

# Tópicos Avançados em Redes de Computadores

## Comunicações Sem Fio

**Prof. Elias P. Duarte Jr.**

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Departamento de Informática

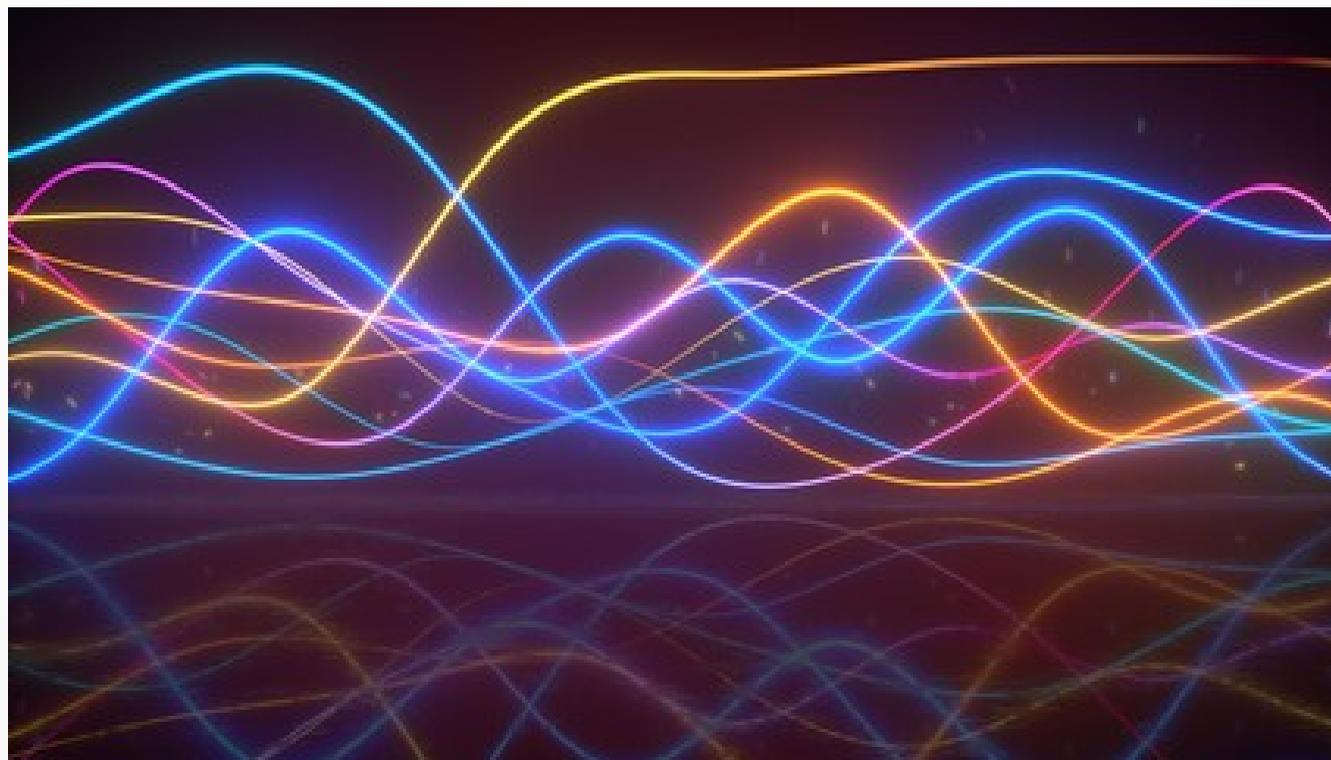
[www.inf.ufpr.br/elias/topredes](http://www.inf.ufpr.br/elias/topredes)

# Sumário

- Revisando: ondas eletromagnéticas, modulação
- Comprimento de onda, o espectro eletromagnético em telecomunicações
- Banda (*bandwidth*): quantidade de informação quantificada
- Faixas de Frequência
- Protocolos de Controle de Acesso ao Meio
- Redes Locais Sem Fio

# Comunicação Sem Fio

- Quando os elétrons se movem: geram ondas eletromagnéticas



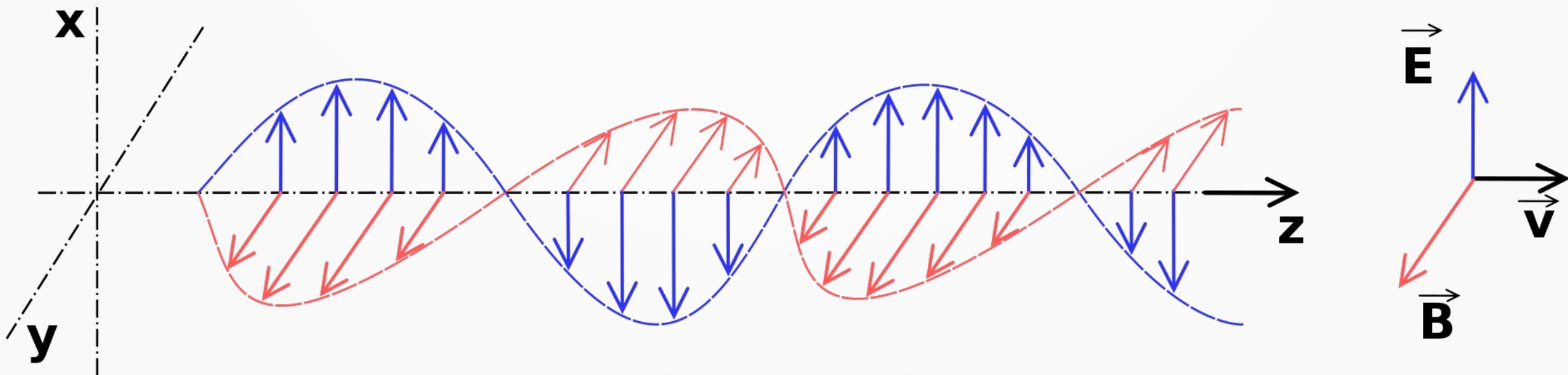
# Mais precisamente...

- O físico escocês Maxwell (James Clerk Maxwell) descobriu uma coisa muito curiosa:
  - um campo elétrico variável produz um campo magnético (e vice-versa)
  - São as chamadas “Hipóteses de Maxwell”
- Quando foi provar sua teoria, descobriu que so tinha um jeito de ser verdade: se existissem ondas eletromagnéticas



# Ondas Eletromagnéticas

- Um campo elétrico variável induz um campo magnético variável que, por sua vez, induz um campo elétrico variável, que induz um campo magnético variável.....

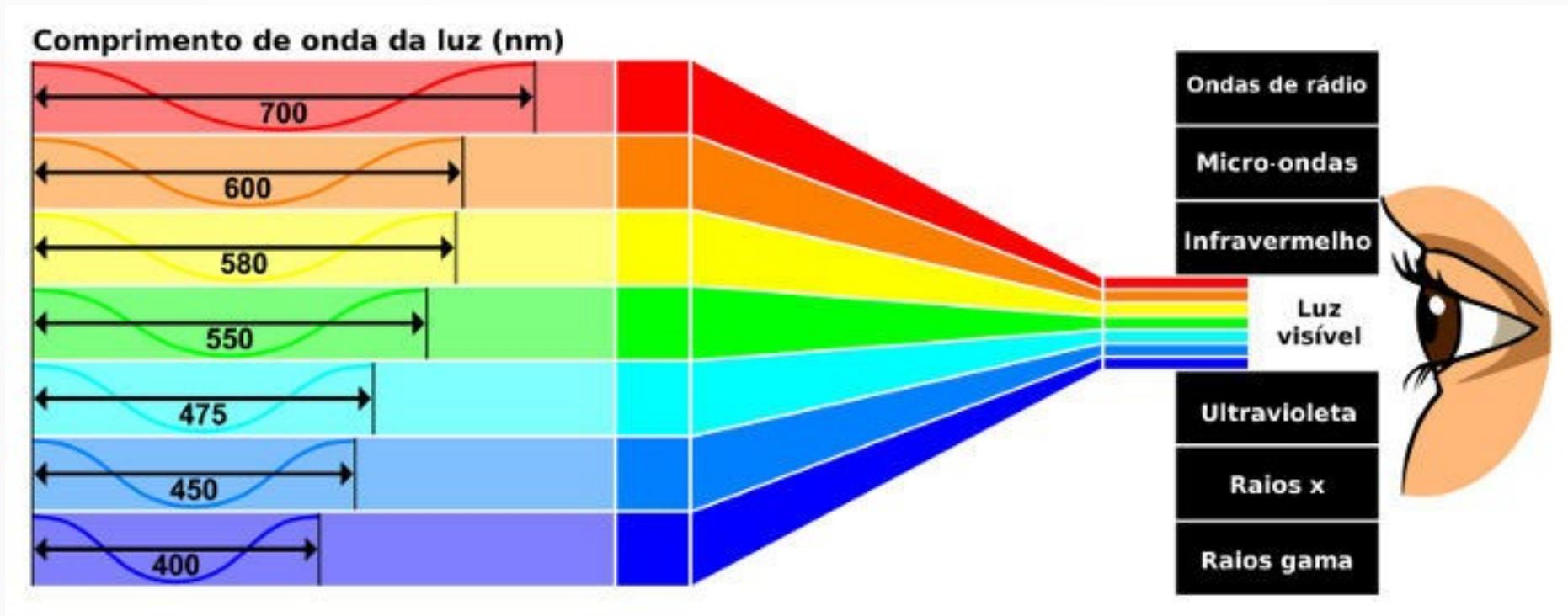


# Gerando uma Onda Eletromagnética

- Uma perturbação elétrica em um ponto inicial, causada por exemplo pela oscilação de cargas elétricas...
- ... se propaga a pontos distantes através da formação destes campos elétricos e magnéticos que vão se induzindo
- Maxwell demonstrou também que a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética no vácuo é a velocidade da luz ( $c = 3 * 10^8$  m/s)

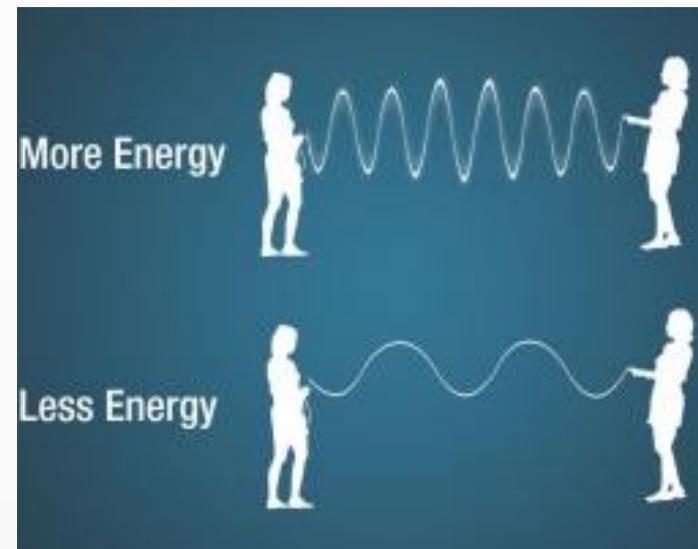
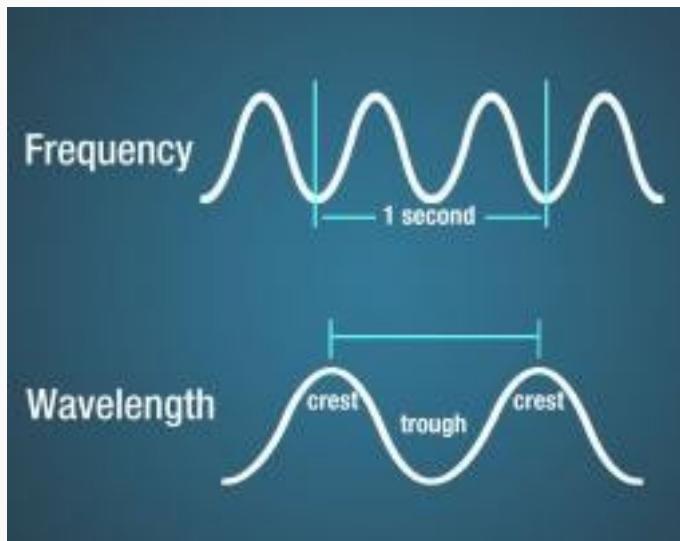
# Se as velocidades da onda e luz são iguais...

- Ops, a própria luz é uma onda eletromagnética!!!



# Ondas Eletromagnéticas

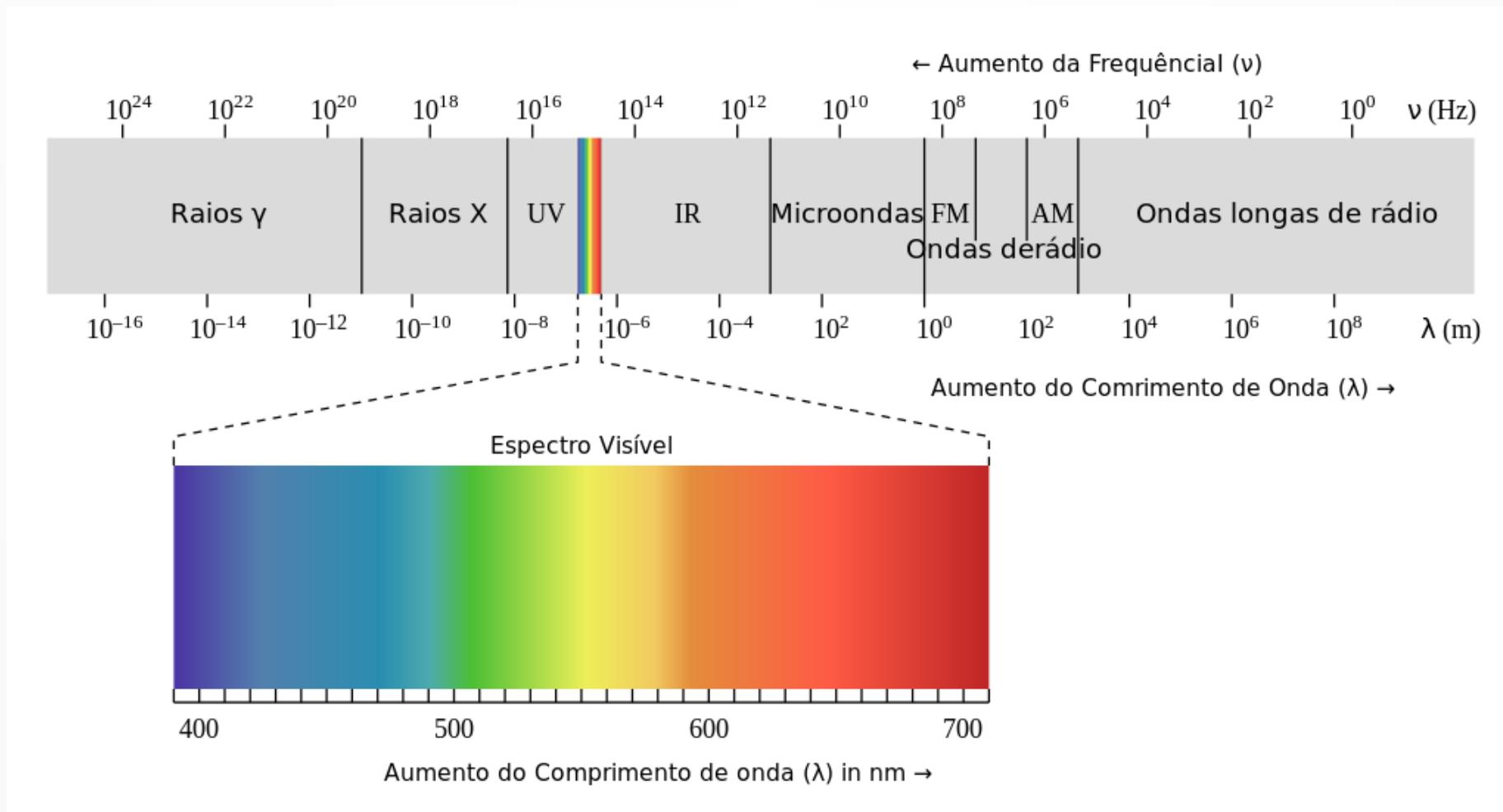
- O número de oscilações por segundo de onda é sua frequência, medida em Hertz:  $f$
- → homenagem a Heinrich Hertz
- A distância entre dois picos (ou dois vales) consecutivos: comprimento de onda:  $\lambda$



# Calculando Comprimentos de Onda

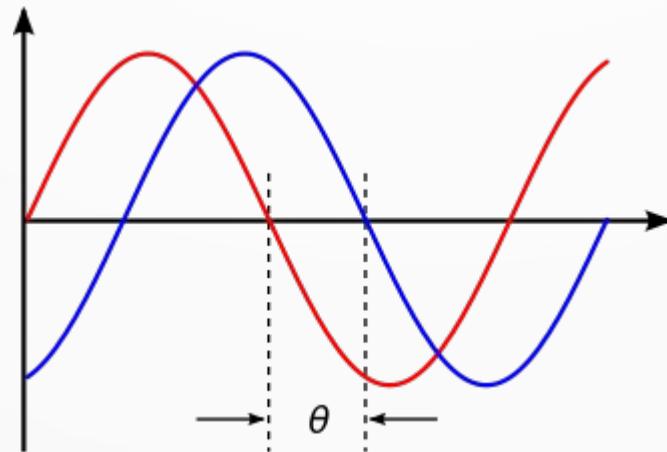
- Uma fórmula importante:  $\lambda * f = c$ 
  - a frequência vezes o comprimento de onda é a velocidade da luz,  $c = 3 * 10^8$  m/s
- Como  $c$  é uma constante, sabendo a frequência conseguimos descobrir o comprimento de onda e vice versa
- Assim, por exemplo, para uma onda de 100MHz,  
 $\lambda = 3 * 10^8 / 100 * 10^6 = 3$ m

# O Espectro



# Modulação: Informação na Onda

- Podemos alterar características da onda para codificar informação nela
- Este processo é chamado de *modulação*
- As faixas de frequência de rádio, micro-ondas, infravermelho e luz visível podem ser usadas para comunicação
- Podemos alterar 3 características das ondas: amplitude, frequência e fase
  - A diferença de fase é expressa em ângulo ou tempo, entre duas ondas que tenham mesma frequência e em referência ao mesmo ponto no tempo



# Banda: Quantidade de Informação

- A banda (*bandwidth*) é a quantidade de informação que pode ser modulada em uma onda
- Com a tecnologia atual, é possível codificar até 8 bits por hertz (em frequências mais altas)
- Assim uma onda de 1GHz pode transmitir até 8Gbps
- Ou seja, quanto maior a frequência, maior a capacidade de transmissão do canal

# Faixas de Frequência

- Na verdade não usamos 1 única onda para codificar os dados para transmissão e sim...
- Uma faixa de frequência, que consiste de uma sequência de ondas com frequências contíguas
  - por exemplo de 2,34Mhz até 2,37Mhz
  - a informação é codificada em todas as ondas da faixa
  - chamamos de largura de banda a diferença entre a maior e menor frequências, no exemplo 0,03Mhz
  - quanto maior a largura de banda mais informação pode ser transmitida

# Faixas de Frequência

- Opa, então vamos usar faixas de frequência gigantes para transmitir **muita** informação, certo?

# Faixas de Frequência

- Opa, então vamos usar faixas de frequência gigantes para transmitir **muita** informação, certo?
- Errado! Para melhorar a qualidade da recepção (quantidade de watts por hertz) pela antena, é importante usar uma faixa de frequência pequena ( $\Delta f/f \ll 1$ )
- Puxa, mas daí conseguimos transmitir pouca informação, certo?

# Faixas de Frequência

- Opa, então vamos usar faixas de frequência gigantes para transmitir **muita** informação, certo?
- Errado! Para melhorar a qualidade da recepção (quantidade de watts por hertz) pela antena, é importante usar uma faixa de frequência pequena ( $\Delta f/f \ll 1$ )
- Puxa, mas daí conseguimos transmitir pouca informação, certo?
- Podemos dar um golpe: usar faixas curtas por intervalos minúsculos e ir trocando de faixa - muitas e muitas vezes por segundo

# Pulos de Frequência

- *Frequency-hopping spread spectrum*: espectro de difusão em frequência variável
- Estratégia inventada pela grande atriz de cinema dos anos 1930, Hedy Lamarr



# Faixas de Frequência

- A estratégia *frequency-hopping spread spectrum* é usada hoje tanto em redes WiFi 802.11 como no Bluetooth, por exemplo
- Outra estratégia usada nas redes celulares (nosso pilar desta disciplina!): *direct sequence spread spectrum* - sequência direta de espalhamento do espectro
  - Esta estratégia “espalha” a informação sobre uma faixa de frequência larga, preservando a capacidade de recepção

# Redes Sem Fio

- A primeira rede sem fio: Universidade do Havaií
- Aloha!



# Protocolo MAC Aloha

- Protocolo MAC: *Medium Access Control*
- Permite que múltiplas máquinas compartilhem 1 único meio de transmissão
- MAC Aloha: o mais simples possível - quer comunicar? Comunique-se!
- Na rede Aloha: todas as máquinas comunicam na mesma faixa de frequência
- Se 2 máquinas comunicam ao mesmo tempo: colisão
- Intuitivamente: baixa eficiência...

# Abre Parêntesis: FDM & TDM

- Nas redes Ethernet, Aloha, WiFi: todas as máquinas comunicam na mesma faixa de frequência
- As estações de rádio AM/FM todas transmitem ao mesmo tempo sem colisão: cada estação usa uma faixa de frequência diferente
- FDM: *Frequency Division Multiplexing*
- Outra alternativa para evitar colisão: dividir as comunicações no tempo
- TDM: *Time Division Multiplexing*
  - intervalos/slots de tempo cada um dedicado para 1 máquina

# Aloha: Broadcast & Colisão

- Voltando à rede Aloha: todas as máquinas comunicam ao mesmo tempo na mesma faixa de frequência
- Comunicação por *broadcast* (difusão)
- Uma mensagem transmitida é recebida por todas as máquinas
- Ocorrendo uma colisão: o transmissor consegue detectar *após* receber o pacote
  - o que foi recebido é o que foi transmitido?
  - caso não seja: deve tentar retransmissão

# Aloha: Eficiência

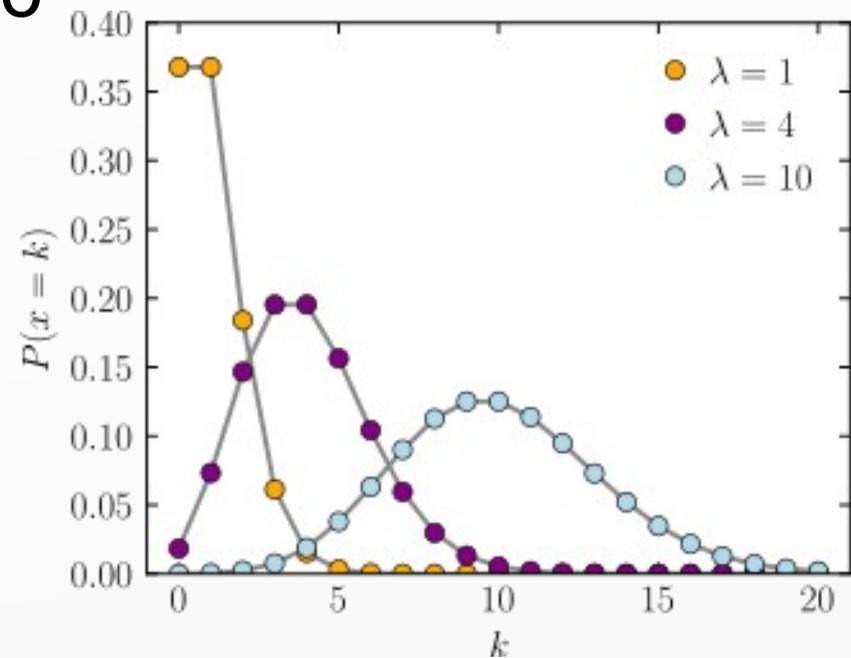
- Quantos pacotes *não* colidem nesta rede caótica?

# Aloha: Eficiência

- Quantos pacotes *não* colidem nesta rede caótica?
- Considere que todos os pacotes tem o mesmo tamanho
  - portanto, demoram o mesmo tempo para serem transmitidos
  - vamos chamar de “intervalo de transmissão do pacote”  $T$
- Seja  $M$  a média esperada de pacotes gerados em um intervalo de pacotes  $T$  seguindo a distr. Poisson
- Veja que se  $M > 1$  ninguém consegue comunicar!!!

# Distribuição de Poisson

- Expressa a probabilidade de um certo número de eventos ocorrer em um intervalo de tempo fixo,
  - os eventos ocorrem em taxa média constante
  - a ocorrência de um evento independe do tempo que passou desde o último evento
  - a média é igual à variância
  - no gráfico ao lado  $M \rightarrow \lambda$



# Aloha: Eficiência

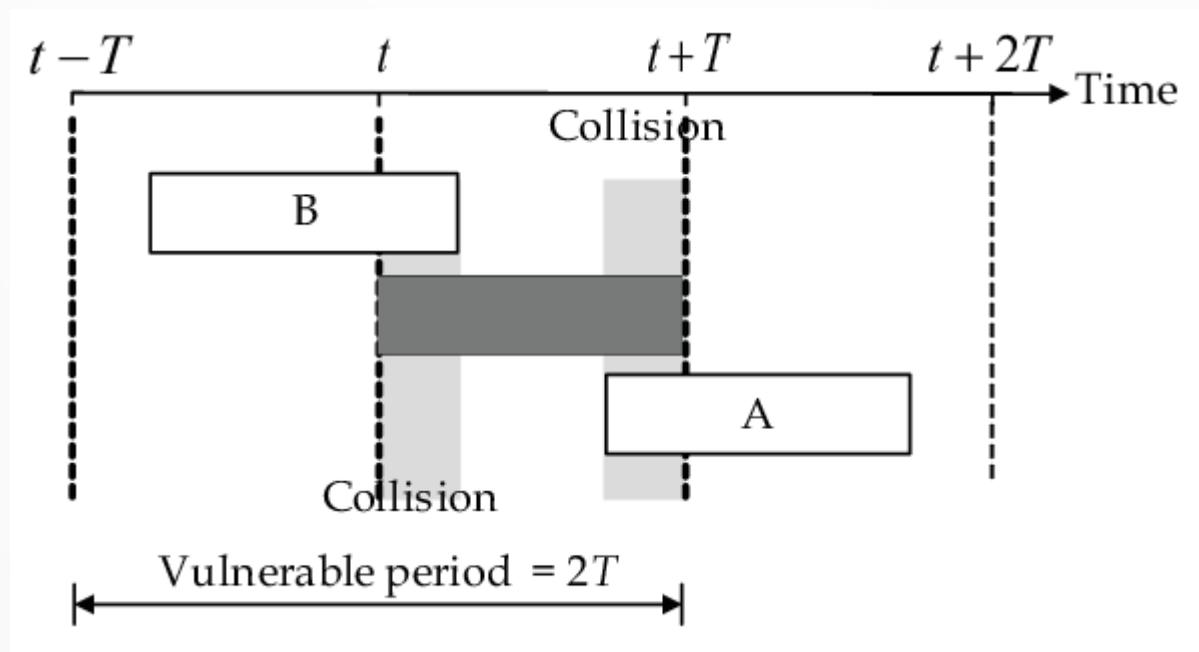
- A média de pacotes gerados deve estar, portanto, no intervalo  $0 < M < 1$ 
  - para que a rede seja viável
- Em um determinado intervalo, além dos pacotes novos gerados, há também as retransmissões
  - pacotes que sofreram colisão em intervalos anteriores
- Seja  $k$  o número total de transmissões + retransmissões em 1 intervalo, média  $G$
- Vamos considerar que  $k$  também segue Poisson

# Aloha: Eficiência

- Claramente:  $G \geq M$
- Se a rede tem carga baixa – poucas transmissões – então há poucas retransmissões e  $G \approx M$
- Com carga alta: muitas retransmissões e  $G > M$
- A vazão da rede (*throughput*) é taxa efetiva de transmissão de dados na rede, vamos chamar de  $S$
- Seja  $P_0$  a probabilidade de que um pacote seja transmitido sem colidir (transmissão única na rede!)
- O *throughput* pode ser calculado então:  $S = G * P_0$

# Aloha: Eficiência

- Um determinado quadro fica vulnerável a sofrer colisão se houve outra transmissão em 2 intervalos



# Aloha: Eficiência

- Como assumimos a distribuição de Poisson conseguimos calcular a probabilidade de  $k$  pacotes serem transmitidos em 1 intervalo 
- $P_k = (G^k * e^{-G})/k!$
- Portanto  $P_0 = (G^0 * e^{-G})/0! = e^{-G}$
- Em outras palavras, se a média de transmissões e retransmissões é  $G$ ,  $P_0 = e^{-G}$
- Para não haver colisão deve haver 0 transmissões em 2 intervalos: a média é  $2G$  e  $P_0 = e^{-2G}$

# Aloha: Eficiência

- Como assumimos a distribuição de Poisson conseguimos calcular a probabilidade de  $k$  pacotes serem transmitidos em 1 intervalo
- $P_k = (G^k * e^{-G})/k!$
- Portanto  $P_0 = (G^0 * e^{-G})/0! = e^{-G}$
- Em outras palavras, se a média de transmissões e retransmissões é  $G$ ,  $P_0 = e^{-G}$
- Para não haver colisão deve haver 0 transmissões em 2 intervalos: a média é  $2G$  e  $P_0 = e^{-2G}$
- Voltando ao cálculo da vazão:  $S = G * e^{-2G}$
- Seja  $G = 0,5$ : então  $S = 0,5 * e^{-1} \approx 0,18 \rightarrow$  **18% é a vazão**



# Aloha: INEficiência

- Apenas 18% dos pacotes conseguem chegar ao destino sem colisão
- Um valor ridiculamente baixo
- Compensa definirmos protocolos MAC mais sofisticados
- Em Redes II vimos o protocolo CSMA/CD 1-persistente usado na Ethernet – *Carrier Sense Multiple Access with*
- CD: *Collision Detection*, detecta a colisão ao transmitir e para
- Impossível em redes sem fio: não escutam *enquanto* transmitem
- Usamos então CSMA/CA: *Collision Avoidance*

# Redes Sem Fio

- Hoje usamos redes sem fio de diversos tipos
  - PAN: Personal Area Network → Bluetooth
  - LAN: Local Area Network → WiFi → 802.11
  - WAN: Redes Celulares → hoje chegando a 5G

# PAN: Personal Area Network

- Os dispositivos estão bastante próximos entre si
- A rede PAN mais popular: Bluetooth
  - Iniciativa original da Ericsson (1994) se juntou a Intel, Toshiba, Nokia e IBM → em 1999 a rede foi lançada
  - Originalmente: objetivo era conectar celulares a dispositivos próximos - hoje todo tipo de dispositivo
  - Hoje 35 mil membros do Bluetooth SIG (*Special Interest Group*)



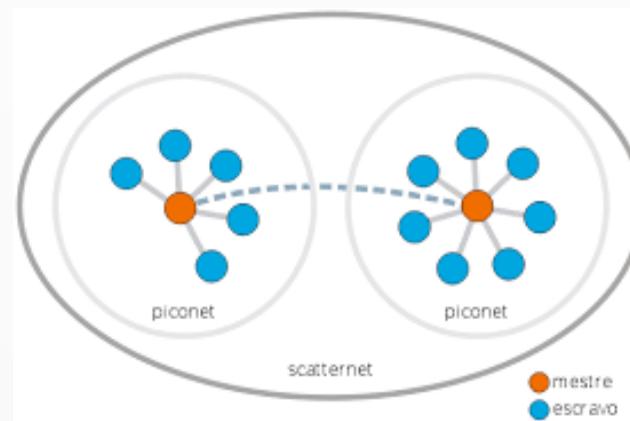
# Bluetooth

- O nome da rede inspirado no rei viking dinamarquês Harald “Bluetooth” Blaatant II (940-981)
- Um rei que unificou a Dinamarca e a Noruega
- Levou o cristianismo para a Dinamarca
- Na imagem ao lado: batismo pelo monge Poppo
- O logo é uma junção das suas iniciais HB em runas nórdicas



# Bluetooth: Arquitetura

- A rede Bluetooth funciona em uma arquitetura mestre-escravo
- A base do Bluetooth é a chamada *piconet*, formada por 1 mestre e até 7 escravos
  - distância máxima permitida 10m
- Múltiplas piconets podem formar uma *scatternet*



# Bluetooth: Arquitetura

- A arquitetura mestre-escravo é a mais simples possível: chips de no máximo \$5 dólares
- Toda a comunicação é ditada pelo mestre e ocorre exclusivamente entre mestre e escravo
  - A comunicação direta de dois escravos é impossível
- Além dos 7 dispositivos escravos, é possível ter também até 255 dispositivos “estacionados”
  - são dispositivos hibernando que só respondem a 1 única mensagem: reativação vinda do mestre

# Bluetooth IEEE 802.15

- Usa faixa de frequência de 2,4GHz
- A banda é dividida em 79 canais de 1MHz cada
- A modulação é feita com espectro disperso por salto de frequência: 1600 saltos por segundo!
- O mestre da piconet dita os saltos e mais
- A rede Bluetooth é baseada em TDM: o mestre determina em que intervalos de tempo quem pode comunicar

# Bluetooth IEEE 802.15

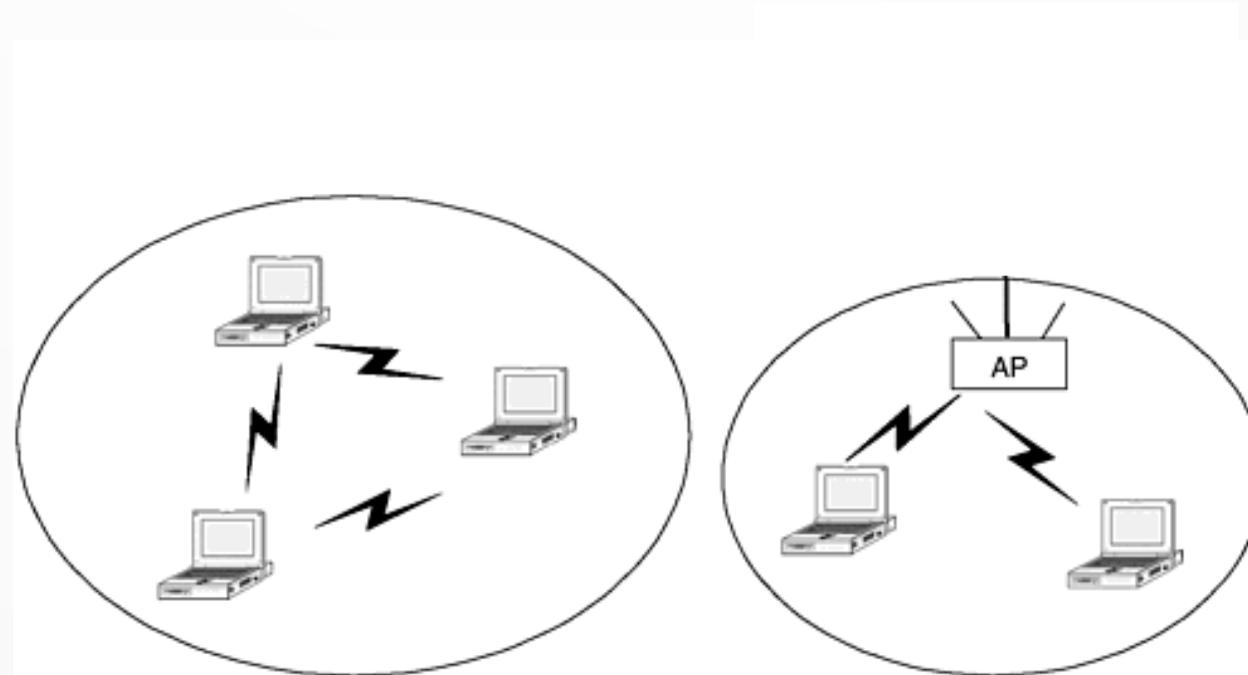
- A rede prevê diferentes tipos de aplicação, por exemplo voz, tipos diversos de áudio e vídeo,...
  - protocolo físico e de enlace que prevê aplicação :-0
- As aplicações Bluetooth são chamadas de “perfis” e existem hoje mais de 20 perfis diferentes
- Existem pilhas de protocolos específicas para os diferentes perfis
- Os perfis são voltados para dispositivos específicos
  - por exemplo: perfil para um telefone celular trabalhar como controle remoto de uma TV
- Bluetooth é uma das tecnologias mais importantes na Internet das Coisas – IoT (*Internet of Things*)

# WiFi: Rede IEEE 802.11

- Uma família de redes locais
- Projetada para interconectar da maneira mais suave possível com rede Ethernet (802.3)
- As diversas redes WiFi se comunicam nas faixas de frequência de 2,4GHz, 5GHz e 6GHz
  - comprimentos de onda de 120mm e 60mm, respectivamente
  - também usa saltos de frequência
  - velocidades de 11Mbps, 56Mbps até 9,608Gbps (WiFi 6, 802.11ax)
- Estas faixas de frequência apresentam melhor desempenho quando não há obstáculos físicos

# WiFi: 2 Modos de Operação

- Existem 2 modos de operação:
  - com estação base (*access point*)
  - rede ad hoc: dispositivos conectam-se entre si

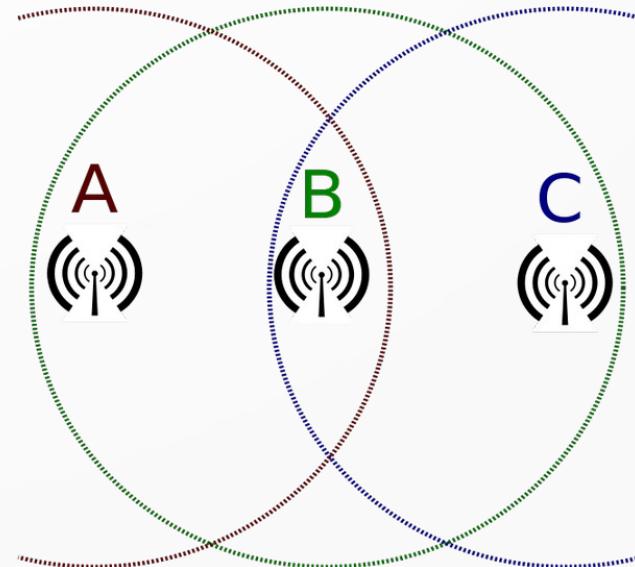


# WiFi: Características

- No 1º modo de operação toda comunicação passa pelo *access point*
- Apesar de que introduz um passo a mais na comunicação (dispositivo origem → access point → dispositivo destino...)
- ... simplifica fortemente a estratégia necessária para comunicação
- Maioria dos *access points* têm alcance de até 20m
- Modo ad hoc usado em situações específicas, por exemplo no mundo dos jogos e celular roteador virtual

# WiFi: Mais Características

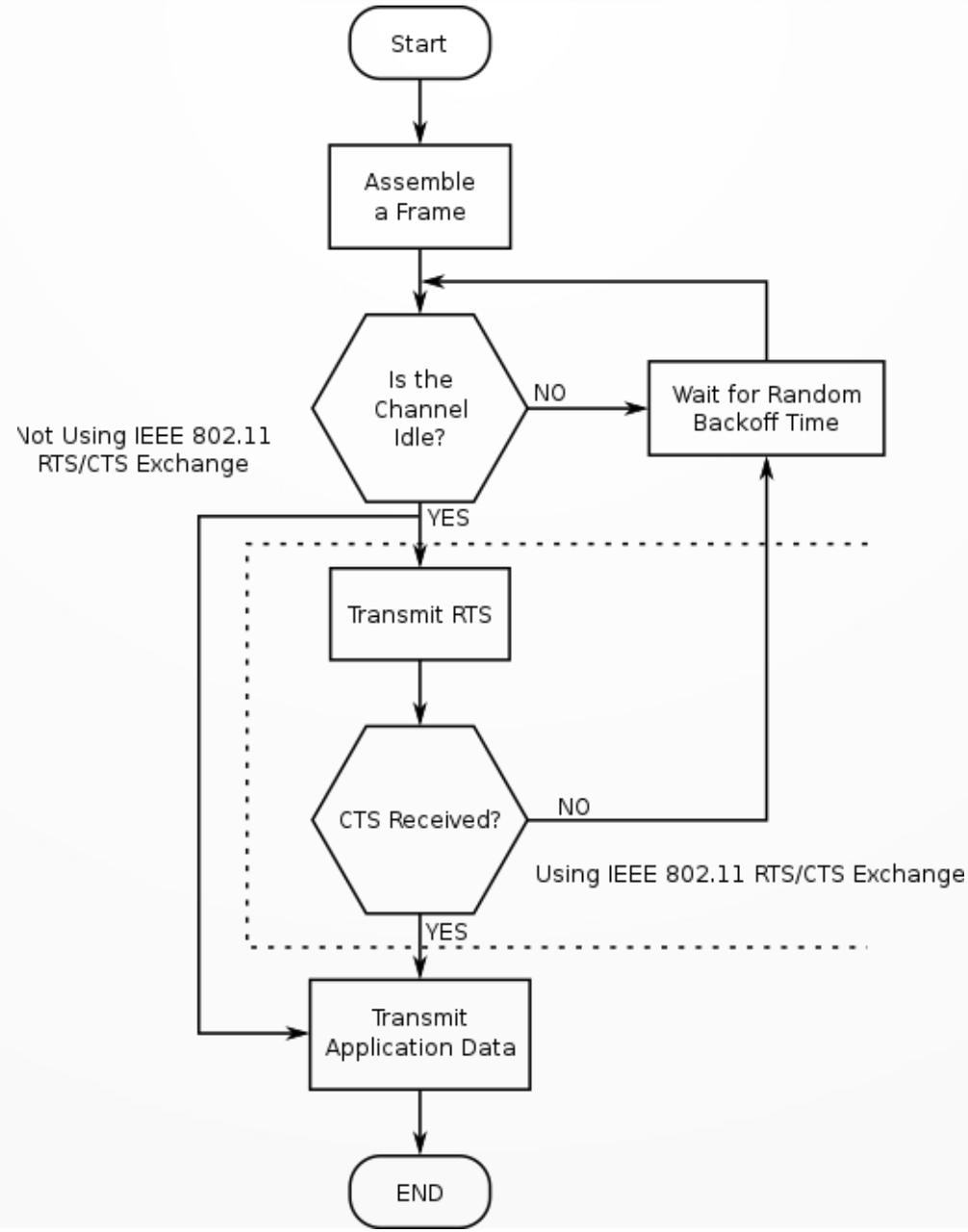
- Endereços MAC de 48 bits (6 bytes) como nas demais redes padronizadas pelo comitê 802 do IEEE
- Protocolo de acesso ao meio: CSMA/CA
- *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance*
- CSMA/CD não funciona!
- “The hidden node problem”



# CSMA/CA: Funcionamento

- Um protocolo MAC: controle de acesso ao meio
- Tem dois módulos básicos:
  - O primeiro é muito semelhante ao CSMA/CD: a máquina escuta o meio, se estiver livre transmite, caso contrário espera um tempo aleatório e escuta de novo
  - No segundo: quando encontra o meio livre, o dispositivo envia um pacotinho “Request To Send” (RTS)
  - O *access point* só responde “Clear To Send” (CTS) se o dispositivo puder comunicar a partir de então
  - Não é usado para transmissões pequenas

# CSMA/CA: Funcionamento



# Redes Sem Fio: Impacto

- As redes sem fio facilitaram de forma significativa o acesso à Internet
- Parte importante da “revolução” das redes de computadores

# Conclusão

- Tecnologia de Comunicação Sem Fio
- Próxima aula: redes celulares!

**Obrigado!**

Lembrando: a página da disciplina é:  
<https://www.inf.ufpr.br/elias/topredes>