

PTC 3360 - 2024

3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

(Kurose, Seções 6.1 e 6.3)

(Tanenbaum, Seção Seção 4.2)

Setembro 2025

CAPÍTULO 3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

3.2.1 Particionamento de canal

3.2.2 Acesso Aleatório

A *Slotted* ALOHA

B ALOHA puro

C CSMA

D Exemplos: Ethernet e Wi-Fi

3.2.3 Revezamento

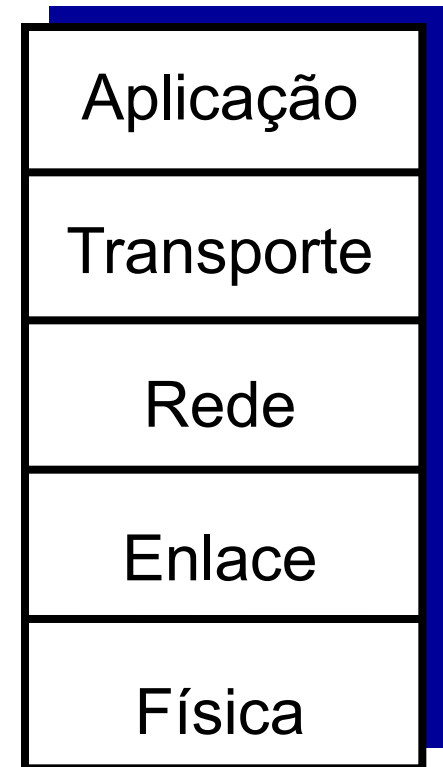
3.3 Endereçamento MAC e *switches*

3.4 Camada física: meios de transmissão

3.5 Rádio Enlaces

Lembrando... Pilha de protocolos Internet

- ❖ **Aplicação:** contendo aplicativos de rede que geram **mensagens**
 - FTP, SMTP, HTTP, DNS, ...
- ❖ **Transporte:** transferência de **segmentos** processo-processo
 - TCP e UDP
- ❖ **Rede:** roteamento de **datagramas** da fonte ao destino
 - IP, protocolos de roteamento
- ❖ **Enlace:** transferência de **quadros** entre **elementos vizinhos** na rede
 - Ethernet, 802.11 (WiFi), DOCSIS, ...
- ❖ **Física:** transmissão física dos **bits**; depende do meio de transmissão

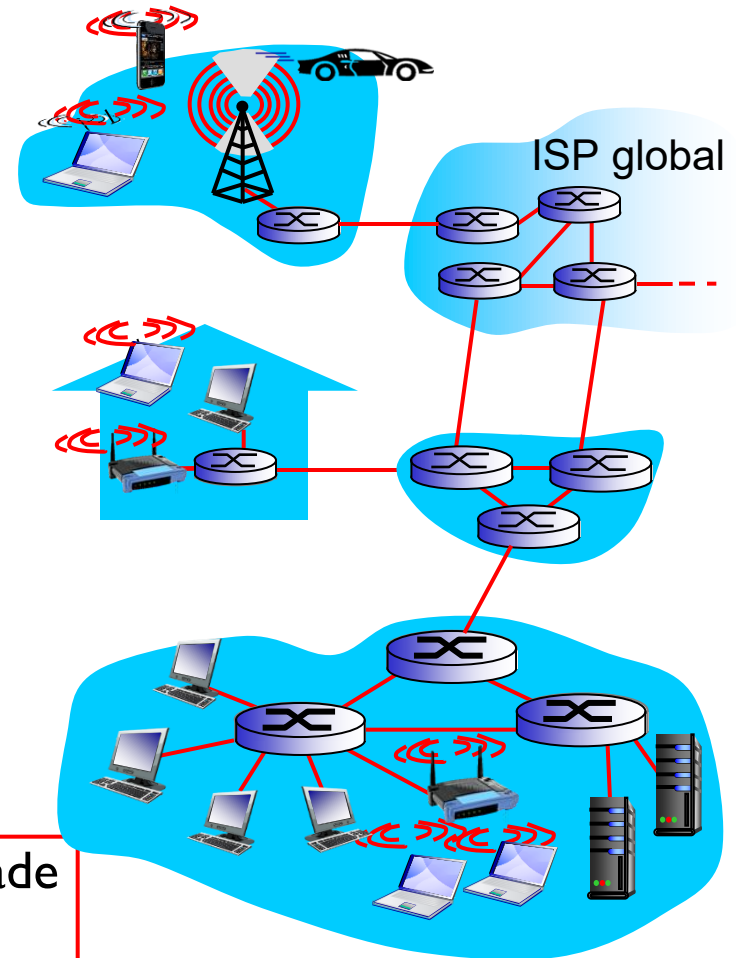


Camada de enlace: introdução

Terminologia:

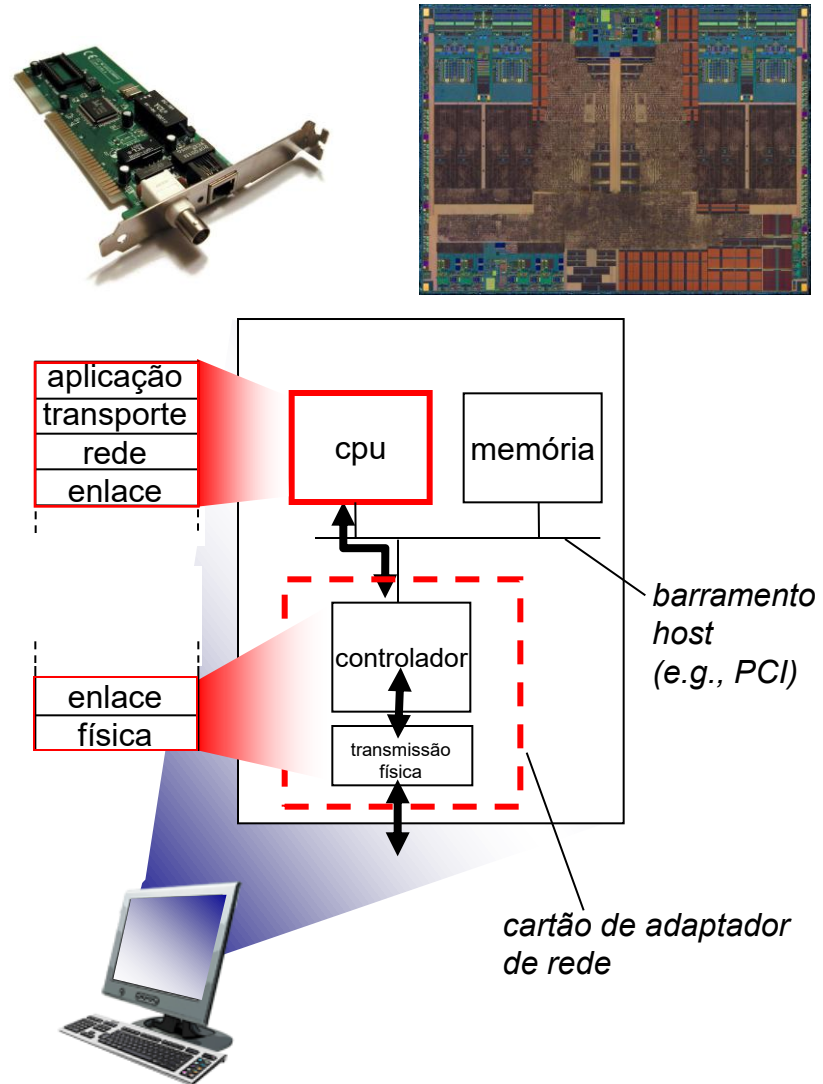
- ❖ **Nós:** dispositivos que rodam protocolos da camada de enlace (camada 2) - hosts, roteadores, switches, pontos de acesso WiFi, etc.
- ❖ **Enlaces:** canais de comunicação que conectam nós adjacentes ao longo do caminho de comunicação
 - ❖ enlaces com fio
 - enlaces sem fios
 - LANs
- ❖ **Quadro:** pacote da camada-2 - encapsula datagrama

Camada de enlace de dados tem a responsabilidade de transferir datagramas de um nó a um nó *fisicamente adjacente* através de um enlace

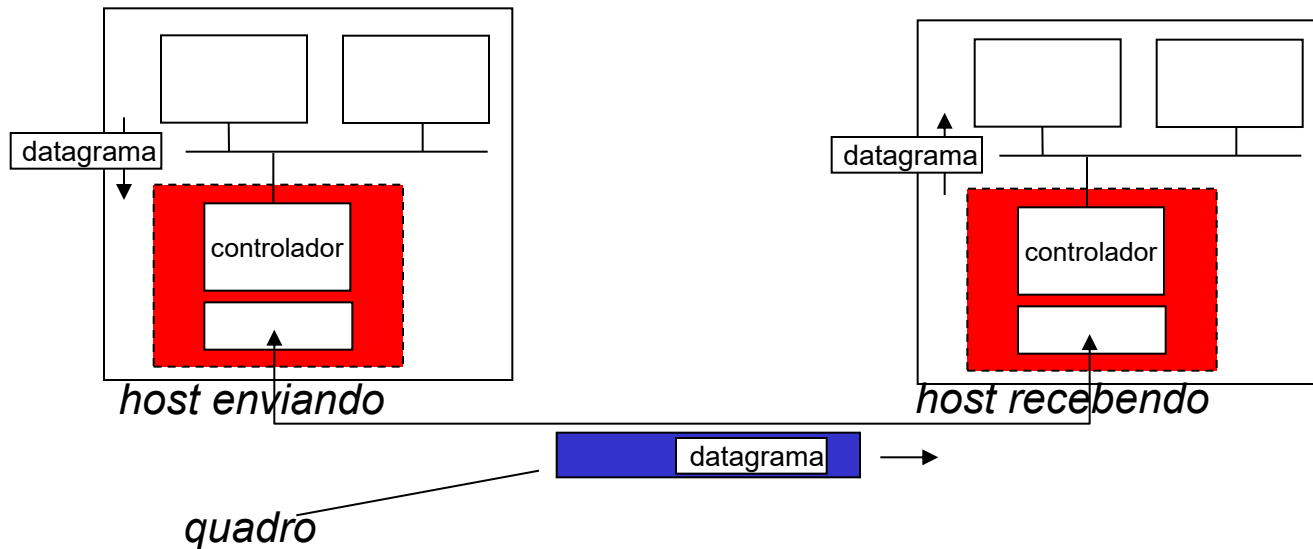


Onde a camada de enlace é implementada?

- ❖ Em cada e todos os *nós*
- ❖ Em *hosts*, camada de enlace implementada em “adaptador” (ou *cartão de interface de rede* NIC) ou na placa-mãe (*on board*)
 - Exemplos: Controlador de interface de rede Ethernet e 802.11 - implementa camadas de enlace e física
 - Exemplo de datasheet
- ❖ Afixa-se no sistema de barramentos do *host*
- ❖ Combinação de *hardware*, *software*, *firmware*



Comunicação entre adaptadores



❖ Lado enviando:

- Encapsula datagrama em quadro
- Adiciona bits verificadores de erro, informações para comunicação confiável (RDT), controle de fluxo, etc.

❖ Lado recebendo:

- Procura por erros, RDT, controle de fluxo, etc
- Extrai datagrama, passa para camada superior no lado recebendo

Principais serviços associados à camada de enlace

❖ *Enquadramento e endereçamento:*

- Encapsulamento do datagrama em quadro, adicionando cabeçalho
- Endereços “MAC” (*Medium Access Control*) usados nos cabeçalhos de quadro para identificar fonte e destino

❖ *Detecção e correção de erro:*

- Erros causados por atenuação do sinal, ruído, interferências.
- Receptor detecta presença de erros e pode tomar várias possíveis providências:
 - Simplesmente descarta quadro
 - Descarta quadro e solicita retransmissão
 - Corrige erro(s) em bit(s) sem necessitar de retransmissão

❖ *Acesso compartilhado ao enlace:*

- Regras para acesso ao canal se o meio é compartilhado

CAPÍTULO 3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

3.2.1 Particionamento de canal

3.2.2 Acesso Aleatório

A *Slotted* ALOHA

B ALOHA puro

C CSMA

D Exemplos: Ethernet e Wi-Fi

3.2.3 Revezamento

3.3 Endereçamento MAC e *switches*

3.4 Camada física: meios de transmissão

3.5 Rádio Enlaces

Enlaces de acceso múltiplo, protocolos

2 tipos de enlaces:

❖ Ponto-a-ponto

- PPP para acesso discado (*dial-up*)
- Enlace ponto a ponto entre *switch* Ethernet e *host*

❖ De difusão ou *broadcast* (meio compartilhado)

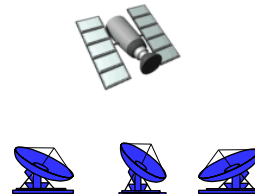
- Ethernet com barramento
- *Upstream* do DOCSIS (Internet por empresa de TV a cabo)
- LAN sem fio 802.11 (Wi-Fi)



cabo compartilhado (e.g., Ethernet cabeada)



RF compartilhada (e.g., 802.11 WiFi)



RF compartilhada (satélite)



pessoas em um coquetel (ar compartilhado, acústico)

Protocolos de acesso múltiplo (MAC)

- ❖ Canal de *broadcast* compartilhado entre os nós
- ❖ Havendo 2 ou mais transmissões simultâneas de nós: **interferência**
 - **Colisão** se nó recebe 2 ou mais quadros ao mesmo tempo
 - Em geral, o nó recebendo não consegue entender nenhum dos dois quadros: perdidos!
 - Canal desperdiçado durante transmissão dos quadros

Protocolo de acesso múltiplo

- ❖ Algoritmo distribuído que determina como nós compartilham canal, isto é, determina quando cada nó transmite
- ❖ Assunto de Telecom estudado a mais de 45 anos para comunicações digitais e com muita atividade ainda!
- ❖ Note que a comunicação sobre compartilhamento do canal precisa usar canal também
 - não há canal *out-of-band* para coordenação

Um protocolo de acesso múltiplo ideal

Dado: canal de difusão *broadcast* com taxa R bits/s por nó

Solução ideal:

1. Quando apenas 1 nó quer transmitir, consegue fazê-lo à taxa R .
2. Quando M nós querem transmitir, cada um pode transmitir à *taxa média* de R/M
3. Totalmente descentralizado:
 - Não há nó especial para coordenar transmissões
 - Não há sincronização de relógios, intervalos
4. Simples e barato de implementar

Protocolos MAC (Medium Access Control) : Taxonomia

3 grandes categorias:

❖ *Particionamento de canal*

- Divide canal em “pedaços” menores (intervalos de tempo, frequência, código)
- Aloca pedaços para nós para uso exclusivo
- Exemplos: TDMA, FDMA
- Telefonia fixa e celular convencional, TV, rádio

❖ *Acesso aleatório*

- Canal não dividido, permite colisões
- “Recupera-se” de colisões
- Wi-fi, DOCSIS

❖ *Revezamento*

- Nós revezam-se na transmissão
- Bluetooth

Ex.: Técnicas MAC e implementações práticas

	Channel access mechanisms	Technology								
		ZigBee	BLE	RFID	WiFi	LTE	NB-IoT ^a (CIoT)	Sigfox	LoRa	Weightless
Contention-based	Pure ALOHA							✓	✓	
	Slotted ALOHA			✓		✓	✓			✓
	Non-slotted CSMA/CA	✓			✓					
	Slotted CSMA/CA	✓								
Schedule-based	Frequency Division Multiple Access				✓	✓	✓			✓
	Time Division Multiple Access		✓							✓
	Code Division Multiple Access						✓		✓	
	Time slot reservation	✓			✓	✓			✓	
Spread spectrum	Frequency Hopping Spread Spectrum		✓							✓
	Direct Sequence Spread Spectrum	✓			✓					✓
	Chirp Spread Spectrum	✓							✓	

■ Retirado de A. Laya *et al.*, “Goodbye, ALOHA”, IEEE Access, 2016

■ Obs.: [BLE](#) – Bluetooth Low Energy; [ZigBee](#) – versão mais avançada do [IEEE 802.15.4](#); [LoRa](#) – Long Range for low-power (LP) WAN; [Sigfox](#) – outro Sistema para LPWAN; [Weightless](#) – mais um padrão para IoT

CAPÍTULO 3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

3.2.1 Particionamento de canal

3.2.2 Acesso Aleatório

A *Slotted* ALOHA

B ALOHA puro

C CSMA

D Exemplos: Ethernet e Wi-Fi

3.2.3 Revezamento

3.3 Endereçamento MAC e *switches*

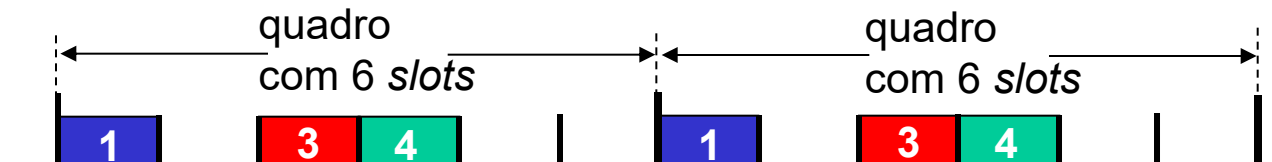
3.4 Camada física: meios de transmissão

3.5 Rádio Enlaces

Protocolos MAC por *particionamento de canal*: TDMA

TDMA: *Time Division Multiple Access*

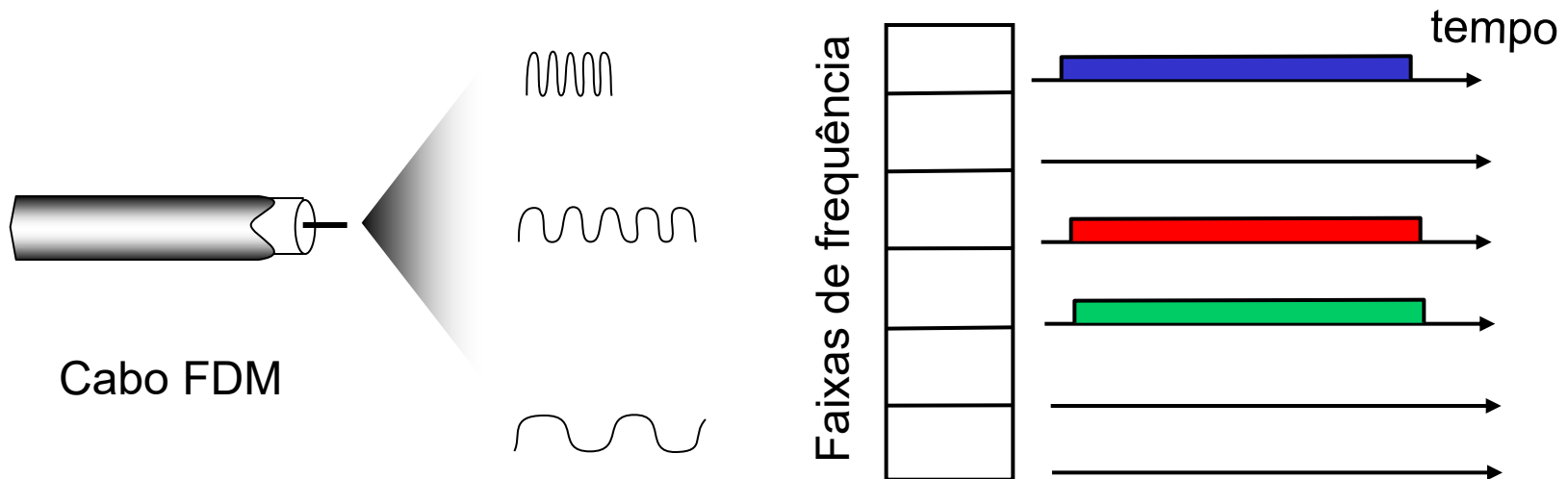
- ❖ Acesso ao canal em “turnos”
- ❖ Cada nó obtém intervalo (*slot*) de tempo de duração fixa (duração = tempo de transmissão de 1 pacote) a cada turno (quadro)
- ❖ *Slots* não usados ficam desocupados
- ❖ Exemplo: LAN com 6 nós, 1,3,4 têm pacotes, *slots* 2,5,6 desocupados



Protocolos MAC por particionamento de canal: FDMA

FDMA: *Frequency Division Multiple Access*

- ❖ Espectro do canal dividido em faixas de frequências
- ❖ A cada nó é designado uma faixa de frequência
- ❖ Faixas de frequência em que não ocorre transmissão ficam desocupadas
- ❖ Exemplo: LAN com 6 nós, 1,3,4 têm pacotes, faixas de frequência 2,5,6 desocupadas



Protocolos MAC por particionamento de canal - Conclusões

- ❖ Quando M nós estão ativos, conseguem transmitir à taxa R/M 😊
- ❖ Interessante, por exemplo, para transmissão de estações de rádio e televisão
- ❖ Quando apenas 1 nó está ativo, transmite à taxa R/M 😞
- ❖ Desperdício de recurso no caso em que os nós transmitem em rajadas ficando muito tempo inativos, caso usual das redes de dados 😞
- ❖ Necessário controle central 😞
- ❖ Não é razoável para redes de dispositivos computacionais. Solução alternativa: *acesso aleatório*

CAPÍTULO 3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

3.2.1 Particionamento de canal

3.2.2 Acesso Aleatório

A *Slotted ALOHA*

B *ALOHA puro*

C *CSMA*

D *Exemplos: Ethernet e Wi-Fi*

3.2.3 Revezamento

3.3 Endereçamento MAC e *switches*

3.4 Camada física: meios de transmissão

3.5 Rádio Enlaces

Protocolos de acesso aleatório

- ❖ Quando nó tem pacote para enviar
 - Transmite à taxa total do canal R bits/s.
 - Não há coordenação *a priori* entre nós.
- ❖ 2 ou mais nós transmitindo → “colisão”!!
- ❖ *Protocolo MAC de acesso aleatório* especifica:
 - Como detectar colisões
 - Como se recuperar de colisões (por exemplo, via retransmissões atrasadas)
- ❖ Exemplos de protocolos MAC de acesso aleatório:
 - *slotted ALOHA*
 - *ALOHA*
 - *Carrier Sense Multiple Access (CSMA), CSMA/CD, CSMA/CA*

CAPÍTULO 3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

3.2.1 Particionamento de canal

3.2.2 Acesso Aleatório

A *Slotted ALOHA*

B ALOHA puro

C CSMA

D Exemplos: Ethernet e Wi-Fi

3.2.3 Revezamento

3.3 Endereçamento MAC e *switches*

3.4 Camada física: meios de transmissão

3.5 Rádio Enlaces

Slotted ALOHA

- Abramson (1932-2020) – Hawaii – 1969
- Additive Links On-line Hawaii Area
- Inspiração inicial para CSMA do Ethernet e Wi-Fi



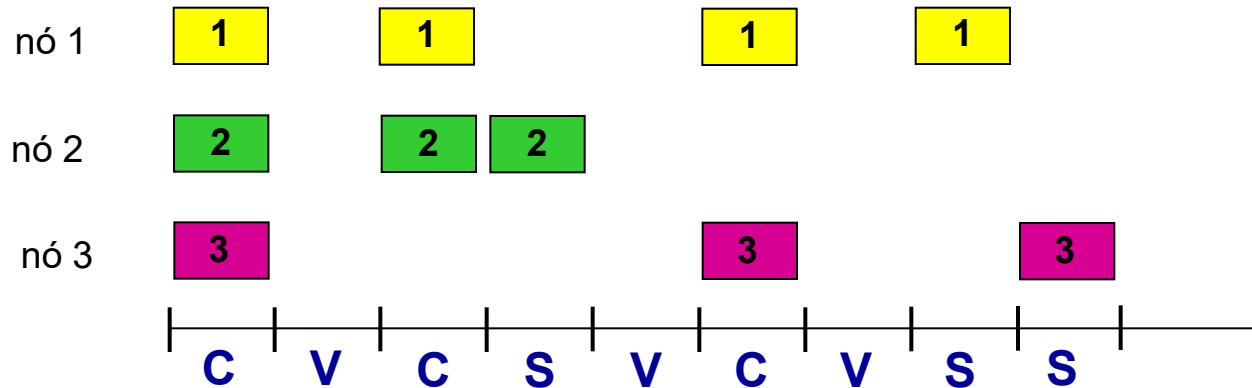
Hipóteses:

- ❖ Todos os quadros têm mesmo comprimento *L bits*
- ❖ Tempo dividido em *slots* de *L/R* segundos (tempo para transmitir 1 quadro)
- ❖ Nós começam a transmitir apenas no início do *slot*
- ❖ Nós são sincronizados
- ❖ Se 2 ou mais nós transmitem em mesmo *slot*, todos os nós são avisados da colisão

Operação:

- ❖ Quando chega novo quadro, nó transmite no próximo *slot*
 - *Se colisão*: nó tenta retransmitir quadro após um número aleatório de slots
 - *Se houve transmissão e não há colisão*: ok!

Slotted ALOHA



Prós:

- ❖ Se houver um único nó ativo, ele transmite continuamente na taxa total do canal
- ❖ Altamente descentralizado: apenas *slots* nos nós precisam ser sincronizados
- ❖ Simples

Contras:

- ❖ Colisões, *slots* perdidos
- ❖ *Slots* desocupados
- ❖ Colisões poderiam ser detectadas em menos tempo do que o necessário para transmitir pacotes
- ❖ Sincronização de relógio

Slotted ALOHA: eficiência

Eficiência: fração dos *slots* bem sucedidos

Tráfego ofertado (G): número médio de tentativas de transmissão ou retransmissões em um dado instante

❖ Suponha: N nós geram um tráfego $G \leq N$, que é originado das transmissões ou retransmissões que ocorrem com prob. $p = G/N$ por nó

❖ Probabilidade de que dado nó tenha sucesso em um *slot* = $p(1-p)^{N-1}$

❖ Probabilidade de que *qualquer* nó tenha sucesso:

$$E = Np(1-p)^{N-1} = G(1-G/N)^{N-1}$$

Exercícios:

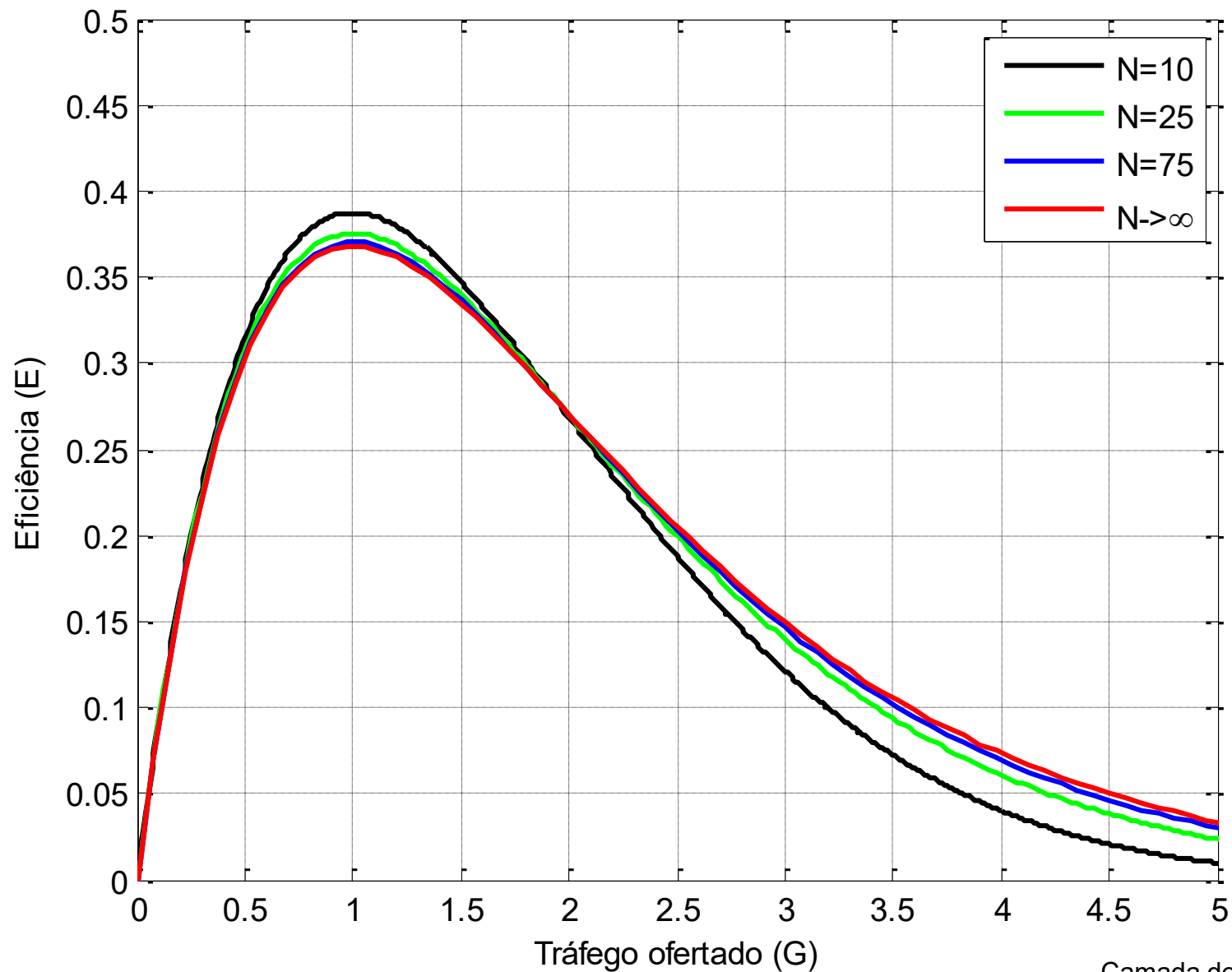
1) Mostrar que a eficiência máxima do slotted ALOHA é

$$E_{\max} = \left(1 - \frac{1}{N}\right)^{N-1}$$

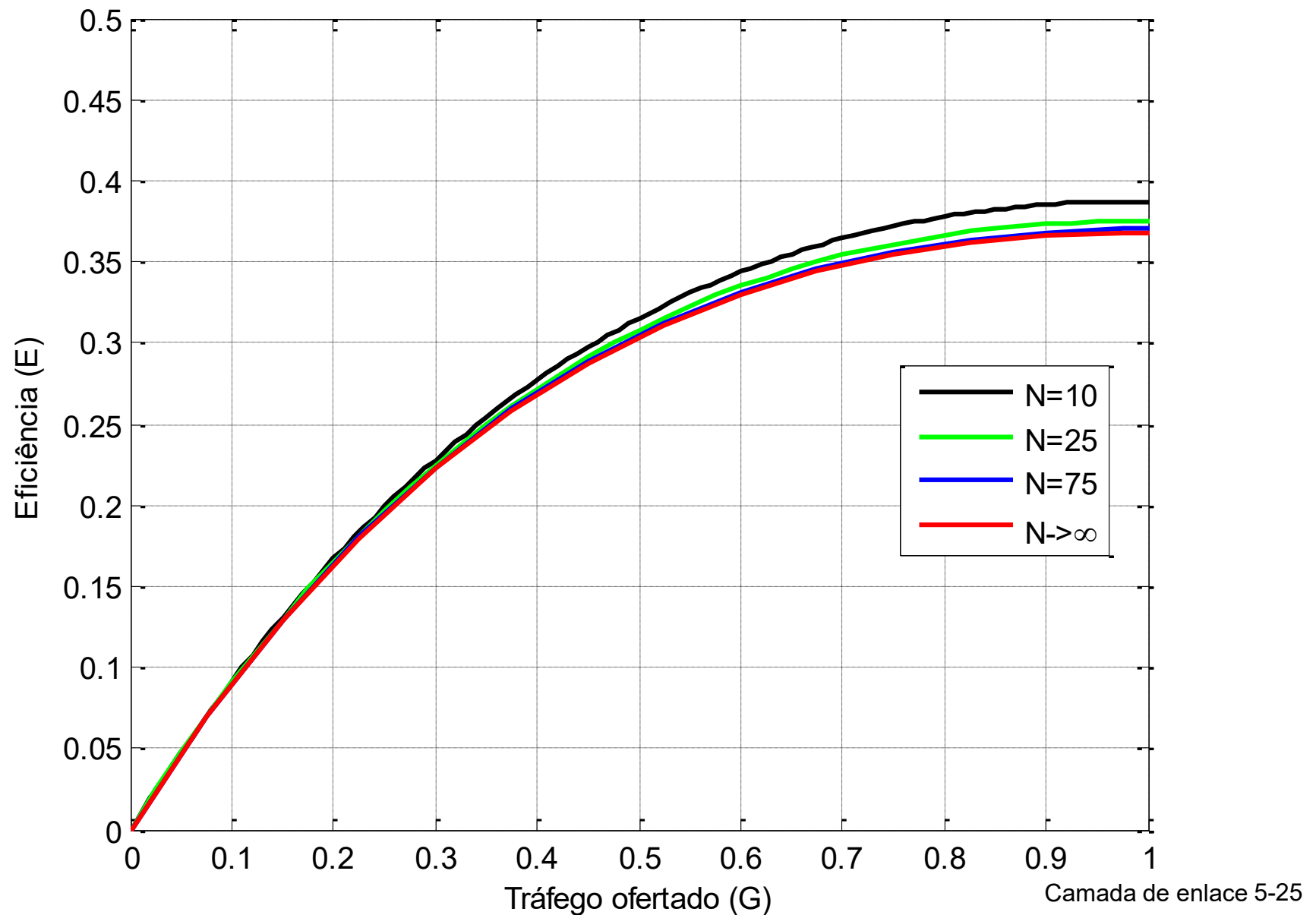
e ocorre para $G = G_0 = 1$.

2) Mostrar que $\lim_{N \rightarrow \infty} E_{\max} = \frac{1}{e}$.

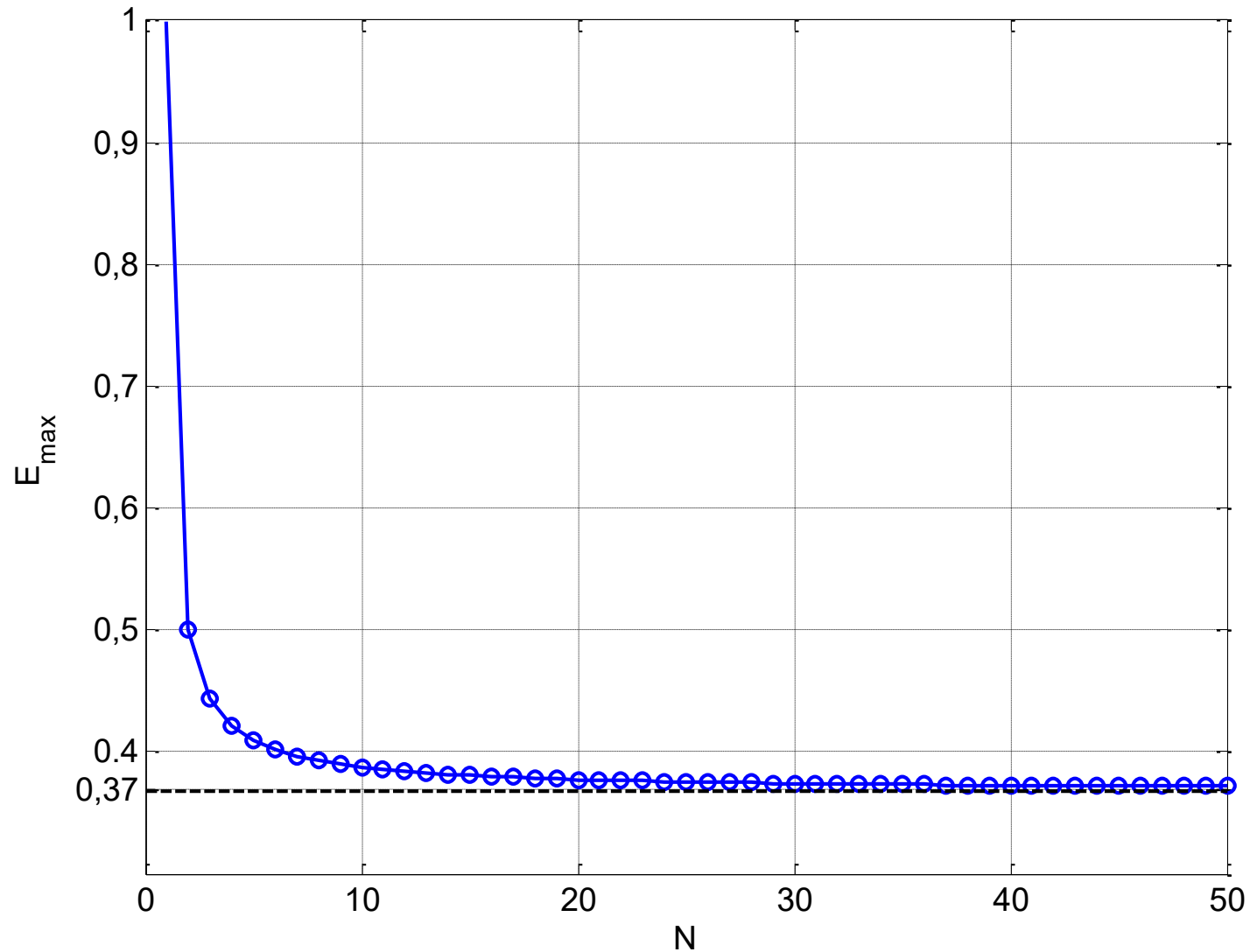
Slotted ALOHA: eficiência



Slotted ALOHA: eficiência



Slotted ALOHA: eficiência



Slotted ALOHA e TCP

Com $G \approx 1$, quadros podem levar bastante tempo para chegar no receptor, devido às colisões e consequente retransmissões.

Exercício: isso faz com que pacotes TCP encapsulados no quadros acabem sendo reenviados pela camada de transporte devido a *timeout* ?

CAPÍTULO 3. Camada de enlace e física

3.1 Introdução

3.2 Controle de acesso ao canal compartilhado

3.2.1 Particionamento de canal

3.2.2 Acesso Aleatório

A *Slotted ALOHA*

B **ALOHA puro**

C CSMA

D Exemplos: Ethernet e Wi-Fi

3.2.3 Revezamento

3.3 Endereçamento MAC e *switches*

3.4 Camada física: meios de transmissão

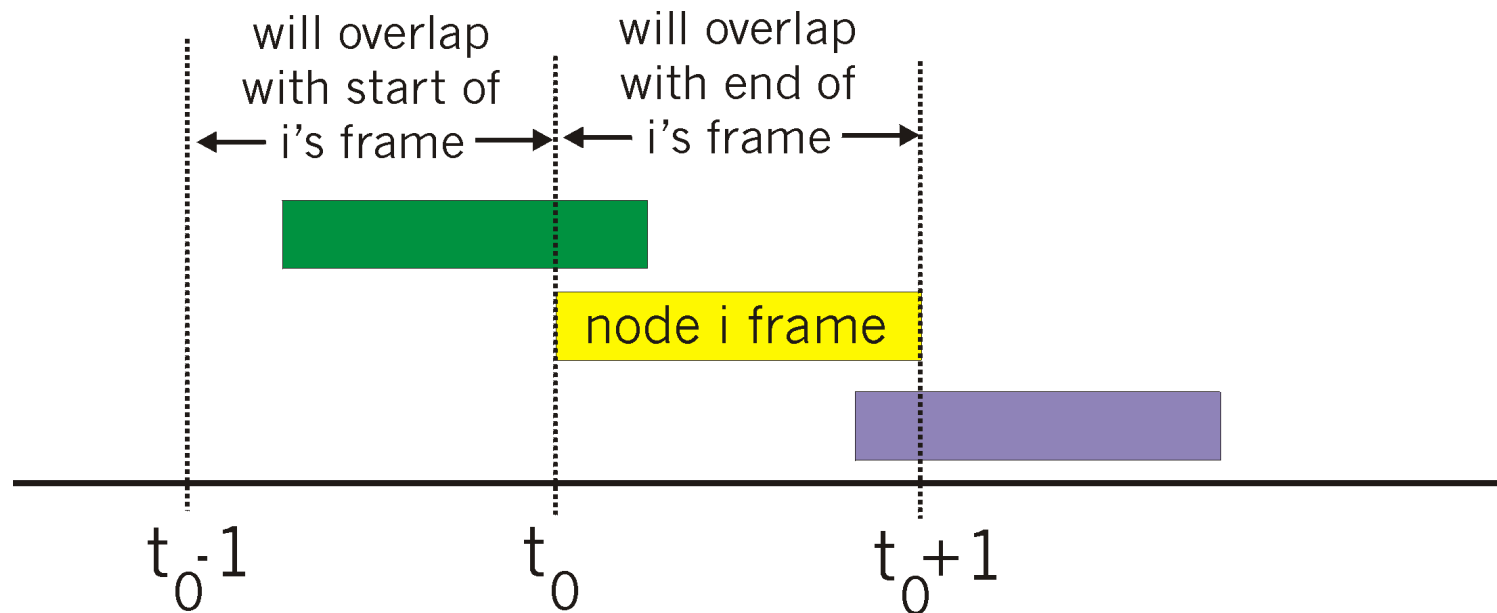
3.5 Rádio Enlaces

ALOHA Puro (sem slots)

- ❖ ALOHA sem *slots*: mais antigo (proposta original do artigo de 1969), mais simples, sem sincronização
- ❖ Quando quadro chega
 - Tenta transmitir imediatamente
 - Se houver colisão aguarda um tempo aleatório para retransmitir
- ❖ Na análise vamos assumir novamente que são N nós, quadros de mesmo comprimento

ALOHA Puro (sem slots)

- ❖ Probabilidade de colisão aumenta:
 - quadro enviado em t_0 colide com outros quadros enviados em (t_0-1, t_0+1) (*duração do quadro é uma unidade de tempo*)



Eficiência do ALOHA Puro

$P(\text{sucesso para dado nó}) = P(\text{nó transmitir}) \cdot$

$P(\text{nenhum outro nó transmitir em } [t_0 - I, t_0]) \cdot$

$P(\text{nenhum outro nó transmitir em } [t_0, t_0 + I])$

$$= p \cdot (1-p)^{N-1} \cdot (1-p)^{N-1}$$

$$= p \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

$$P(\text{sucesso qualquer nó}) = Np \cdot (1-p)^{2(N-1)}$$

$$\text{Assim, } E = G(1-G/N)^{2(N-1)}$$

Exercícios:

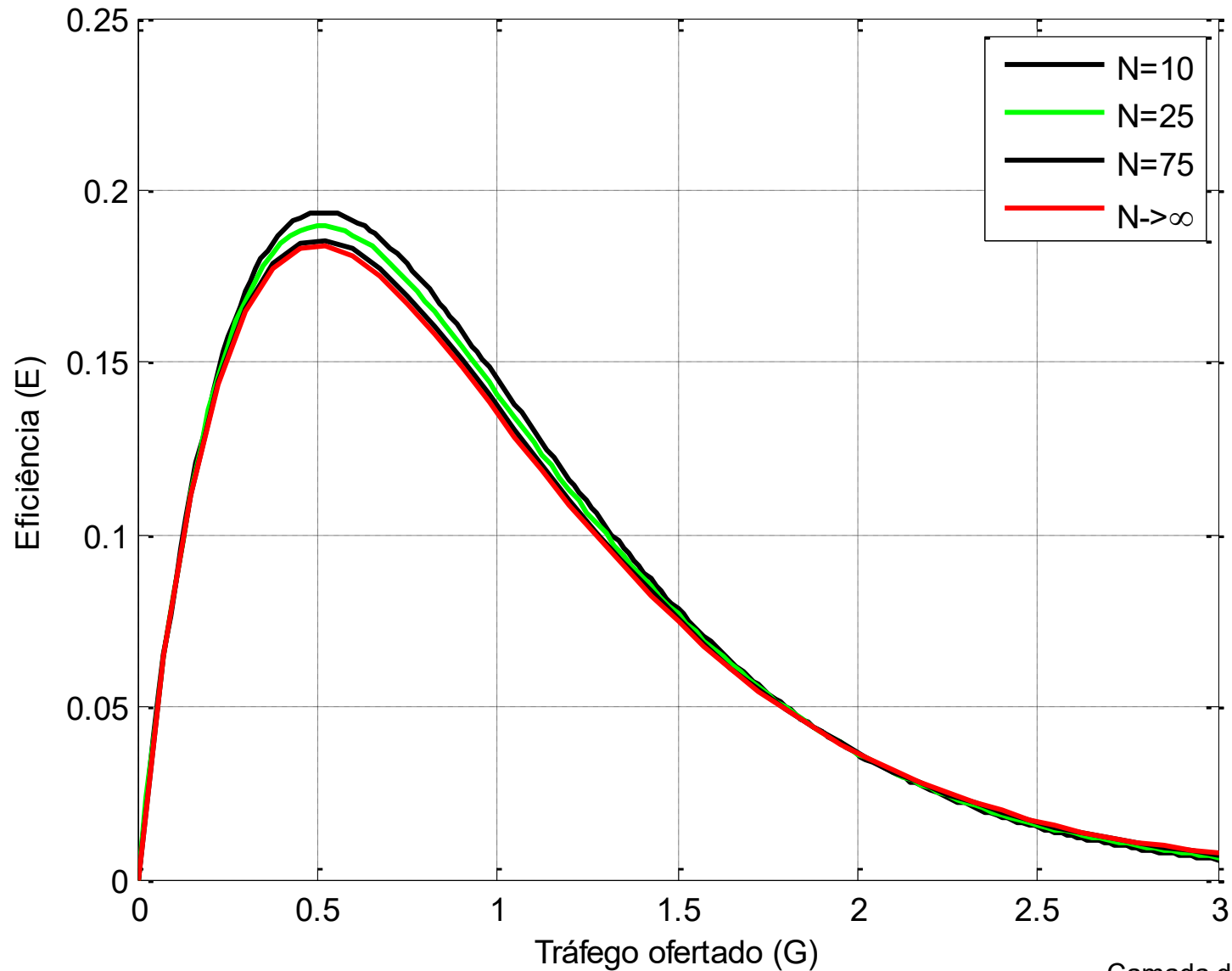
1) Mostrar que a eficiência máxima a o ALOHA puro é

$$E_{\max} = \left(\frac{N}{2N-1} \right) \left(1 - \frac{1}{2N-1} \right)^{2(N-1)}$$

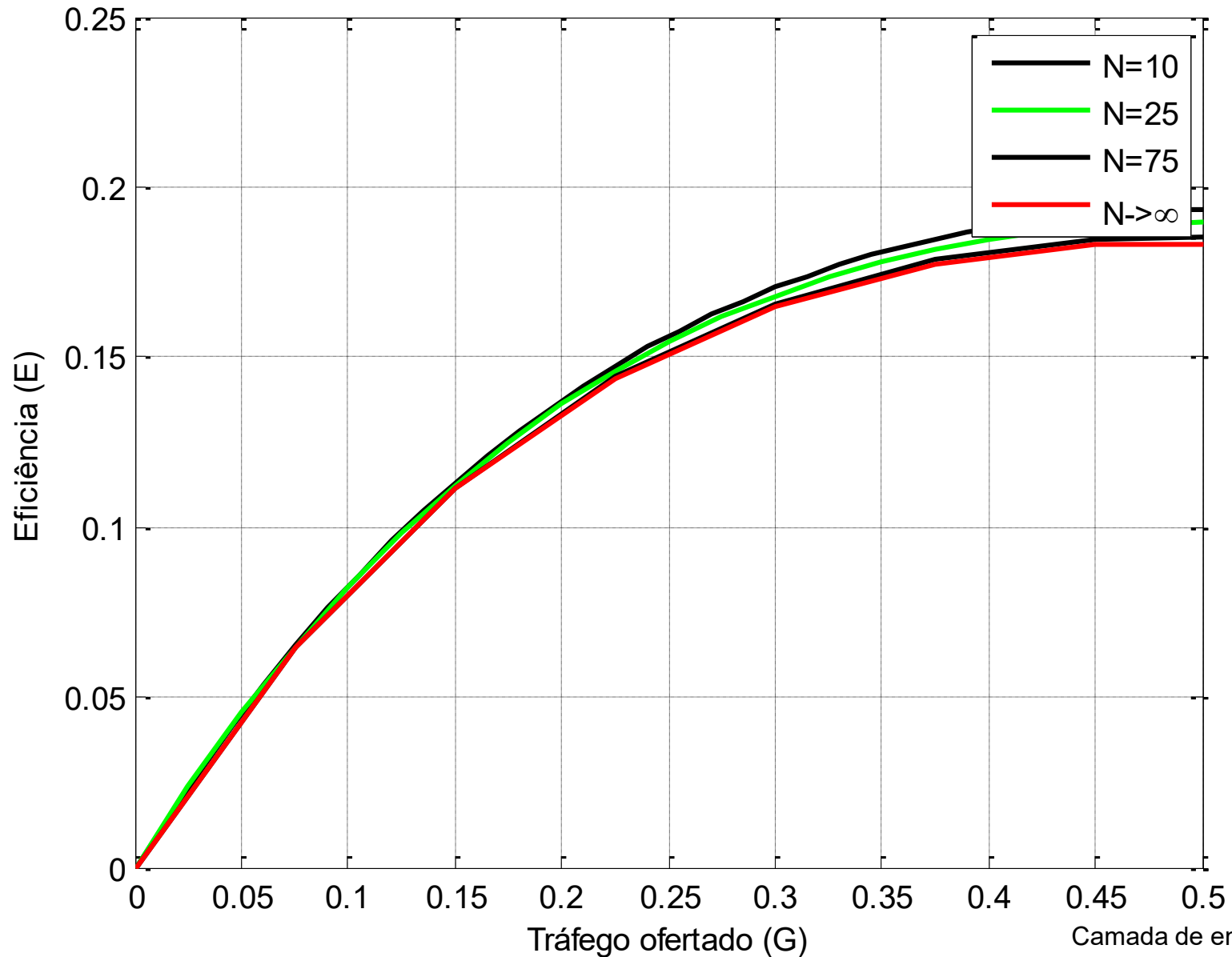
e ocorre para $G = G_0 = \frac{N}{2N-1}$.

2) Mostrar que $\lim_{N \rightarrow \infty} E_{\max} = \frac{1}{2e}$.

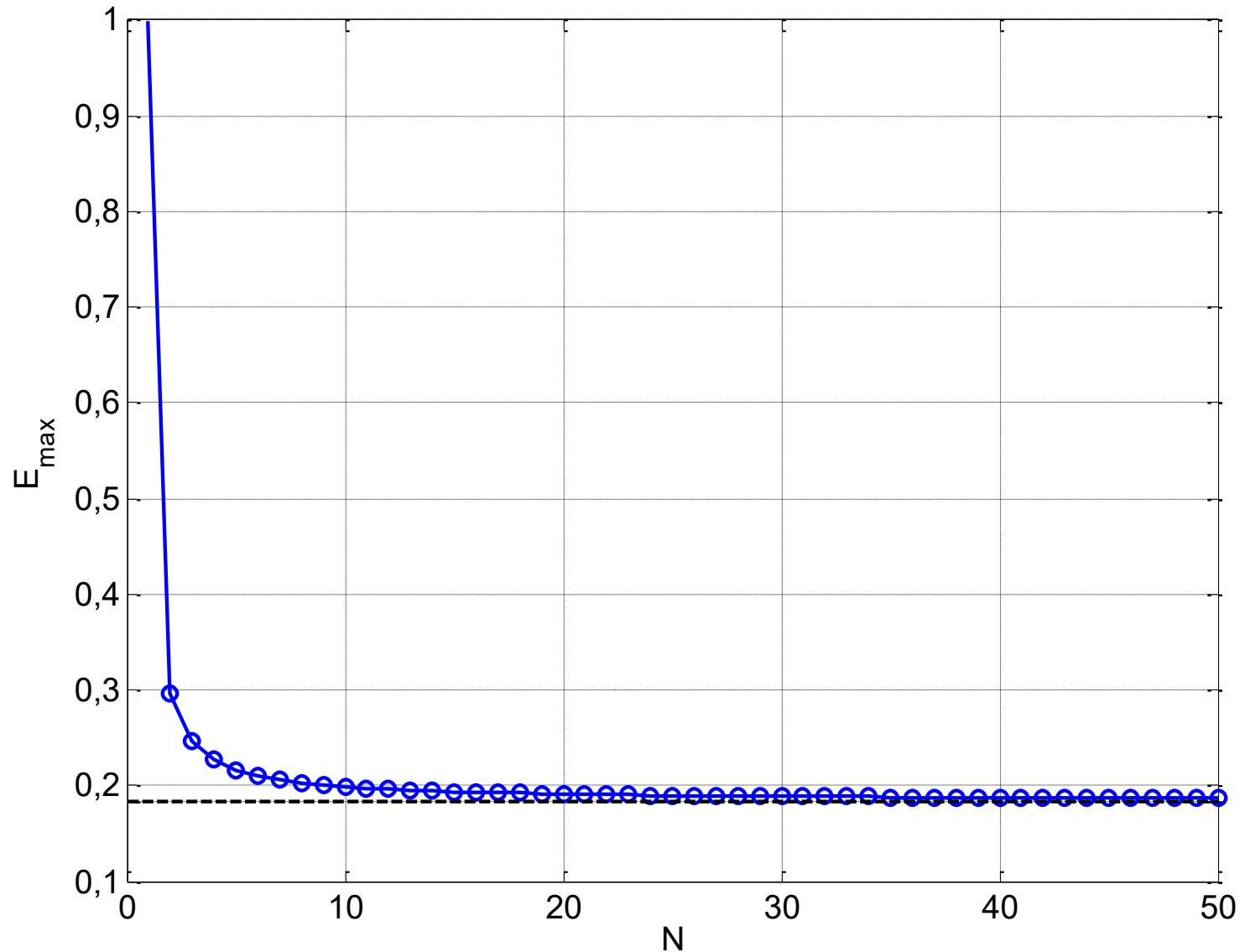
ALOHA Puro: eficiência



ALOHA Puro: eficiência



ALOHA Puro: eficiência



Exercício

Suponha que quatro nós ativos - nós A , B , C e D - estejam competindo pelo acesso a um canal usando o *slotted* ALOHA. Cada nó tenta transmitir em cada intervalo (*slot*) com probabilidade p . O primeiro é numerado como 1, o segundo como 2 e assim por diante.

- a) Qual a probabilidade de que o nó A tenha sucesso pela primeira vez no intervalo 5?
- b) Qual a probabilidade de que algum nó (A , B , C ou D) tenha sucesso no intervalo 4?
- c) Qual a probabilidade de que o primeiro sucesso ocorra no intervalo 3?
- d) Qual a eficiência nesse sistema de quatro nós?

Respostas: (a) $(1 - p(1 - p)^3)^4 p(1 - p)^3$; (b) $4p(1 - p)^3$; (c) $(1 - 4p(1 - p)^3)^2 4p(1 - p)^3$; (d) $4p(1 - p)^3$.