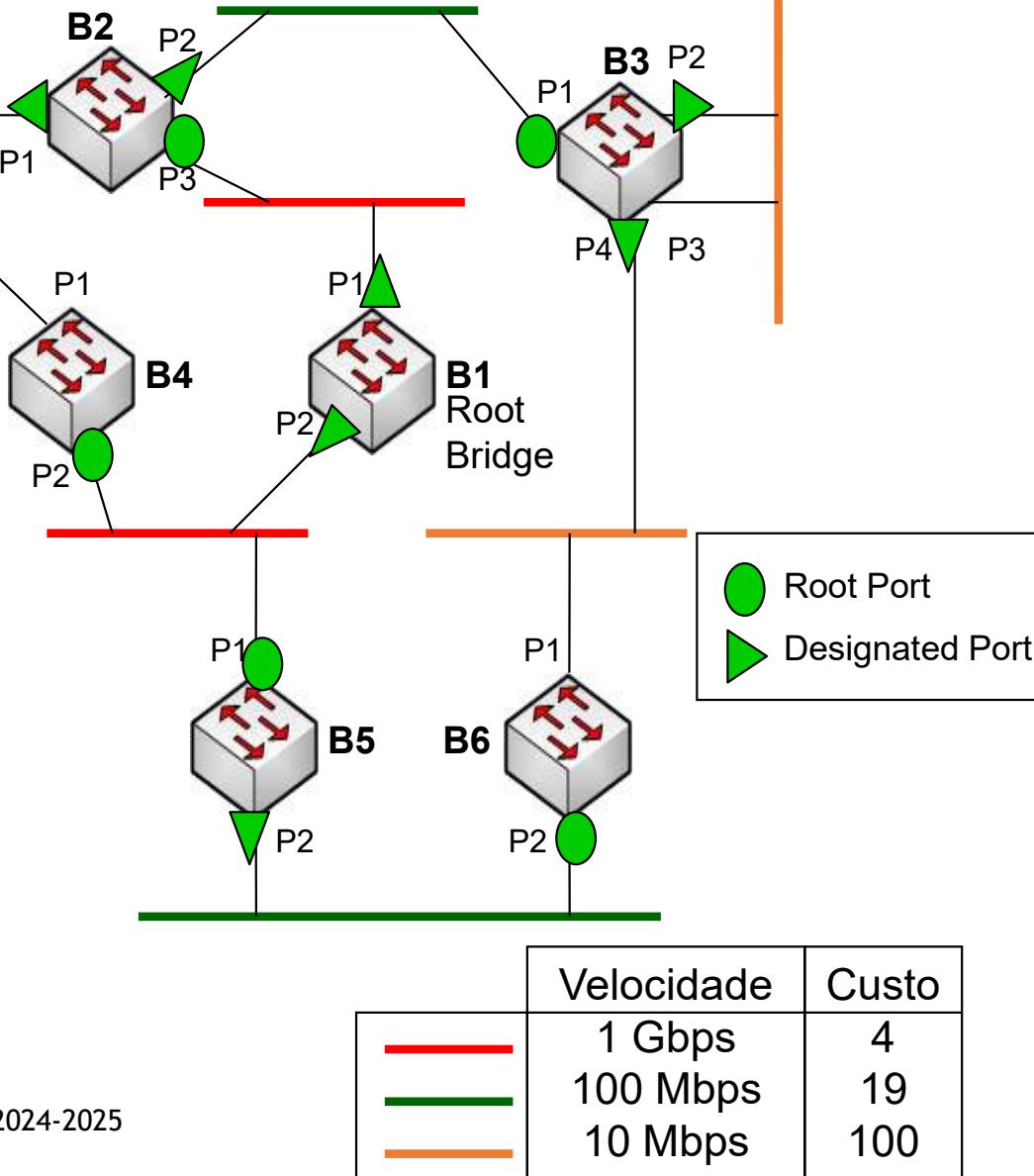


	Velocidade	Custo
—	1 Gbps	4
—	100 Mbps	19
—	10 Mbps	100

Porta	PC	RPC	RP	DPC	DP	Block
B1-P1	4	0	-			
B1-P2	4	0	-			
B2-P1	100	(0+4)+100= 104	-			
B2-P2	19	(0+4+19+100)+19= 142	-			
B2-P3	4	(0)+4= 4	X	-	-	-
B3-P1	19	(0+4)+19= 23	X	-	-	-
B3-P2	100	(0+4+19)+100= 123	-			
B3-P3	100	(0+4+19)+100= 123	-			
B3-P4	100	(0+4+19)+100= 123	-			
B4-P1	100	(0+4)+100= 104	-			
B4-P2	4	(0)+4= 4	X	-	-	-
B5-P1	4	(0)+4= 4	X	-	-	-
B5-P2	19	(0+4+19+100)+19= 142	-			
B6-P1	100	(0+4+19)+100= 123	-			
B6-P2	19	(0+4)+19= 23	X	-	-	-

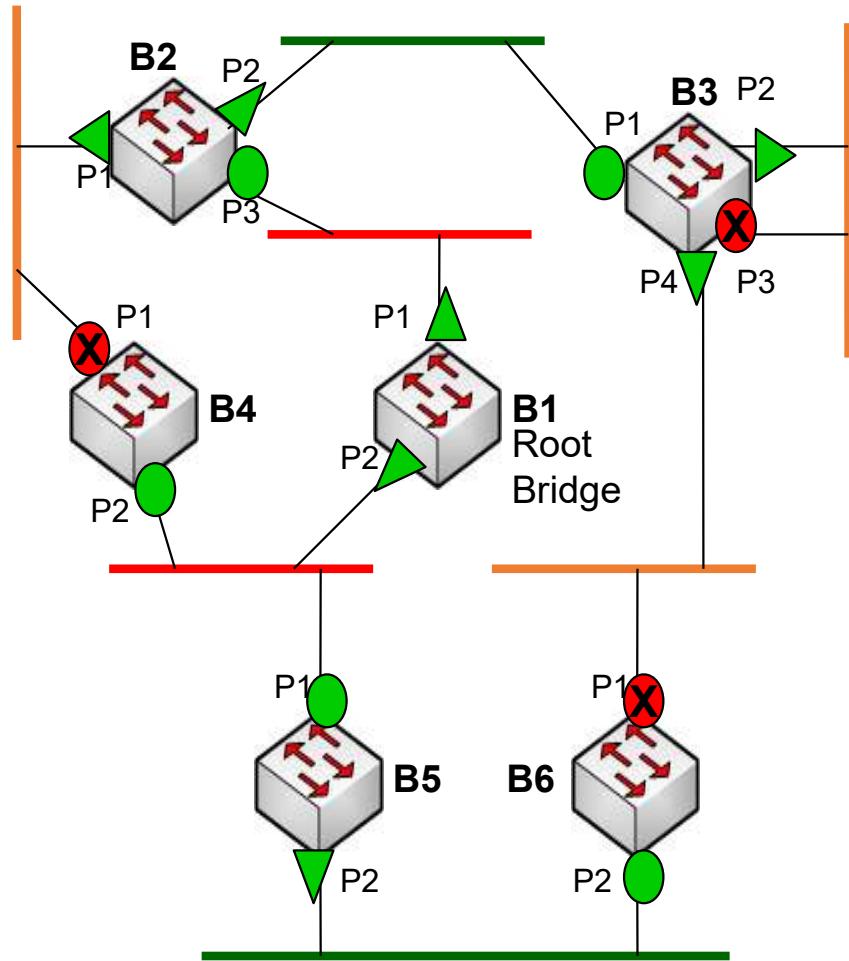
Valores de Cálculo Designated Port

As portas que não são Root Port nem Designated Port ficam no estado Blocking

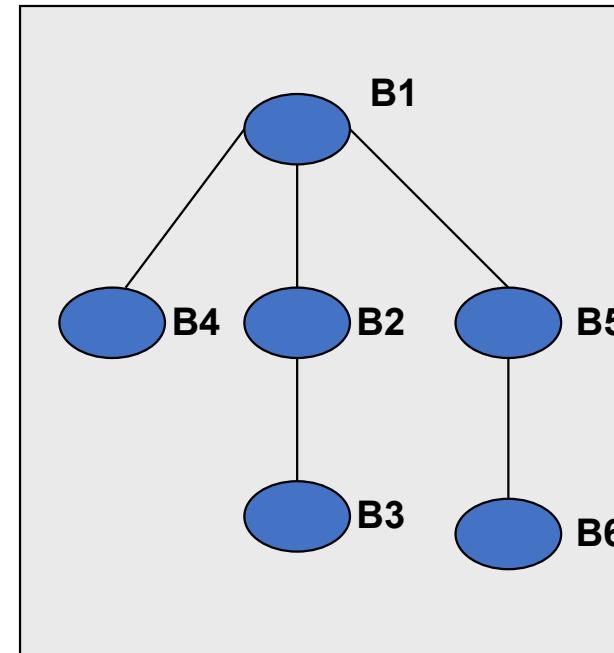


Porta	PC	RPC	RP	DPC	DP	Block
B1-P1	4	0	-	0	X	-
B1-P2	4	0	-	0	X	-
B2-P1	100	104		4	X	
B2-P2	19	142		4	X	
B2-P3	4	4	X	-	-	-
B3-P1	19	23	X	-	-	-
B3-P2	100	123	-	23	X	-
B3-P3	100	123	-	23	-	X
B3-P4	100	123	-	23	X	-
B4-P1	100	104	-	4		X
B4-P2	4	4	X	-	-	-
B5-P1	4	4	X	-	-	-
B5-P2	19	142	-	4	X	-
B6-P1	100	123	-	23	-	X
B6-P2	19	23	X	-	-	-

Topologia Final em Árvore Livre de Ciclos

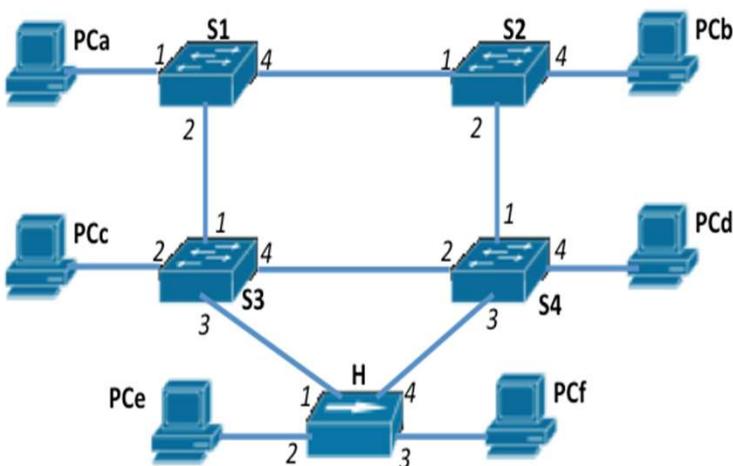


Topologia da Rede em Árvore



Exercício 3.19

Considere o conjunto de PCs (*PC_a* a *PC_f*) que se encontram interligados através de um conjunto de comutadores (switch *S₁* a *S₄*) e um concentrador (*H*) e para os quais se apresentam também os respectivos endereços MAC e Bridge IDs.



	Bridge ID M
S1	80:00:00:00:00
S2	80:00:00:00:00
	Endereço MAC
PCa	00:00:00:00:00:00
PCb	00:00:00:00:00:00
PCc	00:00:00:00:00:00
PCd	00:00:00:00:00:00
PCe	00:00:00:00:00:00
PCf	00:00:00:FF:FF:FF

2024-2025

- a) Identifique os ciclos que são formados pelas ligações entre os comutadores e entre estes e o concentrador.

3 ciclos

- b) Indique, justificando através de exemplos, que estes ciclos permitem tornar a rede mais robusta à quebra de ligações e/ou a falhas de equipamentos.

Lan12, Lan24, Lan13, Lan34 podem ser quebradas que a conectividade mantém-se. Lan H é atingida se S3 ou S4 se desligarem

- c) Considere que os comutadores na rede utilizam o algoritmo de *Spanning Tree*.

STP elimina ciclos e garante conectividade

- Qual a função deste algoritmo?
- Indique qual o comutador escolhido para raiz (*root bridge*) da árvore?

S1 pq tem MAC Id mais baixo (para a mesma prioridade)
 iii) Para cada um dos comutadores indique a sua distância ao comutador raiz.

S1=0; S2=1; S3=1; S4=2

- Para cada um dos segmentos (corresponde a uma LAN) indique qual o comutador que funciona como *designated bridge*.

Lan a-S1p1; Lan12-S1p4; Lan b-S2p4; Lan 13-S1p2; Lan 24-S2p2; Lan34-S3p4; Lan d-S4p4; Lan c-S3p2; Lan H S3p3

- Para cada um dos comutadores indique o estado dos seus portos.

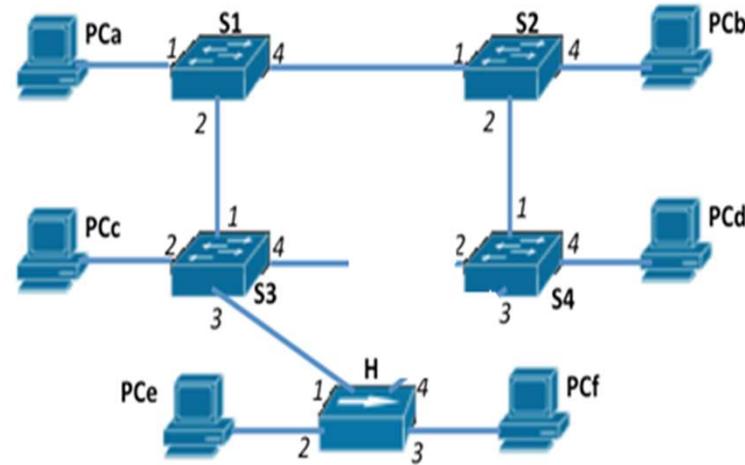
RP- Root port; DP- Designated Port; B- Block

vi) Represente a árvore de escoamento (*spanning tree*) obtida.

c) Considere a árvore de escoamento obtida anteriormente. Para a seguinte sequência de tramas trocadas entre as estações, indique quer os segmentos que essa trama (ou cópias) atravessa bem como o estado da tabela de expedição dos comutadores.

- PCe para PCd.

PCe->LanH->S3flooding (envio para P1,P2, P4)-> S1flooding (envio para P1, P4)-> S2flooding(envio para P2, P4)-> S4flooding(envio para P2, P3,P4) ->PCd



S3 fica MAC PCe em P3; S1 fica MAC PCe em P2; S2 fica MAC PCe em P1; S4 fica MAC PCe em P1

- PCd para PCe.

PCd->S4P1->Lan24->S2P1->Lan 12-> S1p2-> Lan13-> S4p3->Lan H

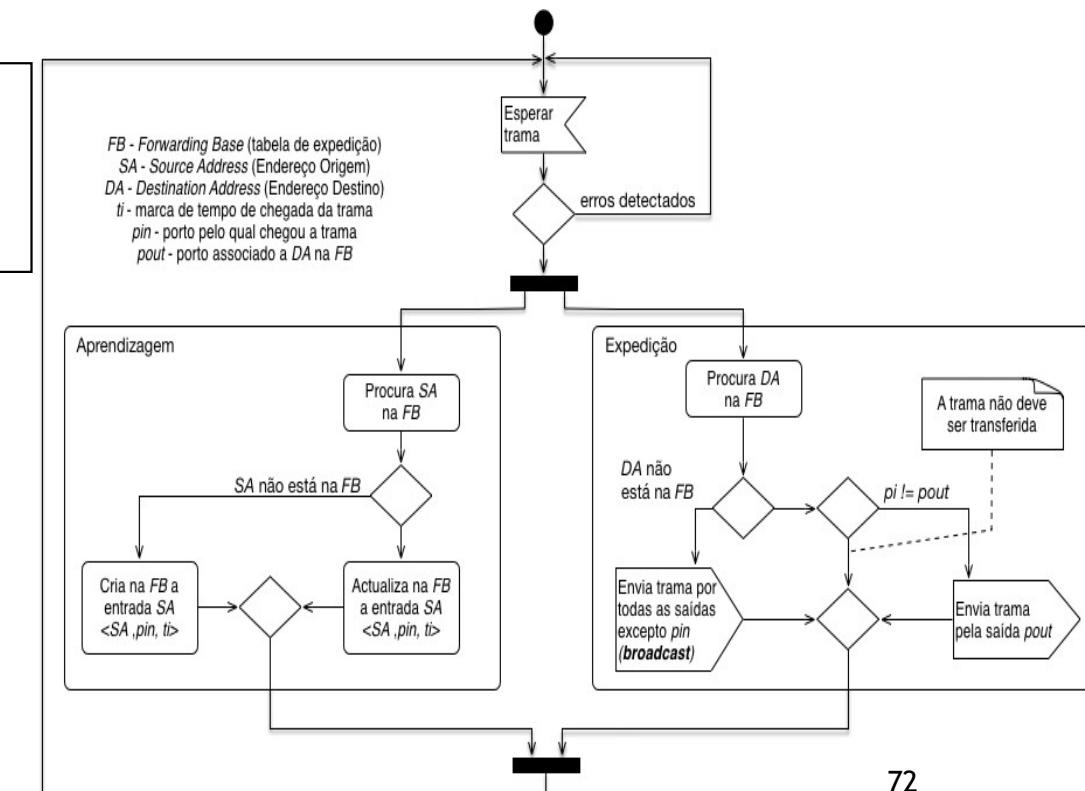
S4 fica MAC PCd em P4;
S2 fica MAC PCd em P2;
S1 fica MAC PCd em P4;
S3 fica MAC PCd em P1

- PCe para PCd.

PCe->lan H->S3P1->lan13->S1P4->lan 12-> S2p2-> lan24-> S4p4->PCd

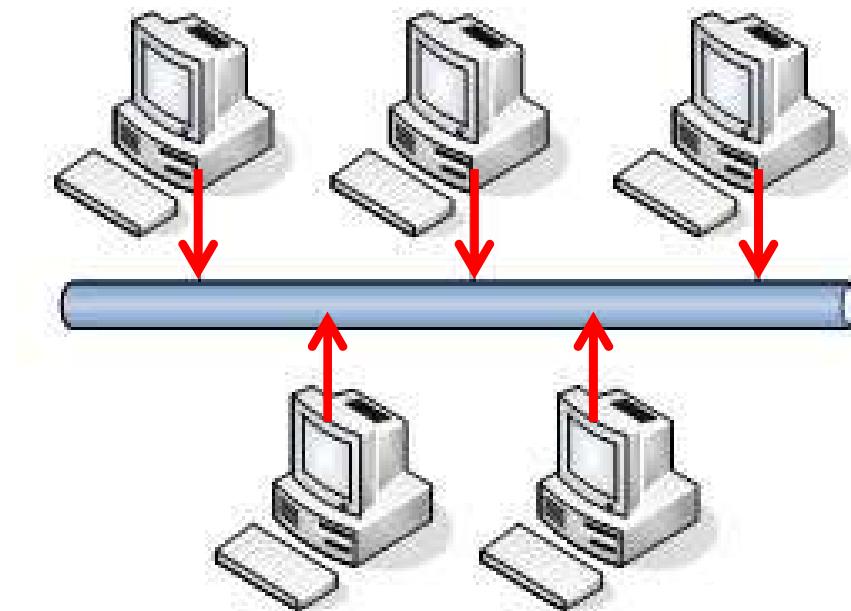
PCc-> lan c-> S3P3-> lanH->PCe

- PCc para PCe. S3 fica MAC PCc em P2;
- d) O que acontece se forem enviadas tramas para o PCd e este entretanto se tiver ligado no porto 3 do comutador S3?



Recordando Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

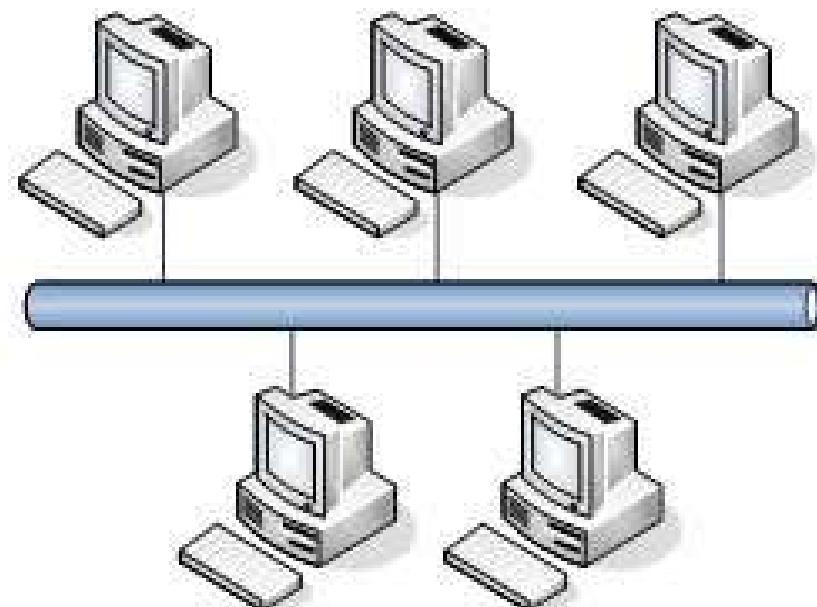
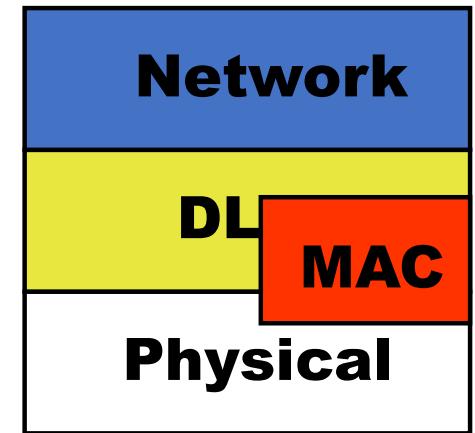
- Como é que controlamos o acesso a um meio de transmissão partilhado por múltiplos utilizadores de forma dinâmica?



Recordando Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

Medium Access Control (MAC) Sublayer:

- Implementa as funcionalidades de um subnível entre o nível ligação de dados (transmissão de tramas) e o nível físico (detecção das colisões)



Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (Medium Access Control Sublayer)

- Alocação estática (e.g., TDM, FDM)

- Capacidade do canal C bit/s
- Taxa de chegada de λ_A trama/s
- Comprimento da trama segundo uma exponencial de média $1/\mu$ bits/trama
- Atraso médio: $T_1 = T_Q + T_{Tx} = \frac{1}{\lambda_s} \left(\frac{\rho}{1-\rho} \right) + \frac{1}{\lambda_s} = \frac{1}{\lambda_s - \lambda_A} = \frac{1}{\mu C - \lambda_A}$
- Se os canais forem todos iguais a C/N bit/s e se cada fonte gerar apenas λ_A/N tramas/s .
- Atraso médio:

$$T_N = \frac{1}{\mu(C/N) - (\lambda_A/N)} = \frac{N}{\mu C - \lambda_A} = N T_1$$

Recordando

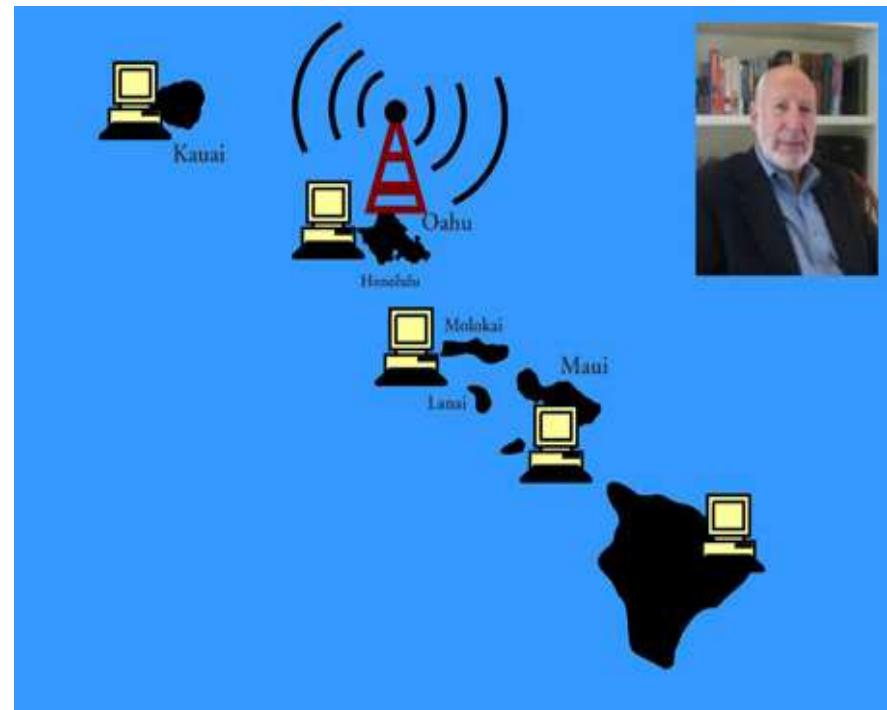
Sub-Nível de Controlo de Acesso ao Meio (*Medium Access Control Sublayer*)

- **Alocação dinâmica - hipóteses:**

- N estações independentes (não há coordenação)
- Um único canal partilhado por todas as estações
- Colisões (receptor “escuta” duas ou mais transmissões)
- Característica temporal:
 - Tempo contínuo “*Continuous Time*”
 - Tempo às fatias “*Slotted Time*”
- Escuta do canal:
 - Com detecção de portadora “*Carrier Sense*”
 - Sem detecção de portadora “*No Carrier Sense*”

Sistema ALOHA: Motivação

- Interligação via rádio de terminais de computador com um computador central* através de um processador de mensagens (o MENEHUNE**) no arquipélago do Hawai
- Utilização de dois canais rádio:
 1. Do MENEHUNE para os terminais remotos - **sem colisões**
 2. Dos terminais remotos para o MENEHUNE com partilha dinâmica do canal rádio - **com colisões**
- Desenvolvido por Norman Abramson em 1971 na Universidade do Hawai



* Central computer of “THE ALOHA SYSTEM” (IBM 360/65 with a 750 Kbyte core memory)

** Interface Message Processor (HP 2115A with 16-bit word size and an 8 Kword core storage capacity)

"The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications"

Norman Abramson

Technical Report B70-1, April 1970

- *(...) random access method of multiplexing a large number of low data rate consoles into the MENEHUNE through a single radio communication channel.*
- **THE ALOHA SYSTEM** has been assigned **two 100 KHz channels** at 407.350 MHz and 413.475 MHz. One of those channels has been assigned for data from the MENEHUNE to the remote consoles and the other for data from the consoles to the MENEHUNE. Each of these channels will operate at a **rate of 24,000 baud**.
- The **communication channel from the MENEHUNE to the consoles provides no problems**. Since the transmitter can be controlled and buffering performed by the MENEHUNE at the Computer Center, **messages from the different consoles can be ordered in a queue according to any given priority scheme and transmitted sequentially**.

"The ALOHA System – Another Alternative for Computer Communications"

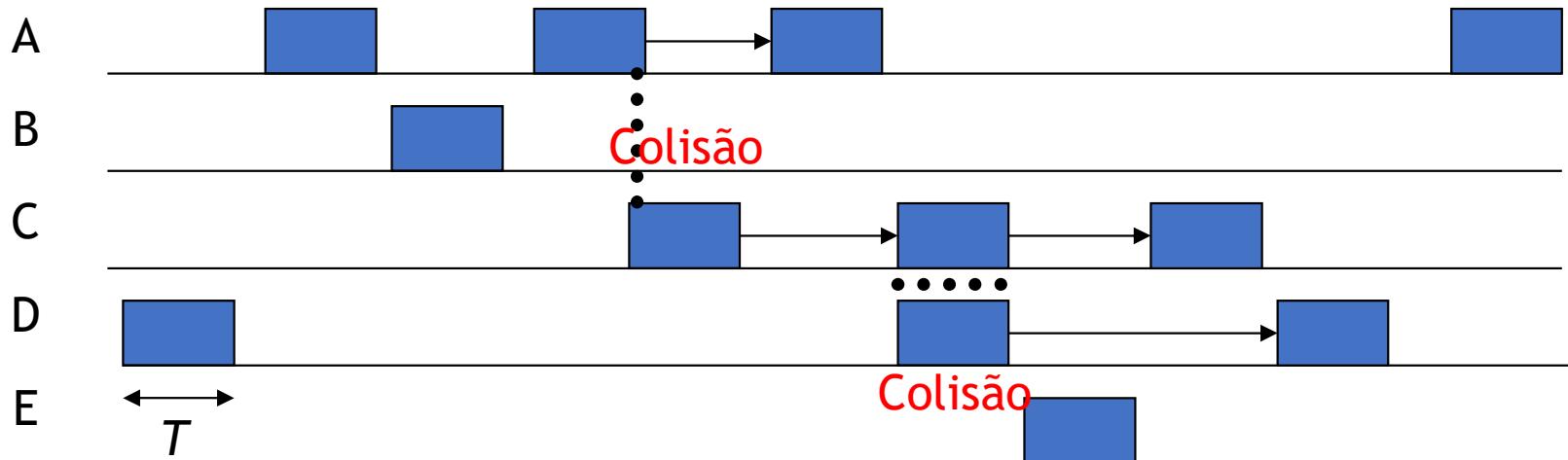
Norman Abramson

Technical Report B70-1, April 1970

- Messages from the remote consoles to the MENEHUNE however are not capable of being multiplexed in such a direct manner. If standard orthogonal multiplexing techniques (such as frequency or time multiplexing) are employed we must divide the channel from the consoles to the MENEHUNE into **a large number of low speed channels and assign one to each console, whether it is active or not.** Because of the fact that at any given time only a fraction of the total number of consoles in the system will be active and because of the burst nature of the data from the consoles such a scheme **will lead to the, same sort of inefficiencies found in a wire communication system.**
- (...) THE ALOHA SYSTEM uses a **common** high speed **data channel without the necessity of central control or synchronization.**
- **Information** to and from the MENEHUNE in THE ALOHA SYSTEM is **transmitted in the form of "packets"**, where each packet corresponds to a single message in the system [8]. Packets will have a fixed length of 80 8-bit character plus 32 bits identification and control bits and 32 parity bits; thus each packet will consist of 704 bits and will last for 29 milliseconds at a data rate of 24,000 baud. (...)

ALOHA Puro (1)

Utilizador



- Cada estação transmite a trama assim que a mesma é gerada
- Caso o receptor “escute” mais que uma transmissão - **colisão**
- A indicação do sucesso é efectuado por ACKs (num canal diferente)
- Não gera uma trama nova enquanto a anterior não tem sucesso

GRANDEZAS FUNDAMENTAIS:

T - tempo de trama

N - tramas novas por tempo de trama ($0 < N < 1$)

G - (tramas novas + retransmitidas) por tempo de trama

S - (tramas tx. c/ sucesso) por tempo de trama

RELACÕES FUNDAMENTAIS:

$G \geq N$ (carga baixa $G \approx N$)

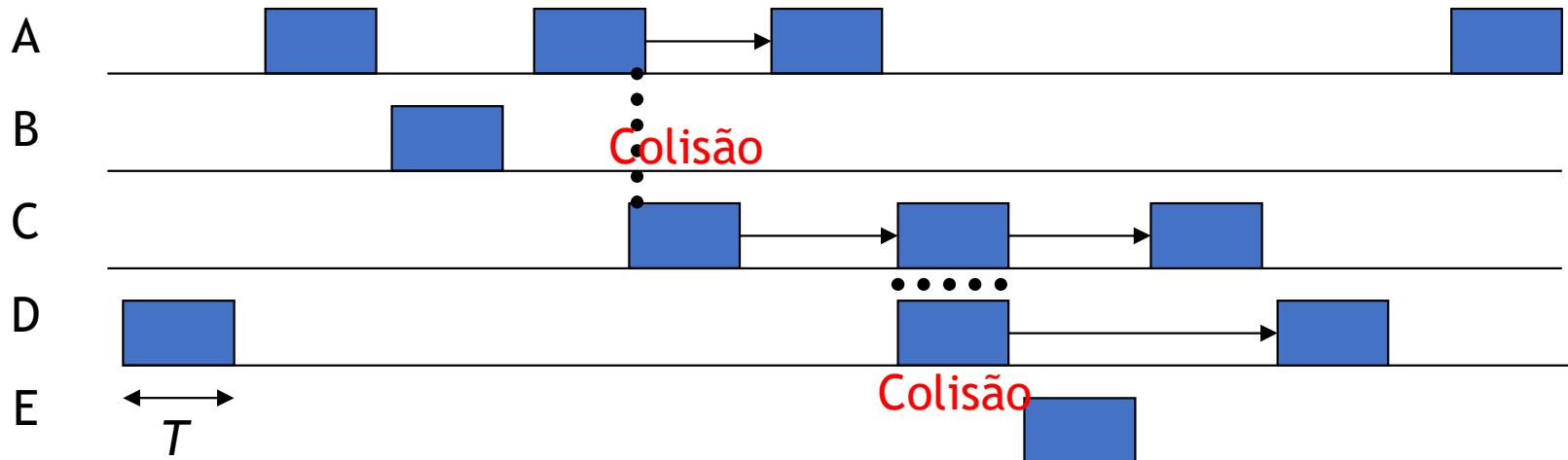
$N = S$ (em equilíbrio)

Desempenho $S = G \cdot P_0$

P_0 - Prob. {trama tx. com sucesso}

ALOHA Puro (2)

Utilizador



Processo de Poisson com taxa de ocorrências λ_G

k - número de tramas em Δt

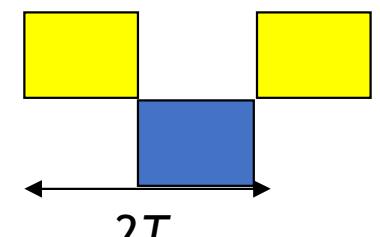
$$\Pr[k, \Delta t] = \frac{(\lambda_G \cdot \Delta t)^k e^{-(\lambda_G \cdot \Delta t)}}{k!}$$

$$\Pr[k, 2T] = \frac{(2G)^k e^{-(2G)}}{k!}, \quad G = \lambda_G \cdot T$$

$$P_0 = \Pr[0, 2T] = e^{-2G}$$

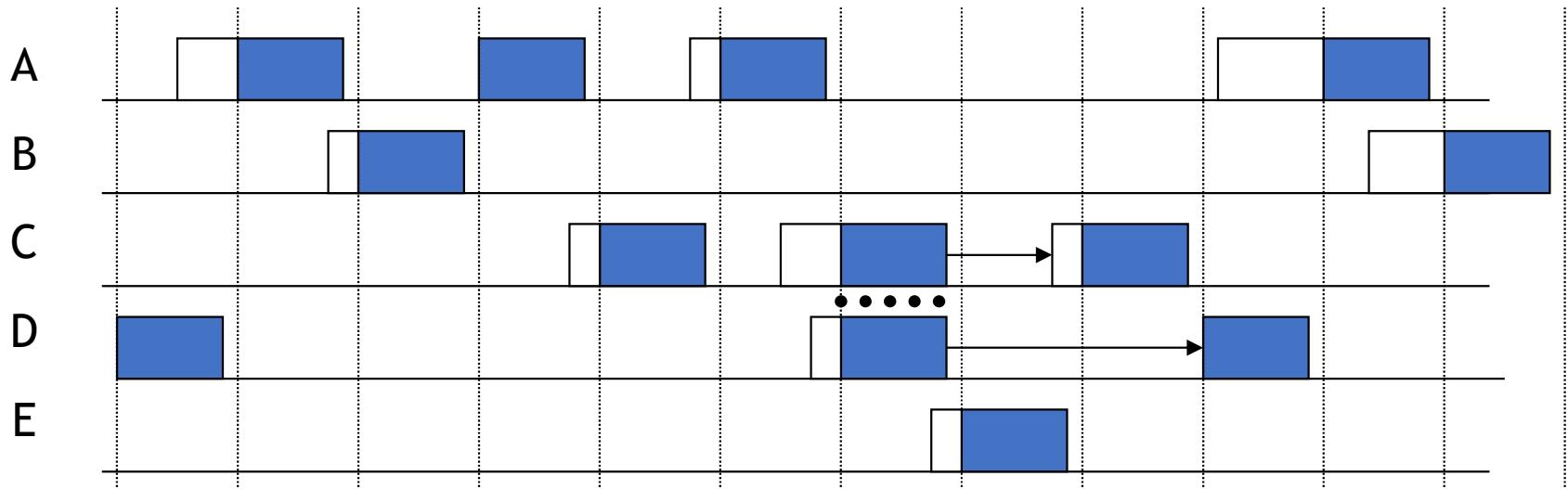
CÁLCULO DO DESEMPENHO (S):

- Uma trama sofre colisão se alguém gerar outra trama no intervalo de tempo $2T$
- Probabilidade de não gerar tráfego no período de vulnerabilidade é dada por: $P_0 = e^{-2G}$
- O desempenho virá $S = G \cdot e^{-2G}$ (período de vulnerabilidade)



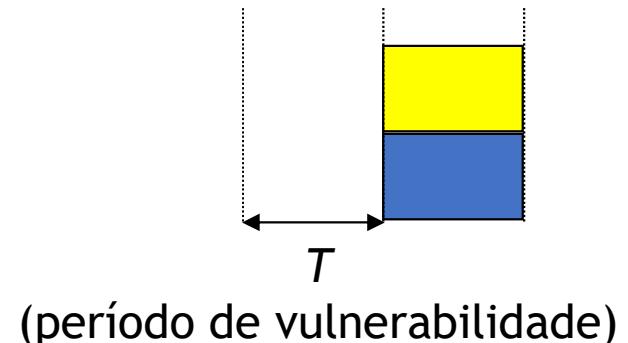
Slotted ALOHA

Utilizador



CÁLCULO DO DESEMPENHO (S):

- Agora o período de vulnerabilidade passou para metade, i.e., T
- Uma trama sofre colisão se alguém gerar outra trama no intervalo de tempo T
- Probabilidade de não gerar tráfego no período de vulnerabilidade é dada por: $P_0 = e^{-G}$
- O desempenho virá $S = G \cdot e^{-G}$

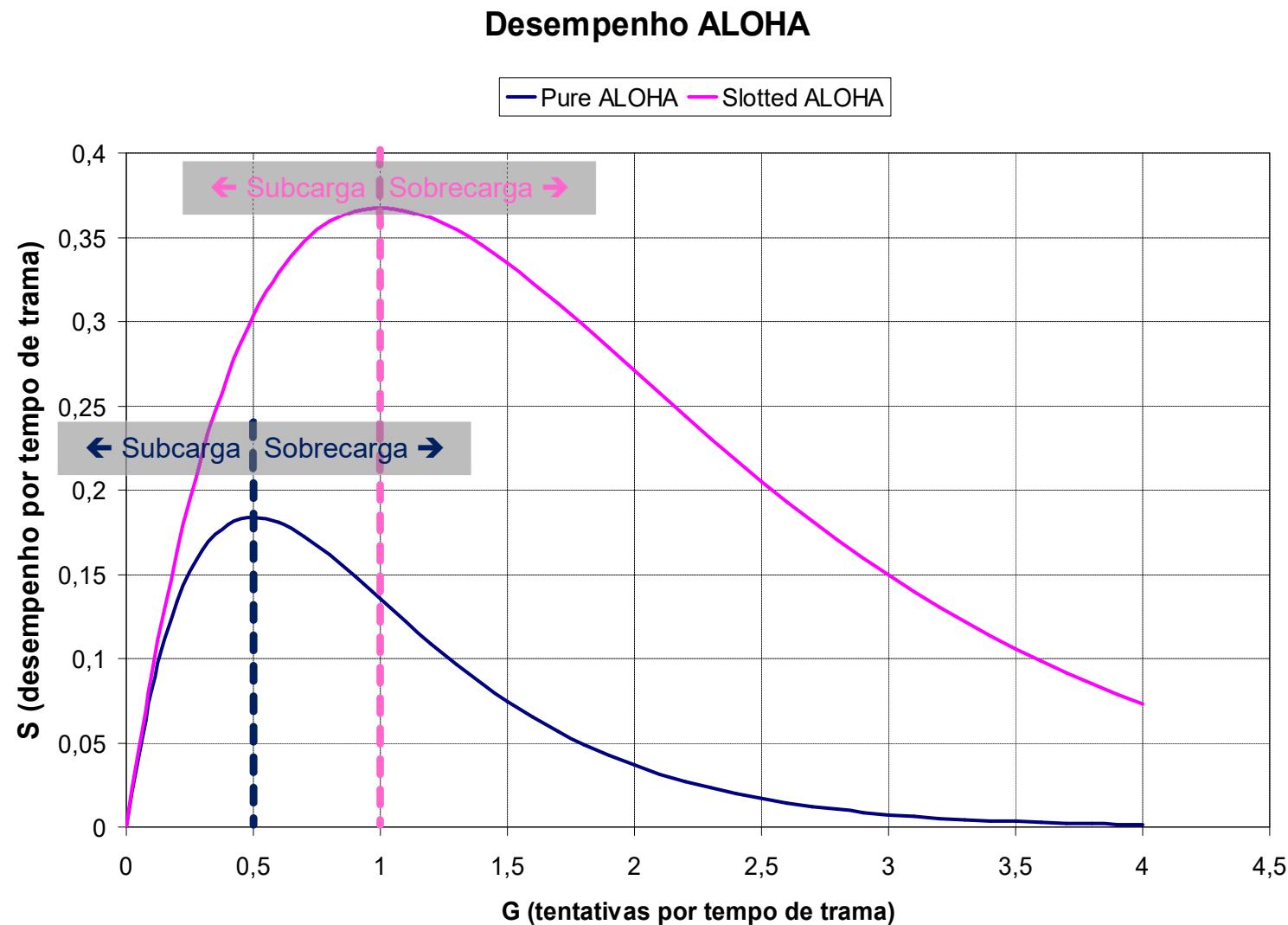


Desempenho versus Tráfego (1)

	Prob. Tx c/ Sucesso (P_0)	Desempenho (S)	Número médio de Tx por trama (#Tx)
ALOHA Puro	e^{-2G}	Ge^{-2G}	e^{2G}
Slotted ALOHA	e^{-G}	Ge^{-G}	e^G

- Prob. de não haver colisão: P_0
- Prob. de haver colisão: $1 - P_0$
- Prob. de uma trama ser transmitida k vezes: $P_k = P_0(1 - P_0)^{k-1}$
- Número médio de transmissões: $E[\#Tx] = \sum_{k=1}^{+\infty} kP_k = \sum_{k=1}^{+\infty} kP_0(1 - P_0)^{k-1} = \frac{1}{P_0}$

Desempenho versus Tráfego (2)



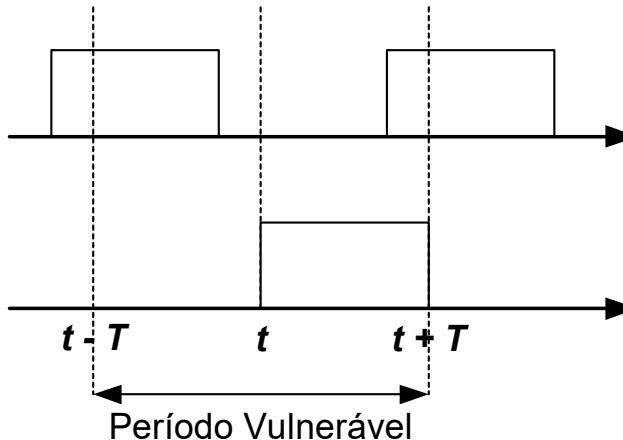
Exercício 3.10

Considere que possui um sistema com 1000 fontes binárias que partilham um canal de acordo com o protocolo Aloha puro e cujo débito binário é $R_b = 10 \text{ kbit/s}$. Considere ainda que as fontes produzem tramas de 100 bits de comprimento.

- a) Calcule qual o tempo vulnerável de colisão para estas tramas neste sistema.
- b) Considere agora que o sistema se encontra a funcionar de tal forma que 10% das tramas oferecidas ao canal sofrem colisão.
 - i) Qual a carga (tráfego) oferecido ao canal?
 - ii) Qual o tráfego (carga) produzido pelo conjunto de todas as fontes? E por cada fonte individual (expresso em tramas por duração de trama e em tramas por segundo) ?
 - iii) Qual o número médio de transmissões efectuadas para cada trama?
 - iv) O sistema encontra-se em subcarga ou sobrecarga?

$n = 1000$ (nº de fontes), $R_b = 10$ Kbps, $L = 100$ (comprimento das tramas)

a) Período vulnerável do ALOHA:



$$\text{Período vulnerável} = 2T = 2 \frac{L}{r_b} = 2 \frac{100}{10 \times 10^3} = 20 \times 10^{-3} = 20 \text{ ms}$$

b) i) Carga oferecida ao canal = G

$$\begin{aligned} P_{\text{colisão}} &= 0.1 = P(\text{de 1 ou mais estações transmitirem durante o período vulnerável de uma trama}) = \\ &= 1 - P(\text{de nenhuma estação transmitir durante o período vulnerável de uma trama}) = 1 - P_0 = 1 - e^{-2G} \end{aligned}$$

$$P_0 = P(\text{de nenhuma estação transmitir durante o período vulnerável de uma trama}) = e^{-2G}$$

Ficamos com a equação $1 - e^{-2G} = 0.1$. Resolvendo em ordem a G resulta que $G = 5.26 \times 10^{-2}$ tramas por T

ii) tráfego produzido = N em equilíbrio N=S

$$S = Ge^{-2G} = 4.74 \times 10^{-2} \text{ tramas por T}$$

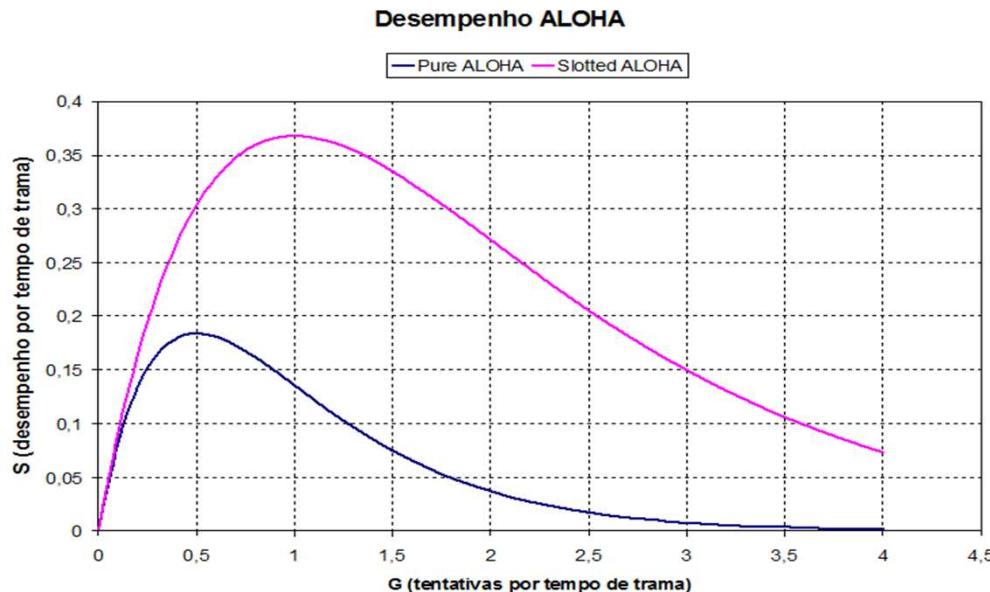
$$\text{Logo } N = 4.74 \times 10^{-2} \text{ tramas por T}$$

O tráfego gerado por cada fonte é $N_i = \frac{4.74 \times 10^{-2}}{1000} = 4.74 \times 10^{-5}$ tramas por T

Em tramas por segundo o tráfego gerado por cada fonte é $\frac{N_i}{T} = \frac{4.74 \times 10^{-5}}{10 \times 10^{-3}} = 4.74 \times 10^{-3}$ tramas por segundo

iii) $N_T = e^{2G} = 1.11$ transmissões por trama

iv) O sistema encontra-se em subcarga porque o valor de G ($G = 5.26 \times 10^{-2}$ tramas por T) é inferior a 0.5 tramas por T.



Exercício 3.11

Suponha que um sistema utiliza o Aloha sincronizado (slotted) como método de acesso ao meio partilhado. Considere que as estações produzem em média 100 bit/s e que partilham um canal com um ritmo binário $R_b = 64$ kbit/s.

- Qual o número máximo de fontes que se consegue multiplexar e qual a taxa de utilização do meio nessa situação? (*Para simplificar utilize a aproximação para um número infinito de fontes e diga qual a relevância desta hipótese*).
- Na situação de utilização máxima qual a probabilidade de uma trama oferecida ao canal sofrer colisão?

- a) Considera-se que o $T_{tx} = \frac{100}{64K} = 1.5625\text{ms}$ e sabe-se que cada fonte produz 100 bit/s.

Logo podemos calular o tráfego produzido por cada fonte em tramas por T (N_i):

$$N_i = 1.5625 \times 10^{-3} \text{ tramas por T}$$

Em equilibrio $N = S$, logo o nº máximo de fontes que se consegue multiplexar é obtido na situação do desempenho máximo, que no ALOHA sincronizado é $S_{\max} = 0.368$ tramas por T .

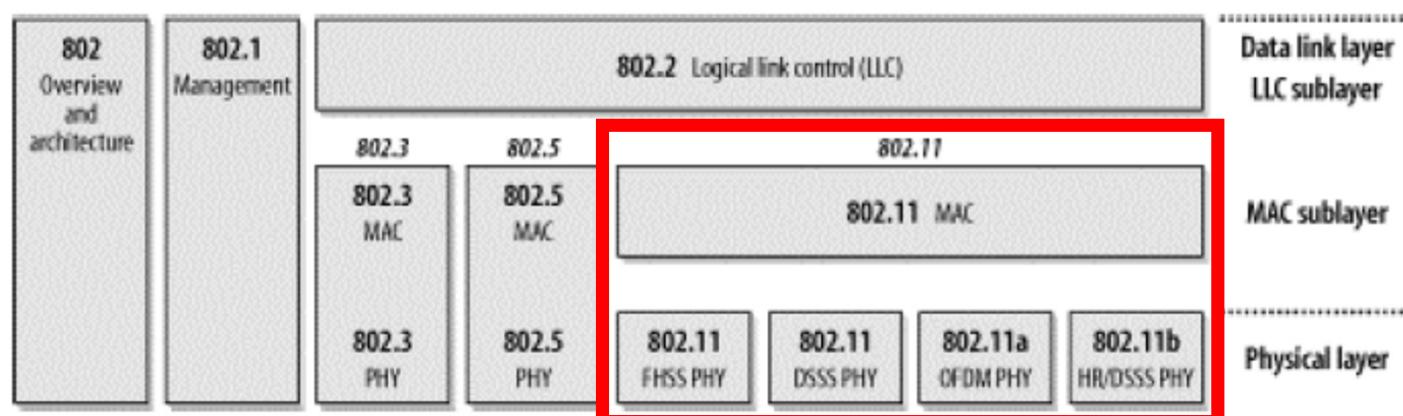
$$\text{Assim } N = nN_i \Leftrightarrow n = \left\lfloor \frac{0.368}{1.5625 \times 10^{-3}} \right\rfloor = 235 \text{ estações}$$

- b) O sistema está a trabalhar em $S_{\max} = 0.368$ tramas por T o que corresponde a um $G = 1$ trama por T .

$$\text{Assim, } P_{\text{colisão}} = 1 - P_0 = 1 - e^{-G} = 0.632.$$

Redes sem Fios

- Redes locais sem fios (Wireless LANs) / IEEE 802.11
 - Introdução
 - Evolução da norma
 - Protocolos e camadas da norma IEEE 802.11
 - O nível físico (PHY)
 - O sub-nível de acesso ao meio (MAC)
 - Arquitetura e serviços
 - Protocolo do sub-nível MAC
 - Tipos de tramas
 - IEEE 802.11n e evolução futura



Redes locais sem fios (Wireless LANs)

- Introdução -

- Motivação:

- Permitir o acesso sem fios de computadores portáteis à Internet em aeroportos, edifícios de escritórios, hotéis, centros comerciais, universidades, etc

- Norma IEEE 802.11 (WiFi):

- Dois tipos de redes:

- (1) Rede com infraestrutura (*Infrastructure*) - tipicamente com estação Base (Access Point - AP)

- (2) Rede independente (*Independent*) - redes ad-hoc

- Compatibilidade com a *Ethernet* acima do nível de ligação de dados

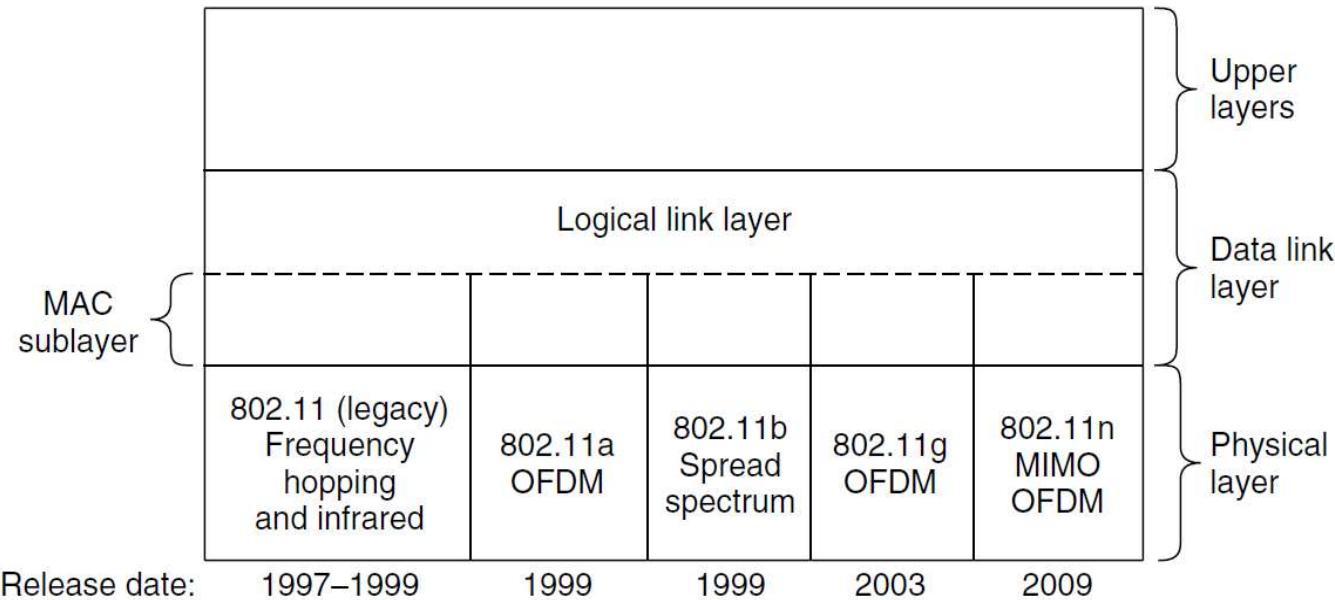
- Diferenças para a *Ethernet* no nível físico e no nível de ligação de dados

- O sinal rádio não se propaga a toda a rede => problema da estação escondida e da estação exposta
- Desvanecimento multipercorso (*multipath fading*)
- Mudança de estação base por parte das estações móveis (i.e. handover, handoff)
- As tramas de dados são confirmadas através do envio de tramas de ACK

Evolução da Norma IEEE 802.11

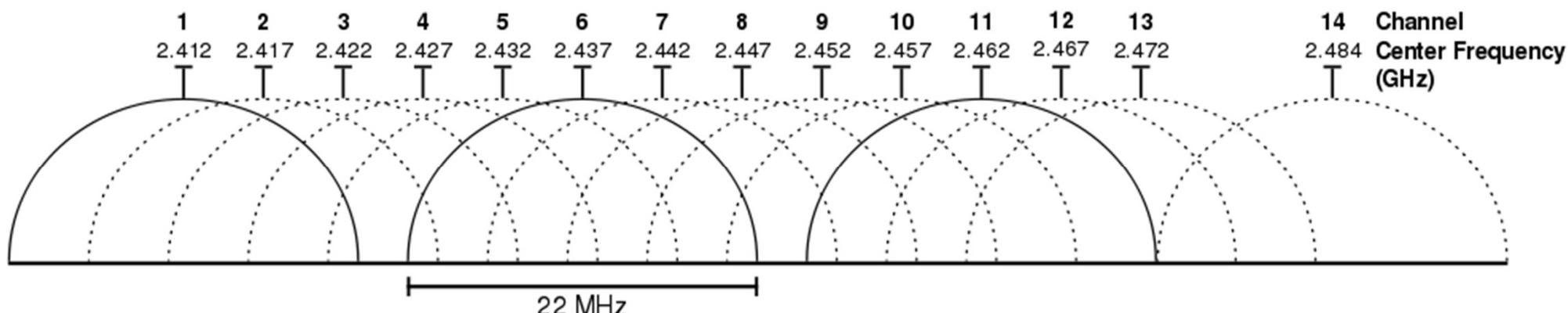
Norma	Frequência (GHz)	Data Rate Máximo (Mbps)	Alcance (interior/exterior em m)
802.11 (1997)	2,4	2	20/100
802.11a (1999)	5	54	35/120
802.11b (1999)	2,4	11	38/140
802.11g (2003)	2,4	54	38/140
802.11n (2008)	2,4/5	72-600	70/250
802.11ac WiFi 5 (2014)	5	433-6933	35/-
802.11ax WiFi 6 (2019)	2,4/5	574-9608	30/120

Protocolos e camadas da norma IEEE 802.11



- O nível físico (PHY) tem considerado cinco técnicas de transmissão:
 - Infravermelho: 1 e 2 Mbps (usa a tecnologia dos controlos remotos de TV)
 - FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum): 1 e 2 Mbps (banda 2.4 GHz ISM)
 - DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum): 1 e 2 Mbps (banda 2.4 GHz ISM)
 - **OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing): max. 54 Mbps (banda 5 GHz ISM)**
 - HR-DSSS (High Rate Direct Sequence Spread Spectrum): max. 11 Mbps (banda 2.4 GHz ISM)

IEEE 802.11: Canais e Frequências (2.4 GHz)



Congestion Analysis

Congestion (current channel)

Channel	In-network	Other networks
6	Green bar	Yellow bar

Congestion (all channels)

Channel	Congestion (Wi-Fi)	Interference (non-Wi-Fi)
1	Red bar	Yellow bar
2	Yellow bar	Yellow bar
3	Yellow bar	Yellow bar
4	Green bar	Yellow bar
5	Yellow bar	Red bar
6	Yellow bar	Red bar
7	Red bar	Red bar
8	Green bar	Red bar
9	Green bar	Red bar
10	Yellow bar	Red bar
11	Yellow bar	Red bar
12	Yellow bar	Red bar

Recommended channel: 4 Change Channel

Interference Source: Noisy environment

Detected type: Noisy environment

Enable auto interference detection

Buttons: Freeze, Close

DW WLAN Card Utility

File Adapter View Help

Link Status Statistics Site Monitor Diagnostics Information

Select networks to be monitored:

Type	Network Name	Security	802.11	Speed	Channel	Signal
WPS	DLink-EFDE95	Open	bgn	54	6	Green bar
WPS	MEO	Open	bgn	130	6	Green bar
WPS	ZON-4C30	Open	bgn	130	12	Green bar
WPS	FON_ZON_FREE_INTER...	Open	bgn	130	3	Green bar
WPS	PT-WIFI	Open	bgn	130	6	Green bar
WPS	SPIDERMAN	Open	bgn	130	3	Green bar
WPS	Ninanet	Open	bgn	300	6	Yellow bar
WPS	Vodafone-87EF42	Open	bgn	130	1	Yellow bar
WPS	FON_ZON_FREE_INTER...	Open	bgn	130	12	Yellow bar

Selected network

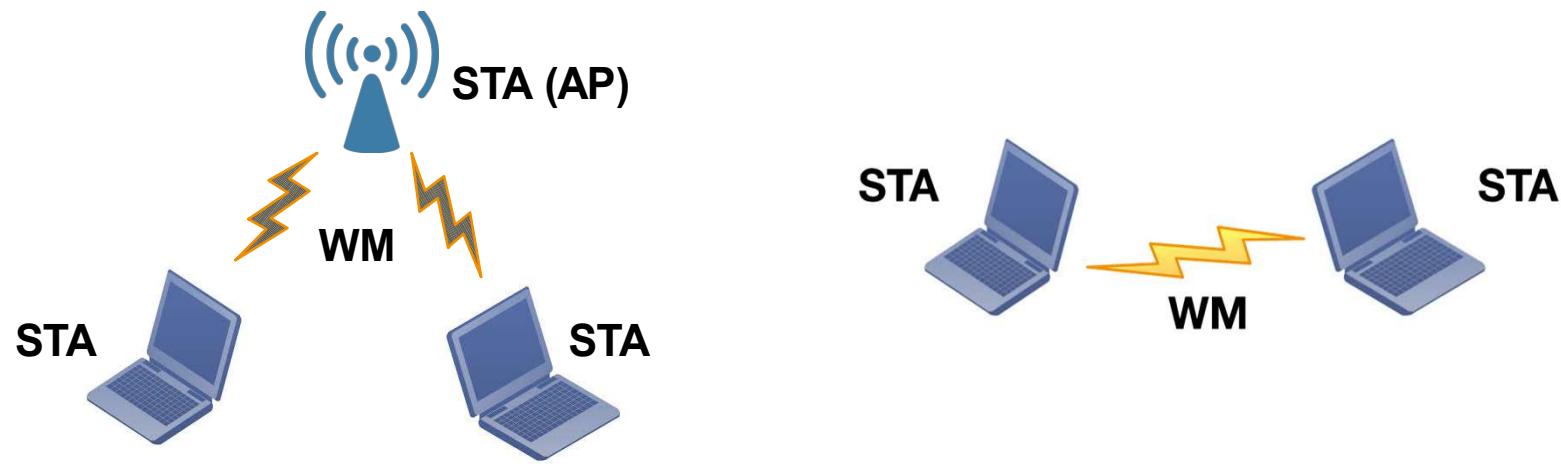
Mode:
Network address:
Data encryption:

Ready

Buttons: Close

Sub-nível de acesso ao meio (MAC)

Arquitectura (1)

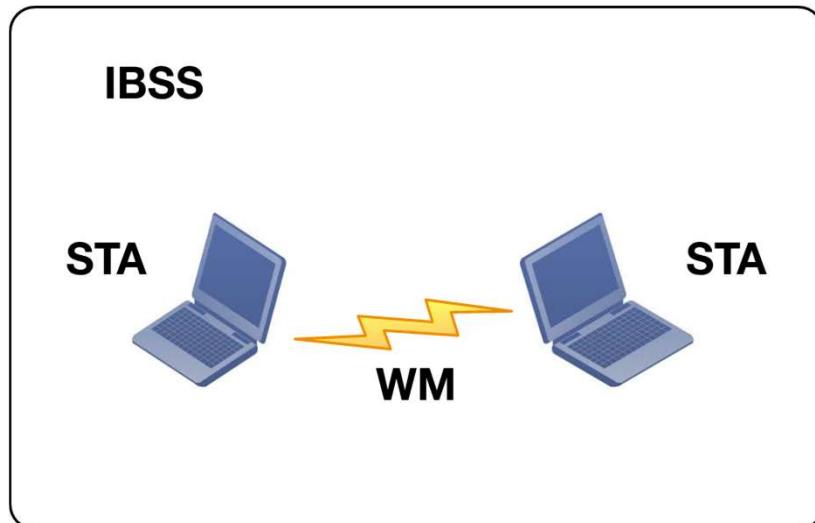
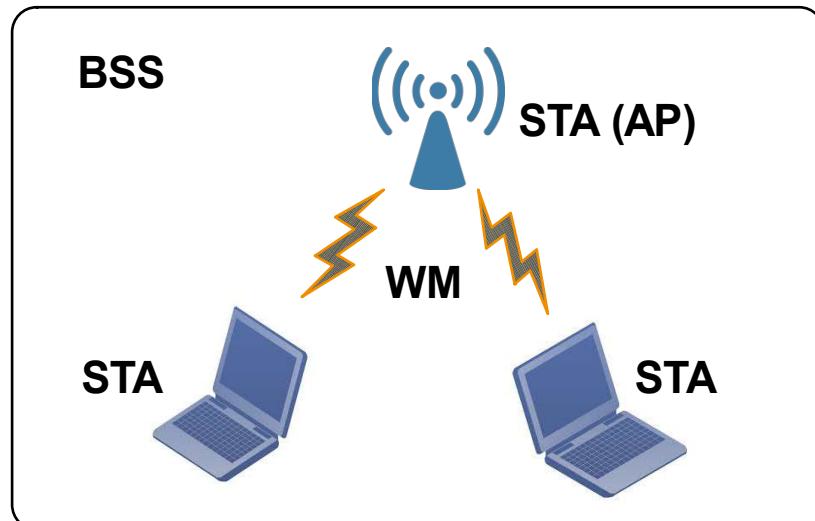


WM (Wireless Medium) - Meio sem-fios.

STA (Station) - Estação.

Dispositivo que usa os protocolos PHY e MAC da norma 802.11 para aceder ao meio sem-fios. Terminais e pontos de acesso (Access Point - AP)

Arquitectura (2)



- **BSS - (Basic Service Set)**

Conjunto de STAs que partilham as mesmas características para acesso ao meio sem fios (e.g., canal) e são controlados por uma mesma função de coordenação (*CF - Coordination Function*).

- **Dois tipos de BSS:**

- Infrastructure-mode BSS.**

Possuem um ponto de redistribuição (tipicamente um *Access Point - AP*).

Parâmetros de acesso ao meio definidos pelo AP.

- Independent BSS (IBSS).**

STAs trocam MSDUs directamente.

Parâmetros de acesso ao meio definidos pelo primeiro STA no IBSS.

- **BSSID**

Conjunto de 48 bits que identifica o BSS.

Arquitectura (3)

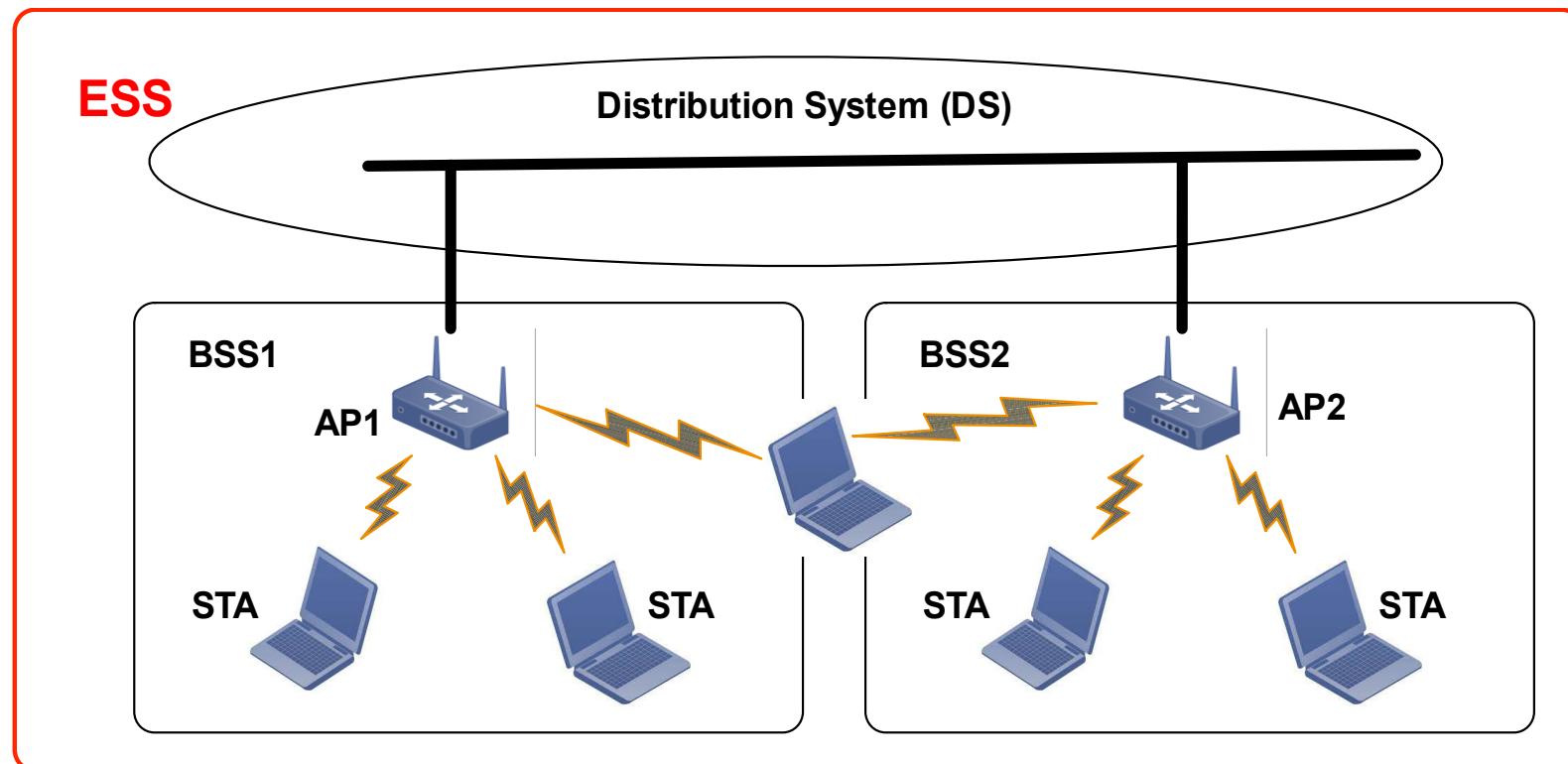
ESS - (Extended Service Set)

Conjunto de duas ou mais BSS interligadas através de um sistema de distribuição (*Distribution System - DS*).

Um ESS é logicamente uma mesma rede (e.g., VLAN, subrede IP).

O meio usado pelo DS (tipicamente 802.3) pode ser diferente do meio do(s) BSS (sem fios).

Estações podem fazer *seamless handoff* entre BSS no mesmo ESS.



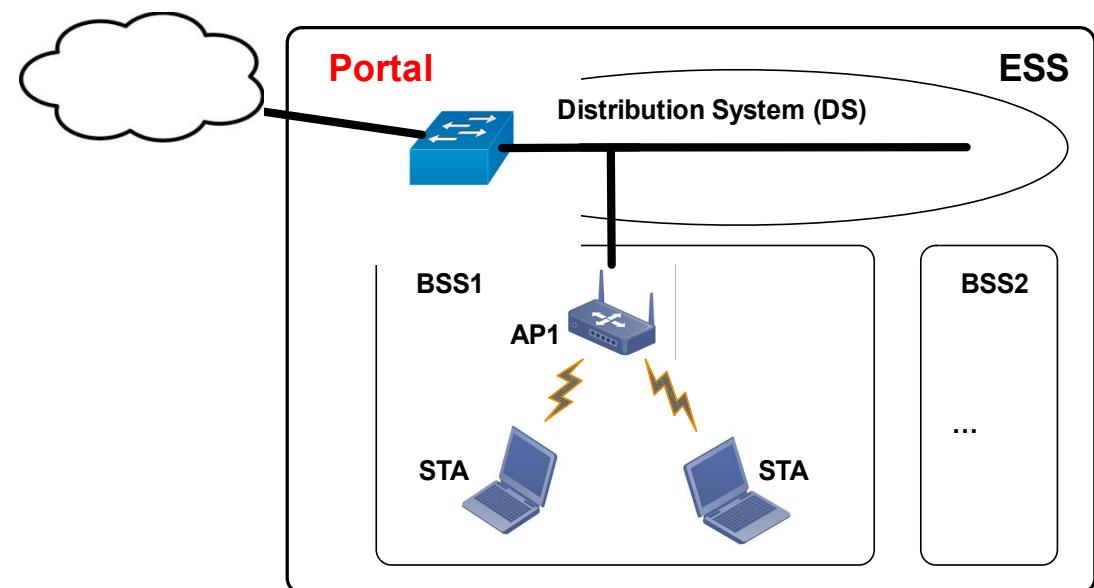
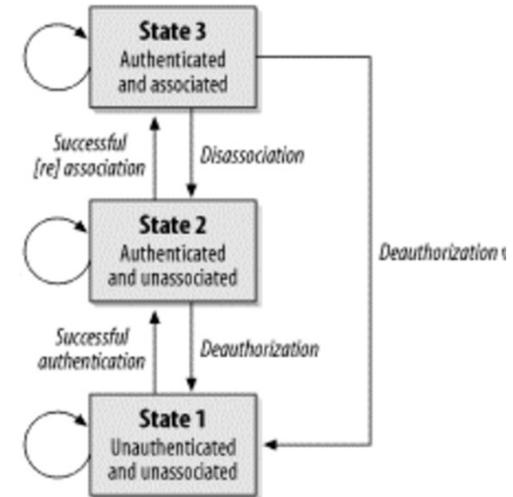
Serviços

- ***Station Services***

- Entrega de MSDUs.
- Segurança: privacidade, autenticação/(de)autenticação.
- ...

- ***Distribution System Services***

- Não disponíveis nos *Independent BSS*.
- Associação/(Re)associação/(De)associação.
- Integração (entrega de MSDUs entre outras redes locais não 802.11).
Realizado através de um *portal* (tipicamente o mesmo equipamento que o AP.)



Protocolo do sub-nível MAC (1)

Funções de coordenação

A norma IEEE 802.11 suporta dois tipos de função de coordenação:

a) *Point Coordination Function* (PCF).

Acesso determinístico ao canal pois é controlado centralmente pelo Ponto de Acesso (AP). Permite garantias de qualidade de serviço (QoS). Normalmente esta função não está disponível nas estações.

b) *Distributed Coordination Function* (DCF).

Acesso ao canal controlado numa forma distribuída e com contenção. Esta função está sempre disponível em todas as estações e normalmente usa um AP - *Infrastructure* BSS. No modo *Infrastructure* BSS é o AP que controla as estações que fazem parte do BSS, embora o acesso ao canal esteja sujeito a contenção. Todas as transmissões neste modo passam pelo AP.

Protocolo do sub-nível MAC (2)

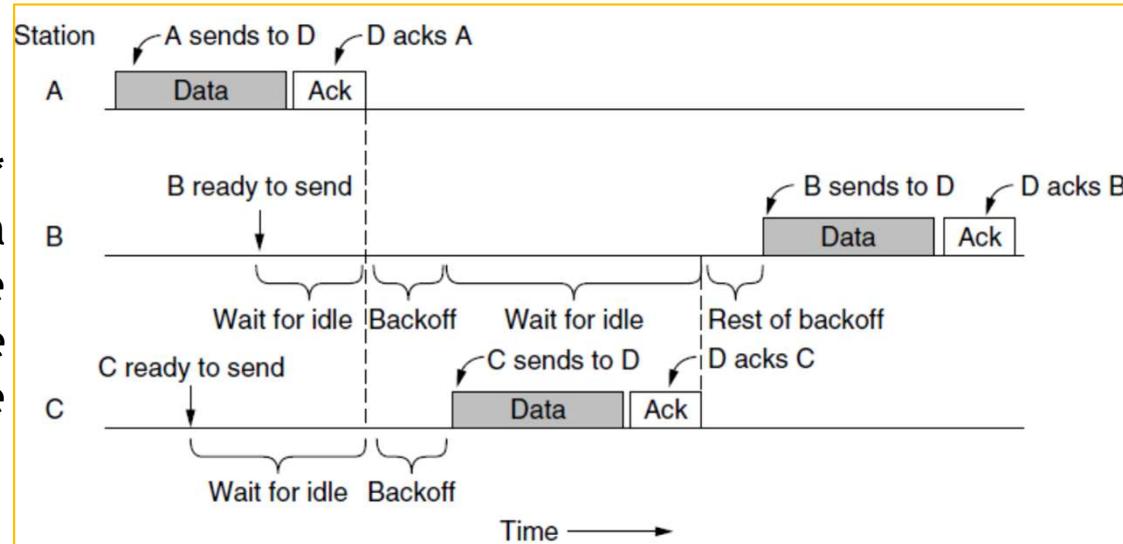
Protocolo CSMA/CA (CSMA with colision avoidance)

- Quando a função de coordenação DCF é utilizada, a norma IEEE 802.11 usa o protocolo CSMA/CA

O CSMA/CA baseia-se na:

- Escuta física do canal*

A estação escuta o canal, se estiver livre* transmite; enquanto transmite não escuta o canal; se estiver ocupado, espera até que fique livre e depois começa um período de *backoff*, quando acabar o período de *backoff* transmite a trama



- Escuta virtual do canal*

Cada estação guarda um registo da utilização do canal através da monitorização do NAV (*Network Allocation Vector*). Cada trama transporta um campo NAV (campo duração das tramas 802.11) que contém a duração da sequência da qual esta trama faz parte. As estações que ouvem este campo irão saber que o canal irá estar ocupado durante esse período e portanto não irão transmitir nesse período. Por exemplo, o NAV de uma trama de dados inclui o tempo para ser enviado o respectivo ACK.

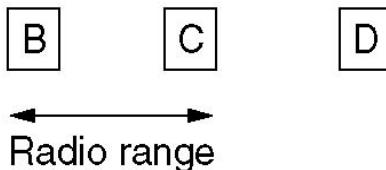
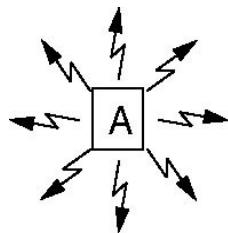
Protocolo do sub-nível MAC (3)

Problemas nas redes 802.11

- Problema da estação escondida e estação exposta
- Falta de fiabilidade
- Gestão de energia
- Qualidade de serviço

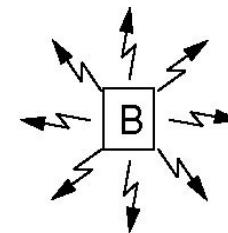
Protocolo do sub-nível MAC (4)

Problema da estação escondida e estação exposta



(a)

• Protocolo do sub-nível MAC



(b)

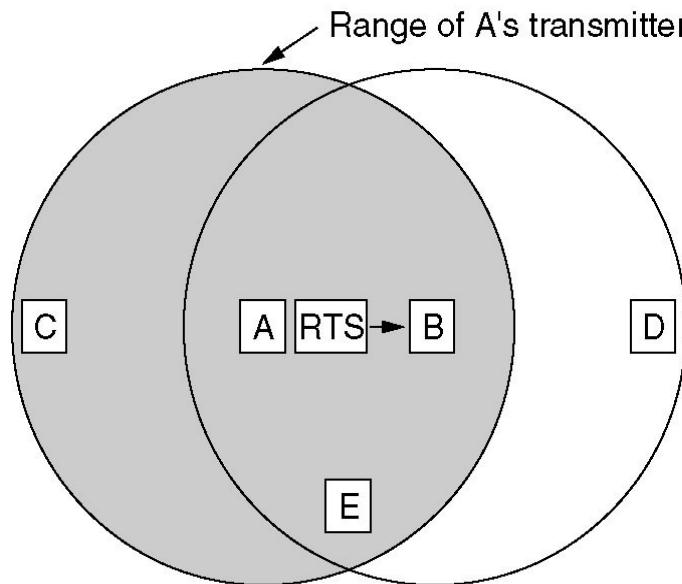
Problema da estação escondida

- A limitação colocada pelo alcance radio (*Radio range*) impossibilita a detecção colisões.
- Como resolver estes problemas ? Utilização do mecanismo de transmissão RTS/CTS (*Request to send / Clear to send*).

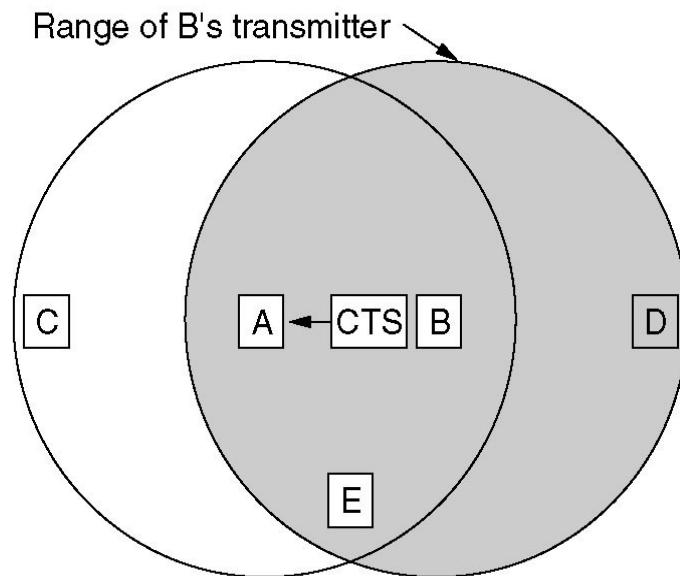
Problema da estação exposta

Protocolo do sub-nível MAC (5)

Procedimento de transmissão RTS/CTS (*Request to send / Clear to send*)



(a)



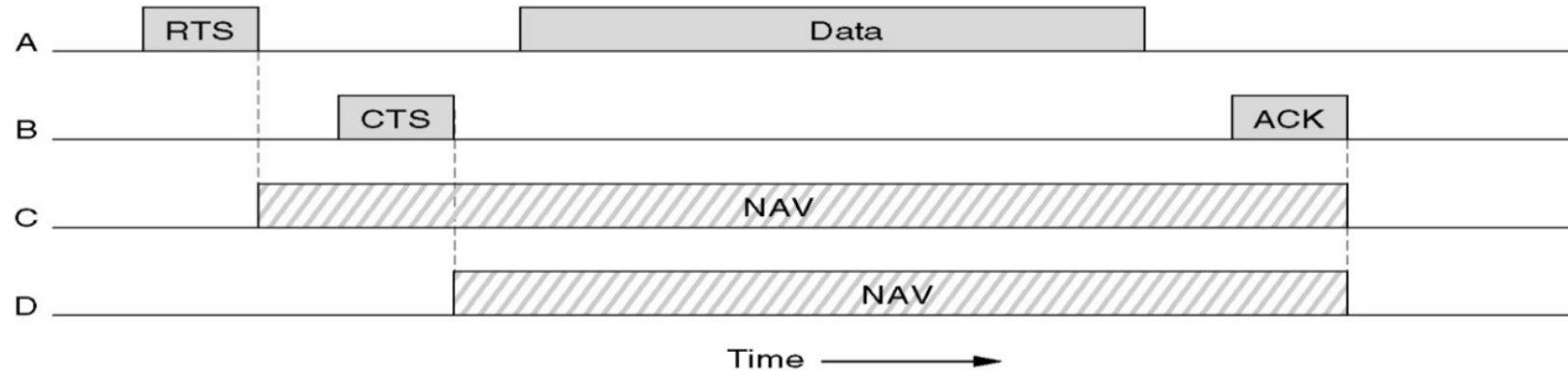
(b)

RTS - *Request To Send*
CTS - *Clear To Send*

Típicamente é usado
apenas para tramas com
comprimentos elevados

Protocolo do sub-nível MAC (6)

Exemplo da utilização do NAV com RTS/CTS

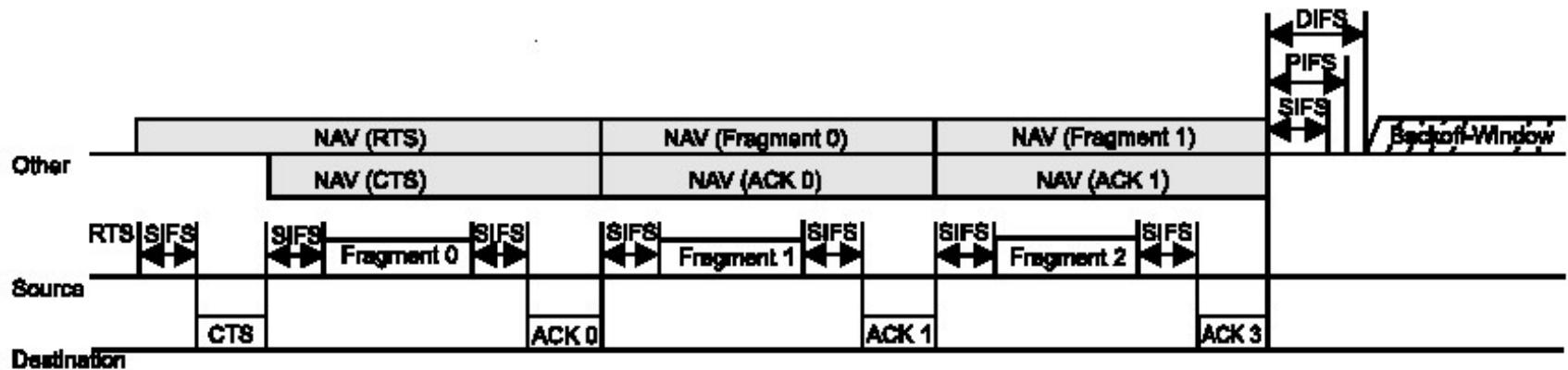


NAV (Network Allocation Vector) - Reserva canal para transmitir trama de dados e o respectivo ACK, utilizando RTS/CTS. Devido às mensagens adicionais RTS/CTS, este *handshake* deve ser utilizado preferencialmente em cenários com muitas colisões e tramas de tamanho adequado.

Protocolo do sub-nível MAC (7)

Falta de fiabilidade

- Problema:
 - As redes sem fios são ruidosas e não fiáveis => probabilidade de uma transmissão com sucesso diminui com o tamanho da trama
- Solução:
 - A norma IEEE 802.11 permite que as tramas sejam fragmentadas. Estes fragmentos são devidamente identificados e confirmados através de um protocolo *Stop and Wait*



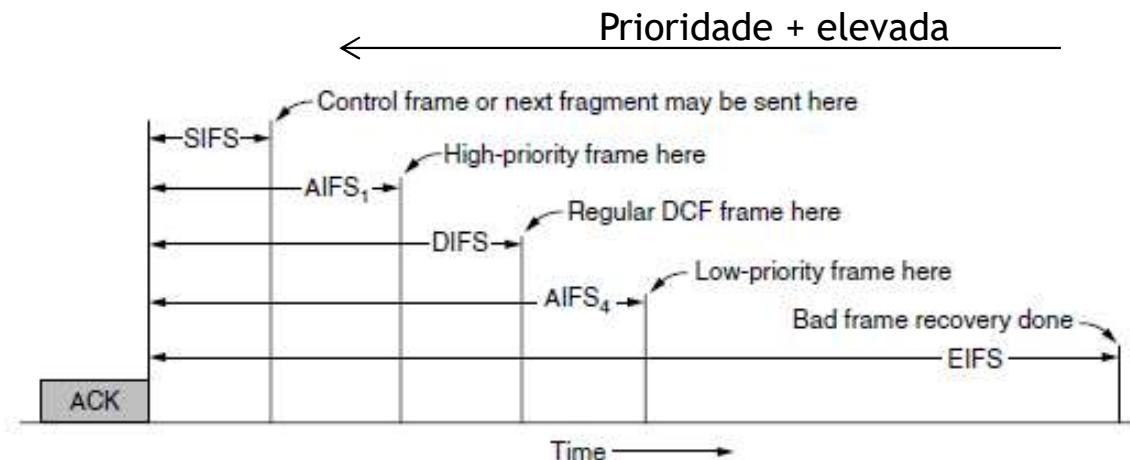
- A fragmentação permite aumentar o débito através da restrição das retransmissões apenas aos fragmentos com erro e não à trama inteira
- O NAV mantém as outras estações em silêncio apenas até ao próximo ACK. Existe um outro mecanismo que permite o envio de todos os fragmentos (*fragment burst*) sem interferência (ver próximo slide - SIFS)

Protocolo do sub-nível MAC (8)

Qualidade de serviço

- A norma IEEE 802.11 tem um mecanismo que permite oferecer qualidade de serviço. Este mecanismo baseia-se na definição dos intervalos de tempo entre tramas - depois de uma trama ter sido enviada existe um intervalo de tempo sem transmissões que as estações têm que esperar até que possam tentar aceder ao canal. Esse intervalo de tempo varia consoante o tipo de trama.

SIFS - *Short InterFrame Spacing*
AIFS - *Arbitration InterFrame Spacing*
DIFS - *DCF InterFrame Spacing*
EIFS - *Extended InterFrame Spacing*

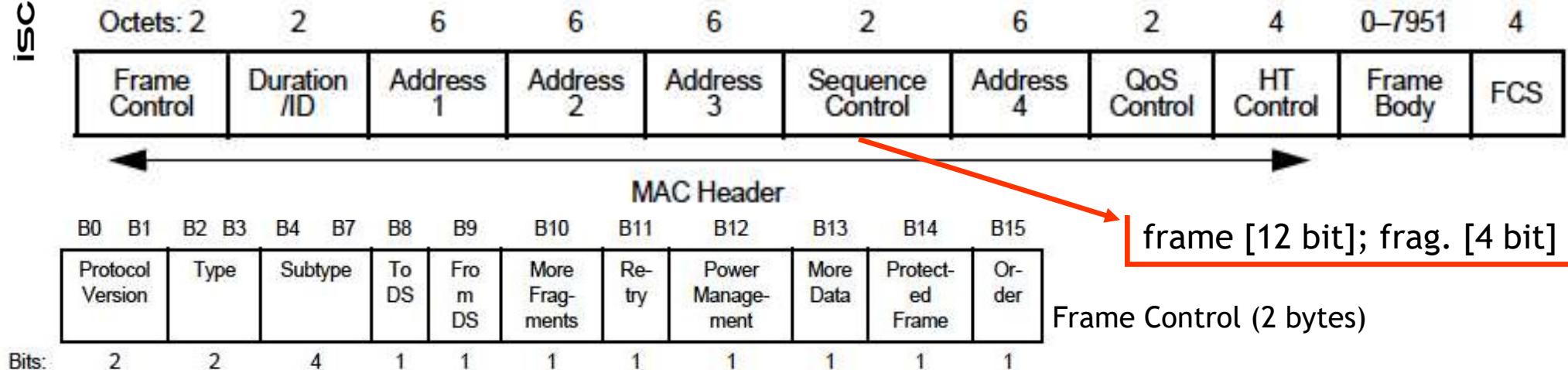


- Exemplo: o DIFS é usado para enviar dados em situações normais. Qualquer estação pode tentar adquirir o canal depois de detectar que o canal está livre durante DIFS. O SIFS é usado, por exemplo, para enviar tramas de controlo, e.g. ACK.

Tipos de tramas

- A norma IEEE 802.11 define três tipos de tramas:
 - Dados
 - Controlo (e.g. RTS, CTS, ACK (só para unicast))
 - Gestão (e.g. *Beacon*, Associação)
- Utilização das tramas numa rede 802.11 com infraestrutura no modo DCF:
 - AP envia tramas de *Beacon* (trama de gestão) periodicamente
 - As estações autenticam-se e associam-se através do AP usando tramas de gestão
 - As estações trocam dados entre si usando tramas de dados, que são sempre confirmados através de ACK (trama de controlo)

Trama de dados



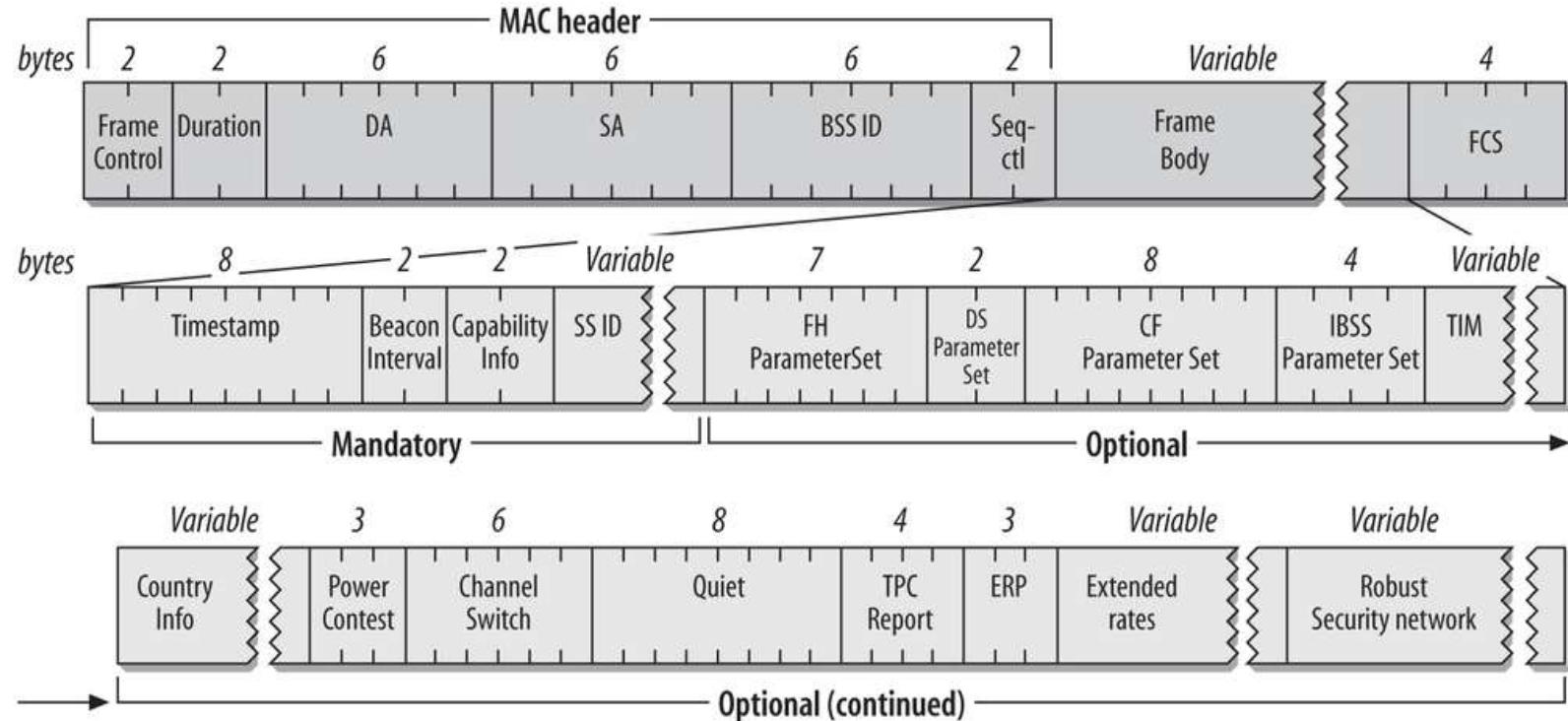
- Existem quatro campos de endereço:

- Endereço de destino
- Endereço de origem
- Endereço da estação transmissora
- Endereço da estação receptora

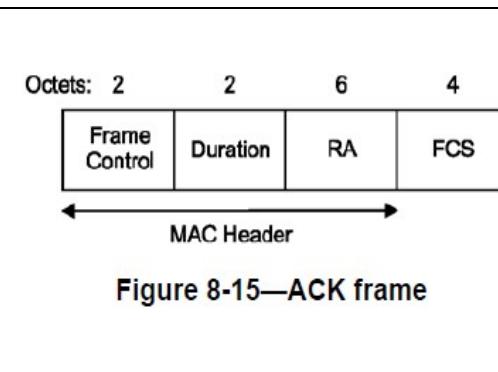
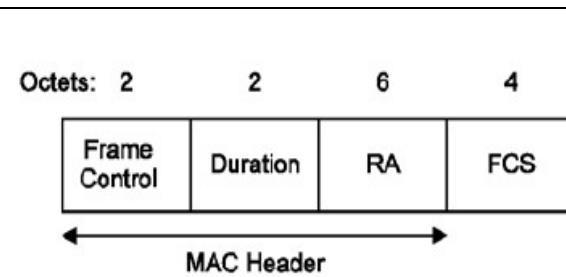
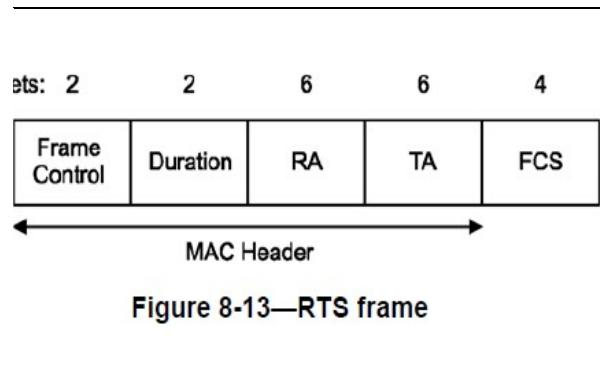
To DS	- To Distribution System
From DS	- From Distribution System
MF	- More Fragments
Retry	- Retransmission
Pwr	- Power-save mode (0-active; 1-power-save)
More	- Additional Frames
O	- Strictly Ordered

Tramas de gestão e controlo

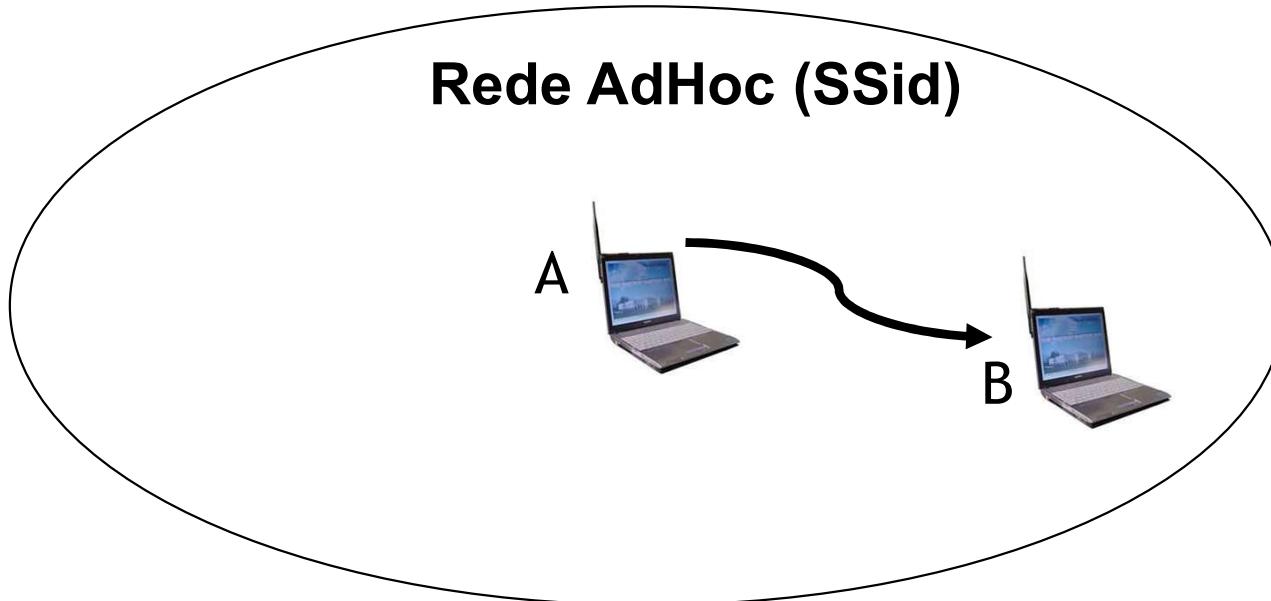
Exemplo: trama de beacon



Formato das tramas controlo (RTS / CTS / ACK)



Endereçamento (1)

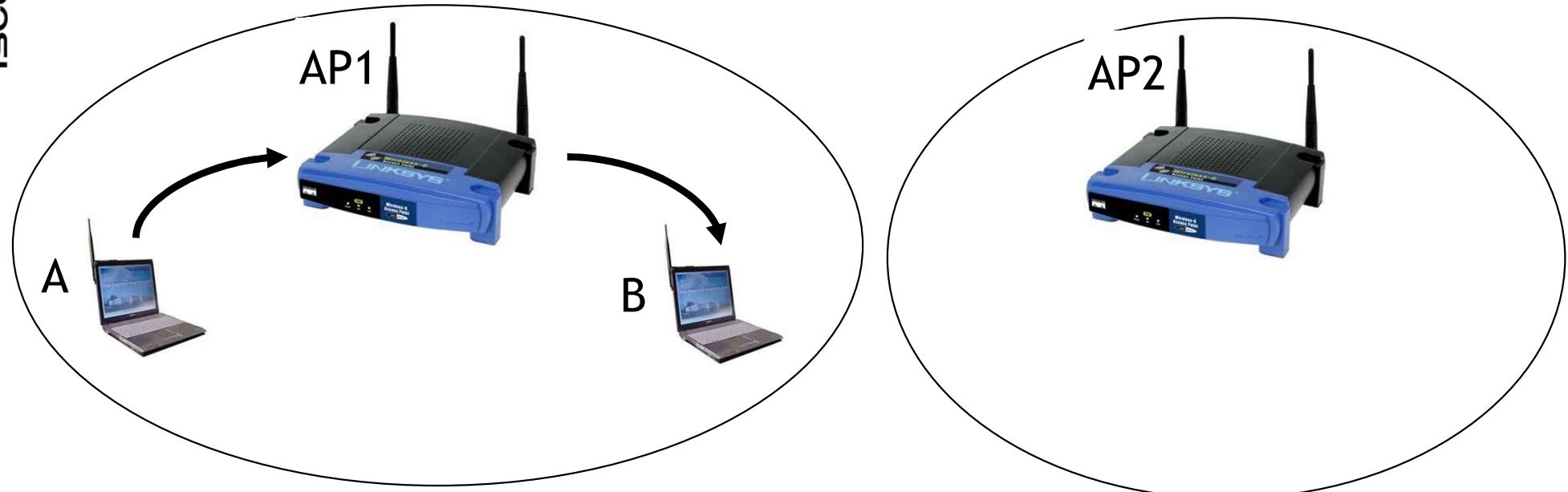


- Comunicação (1 trama) entre duas estações móveis (A e B) pertencentes à mesma rede AdHoc com o identificador SSid (modo DCF).

<i>Tramas Tx</i>		To DS	From DS	A1	A2	A3	A4
$A \rightarrow B$		0	0	DA - Destino (B)	SA - Origem (A)	BSSID	-

SA - Source Address; DA - Destination Address

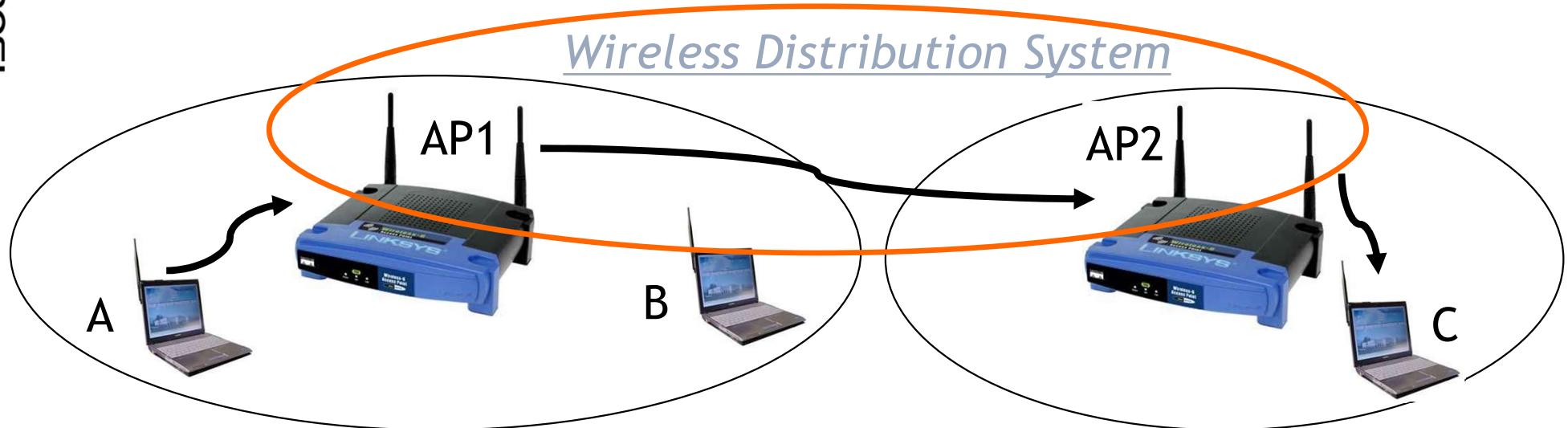
Endereçamento (2)



- Comunicação (2 tramas) entre duas estações móveis (A e B) pertencentes à mesma rede 802.11 (e.g. AP1) do tipo infraestrutura (modo DCF)

Tramas Tx.		To DS	From DS	A1	A2	A3	A4
$A \rightarrow AP1$		1	0	RA - AP_Receptor (AP1)	SA - Origem (A)	DA - Destino (B)	-
$AP1 \rightarrow B$		0	1	DA - Destino (B)	TA - AP_Emissor (AP1)	SA - Origem (A)	

Endereçamento (3)



- Comunicação (2 tramas) entre duas estações móveis (A e C) pertencentes BSS diferentes do tipo infraestrutura (modo DCF).
Ambas as estações base pertencem ao mesmo ESS e encontram-se interligadas por um sistema de distribuição (DS) sem fios.

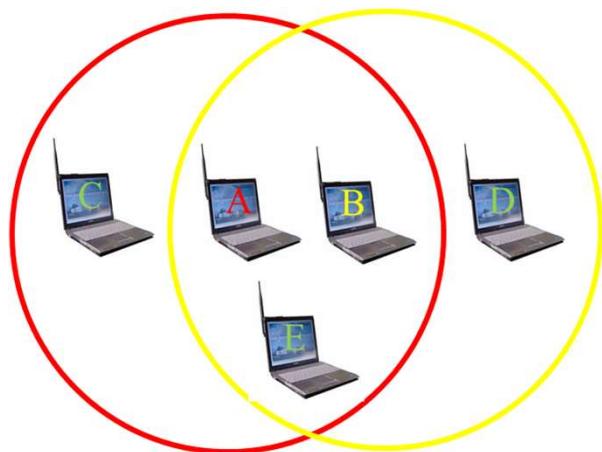
Tramas Tx.	To DS	From DS	A1	A2	A3	A4
A -> AP1	1	0	RA - AP_Receptor (AP1)	SA - Origem (A)	DA - Destino (C)	-
AP1->AP2	1	1	RA - AP_Receptor (AP2)	TA - AP_Emissor (AP1)	DA - Destino (C)	DA - Origem (A)
AP2->C	0	1	DA - Destino (C)	TA - AP_Emissor (AP2)	SA - Origem (A)	

IEEE 802.11n e Evolução Futura

- IEEE 802.11n foi aprovada em Outubro de 2009 como um *amendment* à norma IEEE 802.11-2007, suportando a funcionalidade *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) para o envio de múltiplos *streams* de dados em paralelo (1 a 4):
 - Emissor transmite através de várias antenas (1 a 4)
 - Receptor recebe de várias antenas (1 a 4) e processa os diversos *streams* para atingir os seguintes objectivos:
 - Maximizar o nível de sinal na recepção
 - Aumentar o desempenho na transmissão de dados
 - MAC alterado para agregar tramas e diminuir o *overhead* na comunicação:
 - No acesso ao meio físico (fase de contenda)
 - Informação redundante adicionada aos dados (e.g., cabeçalho, controlo de erros)
- IEEE 802.11ac aprovada em Dezembro de 2013 pretende melhorar o desempenho na transmissão de dados relativamente ao 802.11n, nomeadamente, nos seguintes aspectos:
 - Aumentar de 4 para 8 o número de data streams enviados em paralelo
 - Quadruplicar a largura de banda de cada canal físico

Exercício 3.15

Considere o cenário descrito pela figura (i.e. rede ad-hoc) na qual se pretende enviar dados com um tamanho de 3000 bytes da estação móvel A para a estação móvel B quando ambas usam a norma IEEE 802.11b e estando ambas a funcionar em modo DCF. Consideram-se ainda os seguintes parâmetros:



MAC a 00:00:00:AA:AA:AA

MAC b 00:00:00:BB:BB:BB

SSID 00:11:00:11:00:11

Ritmo binário no canal de transmissão	11 Mbits/s
SIFS	16 µs
DIFS	34 µs
Tamanho máximo dos dados em cada fragmento	2000 bytes
Tempo de propagação	0 seg.

- a) Represente a sequência de tramas (e fragmentos) trocados entre as estações A e B indicando os intervalos de tempo respetivos (a partir do ACK que antecedeu o início do processo de aquisição do canal). Represente ainda os NAV e a forma como foram calculados para as outras estações.
- b) Calcule o ritmo binário útil nesta situação.
- c) Indique para as tramas identificadas na alínea a) os valores para os seguintes campos do cabeçalho (quando aplicável):
- i) ToDS/FromDS e Address (1...4).
 - ii) More fragments (MF).
 - iii) Duration.
 - iv) Sequence Control.
- d) Considerando que a probabilidade de erro de bit (erros independentes) é 10^{-4} calcule o número médio de transmissões dos dados que seriam necessárias caso não se efectuasse fragmentação e no caso em que é efectuada fragmentação. (Despreze os erros em outras tramas que não os fragmentos.)

Formato geral das tramas dados

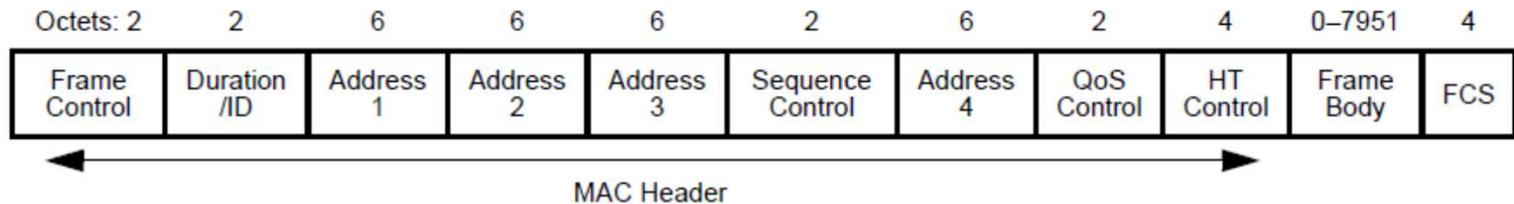


Figure 8-1—MAC frame format

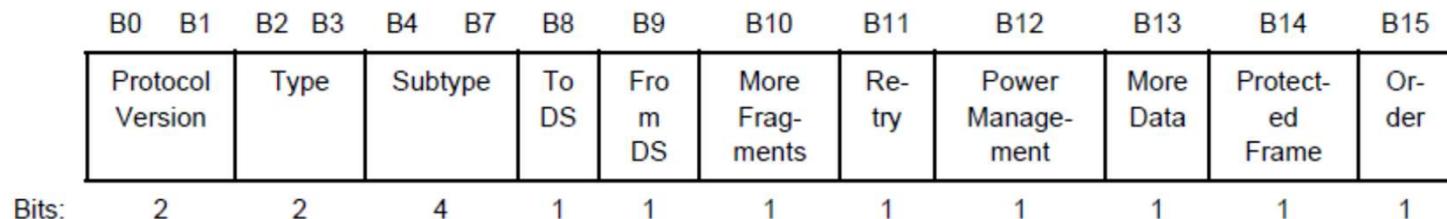
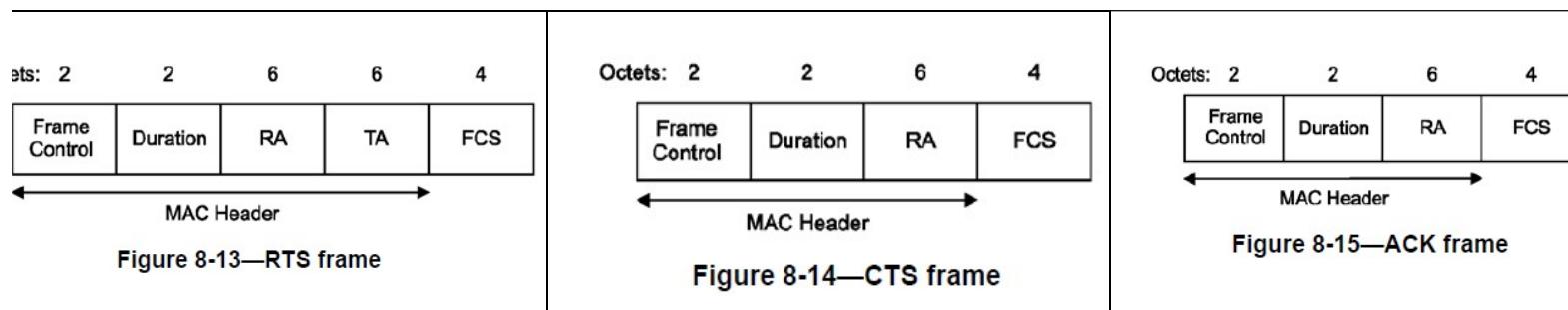
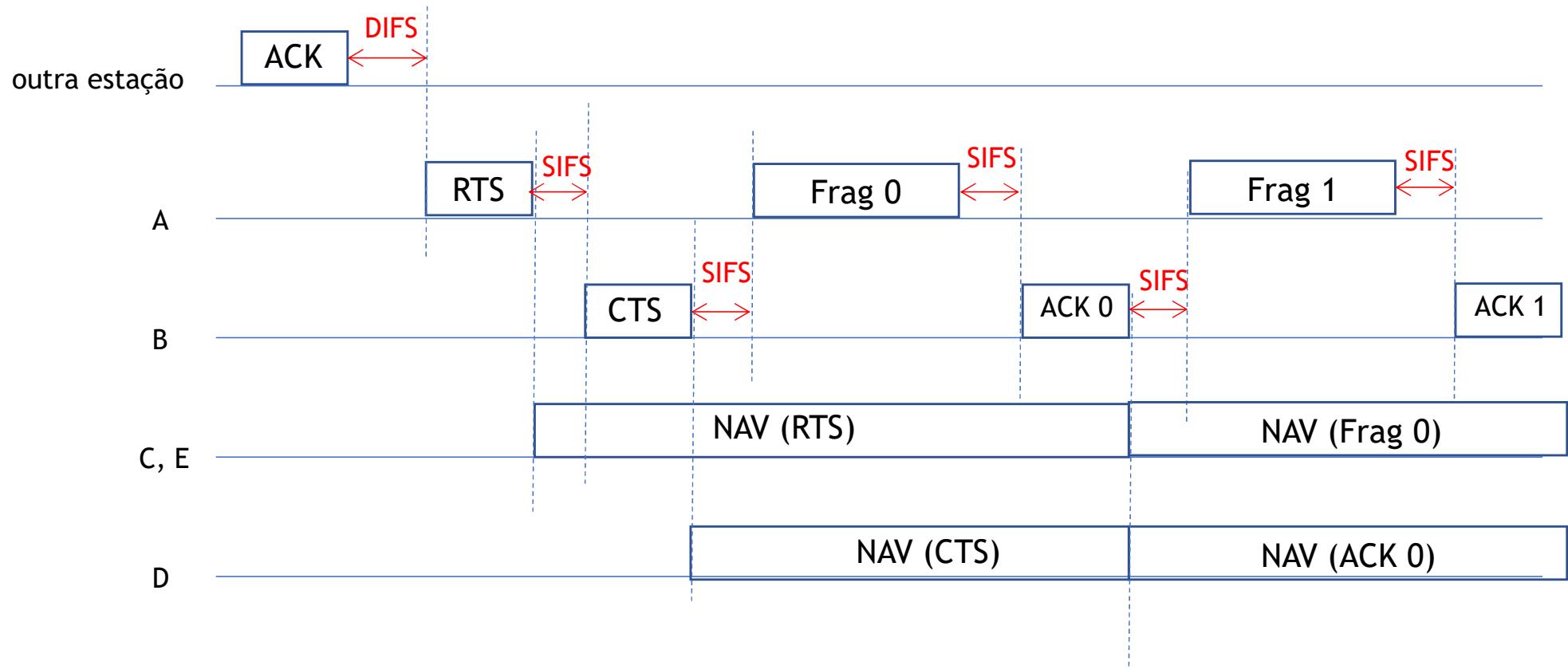


Figure 8-2—Frame Control field

Formato das tramas RTS / CTS / ACK



Exercício 3.15 a)



CP4: Sub-Nível de Acesso ao Meio e Redes Locais(Exercícios)

- Sebenta de Exercícios e Aplicações
 - Capítulo 4
- Questões de provas escritas
 - Ver plataforma *moodle* com provas de anos anteriores.
- Mini-testes
 - Mini-teste para avaliação na plataforma *moodle*.