



# Redes Cognitivas com Oportunidades Dinâmicas de Acesso ao Espectro

Defesa de Tese

Marcel William Rocha da Silva

Orientador: José Ferreira de Rezende

# Roteiro

---

- Introdução e motivação
  - Rádios cognitivos
  - Oportunidades dinâmicas
  - Roteamento em redes cognitivas dinâmicas
- Propostas e avaliações
  - Arquitetura de rede em malha híbrida
  - Protocolo RoAD (Roteamento de Alta Disponibilidade)
- Conclusões e trabalhos futuros

# Problema: Escassez de Espectro

---

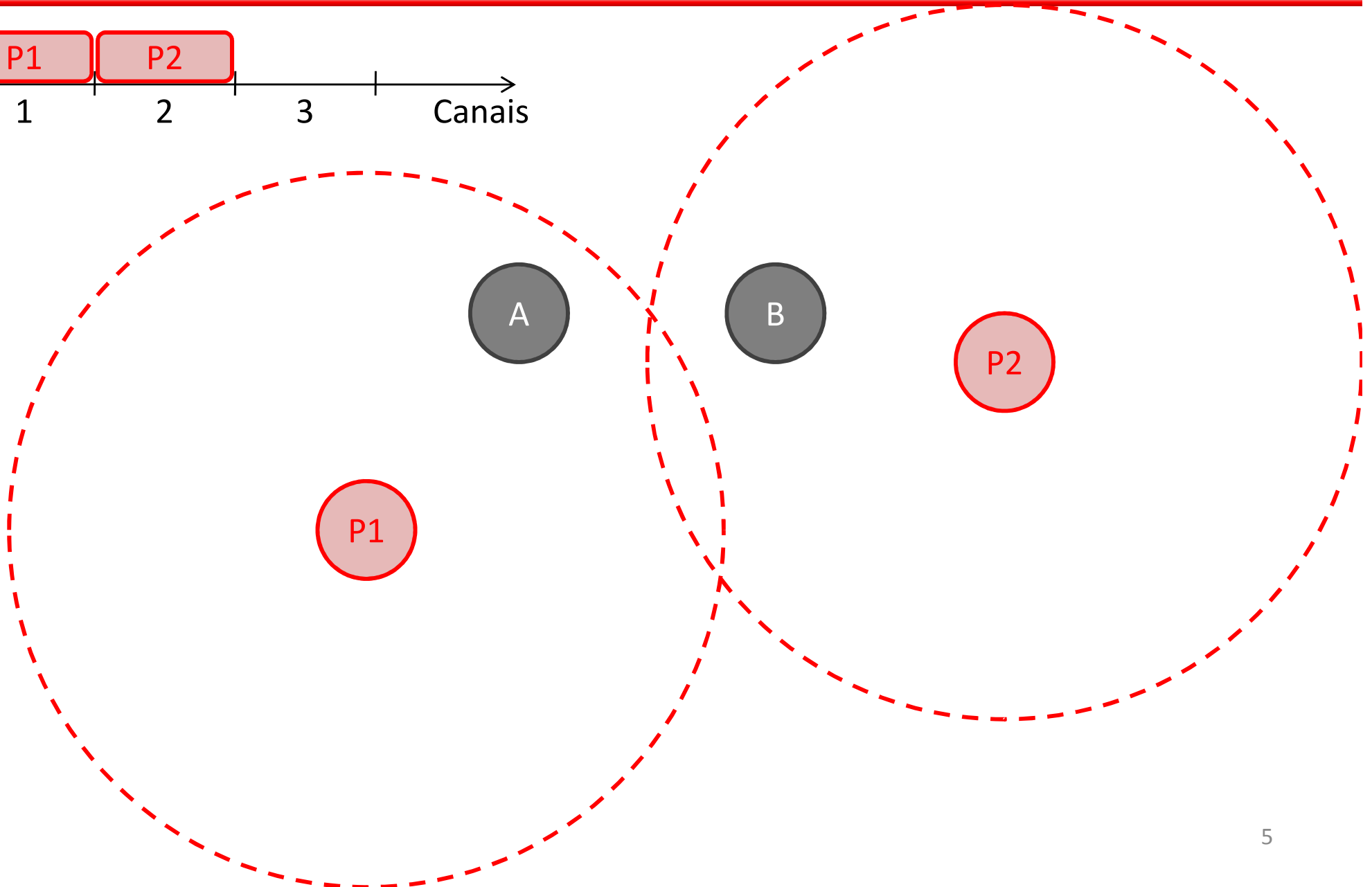
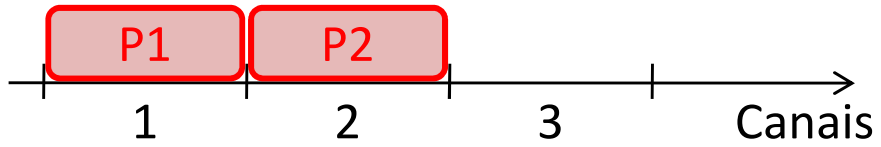
- Uso ineficiente
  - Faixas não-licenciadas
    - Altos índices de utilização por tecnologias muito populares na atualidade (IEEE 802.11 e Bluetooth)
  - Faixas licenciadas
    - Baixos índices de utilização por tecnologias pouco utilizadas na maioria das regiões
- Solução
  - Acesso Oportunista → Rádios Cognitivos

# Rádios Cognitivos

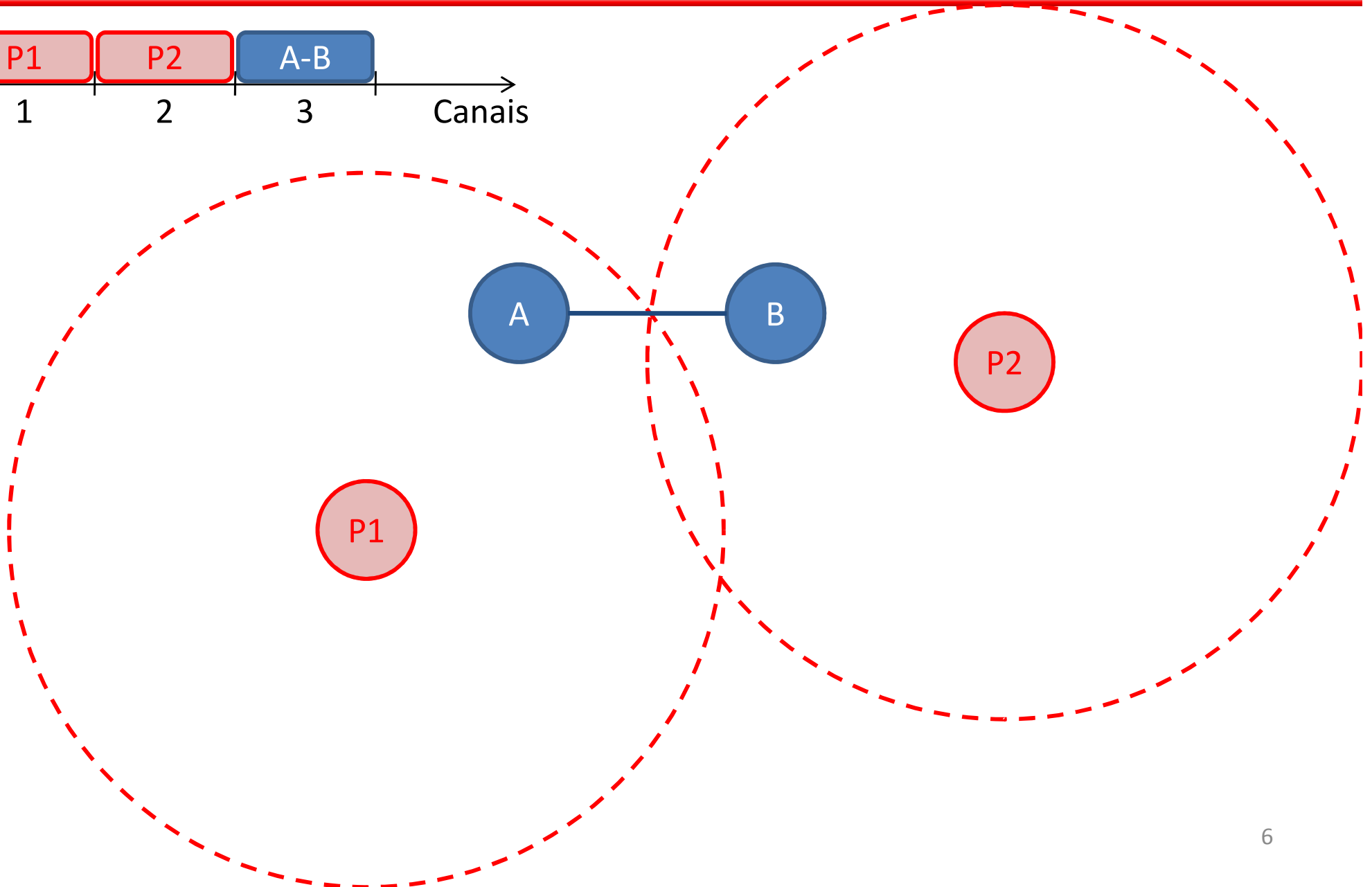
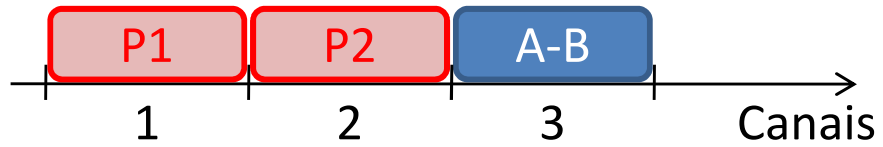
---

- Reconfiguração
  - Controle das características de operação por *software*
- Percepção do ambiente
  - Detecção da atividade de outros dispositivos através de sensoriamento ou consulta à entidade central
- Uso oportunista do espectro licenciado
  - Acesso não-prioritário (secundário) em relação aos licenciados (primários)

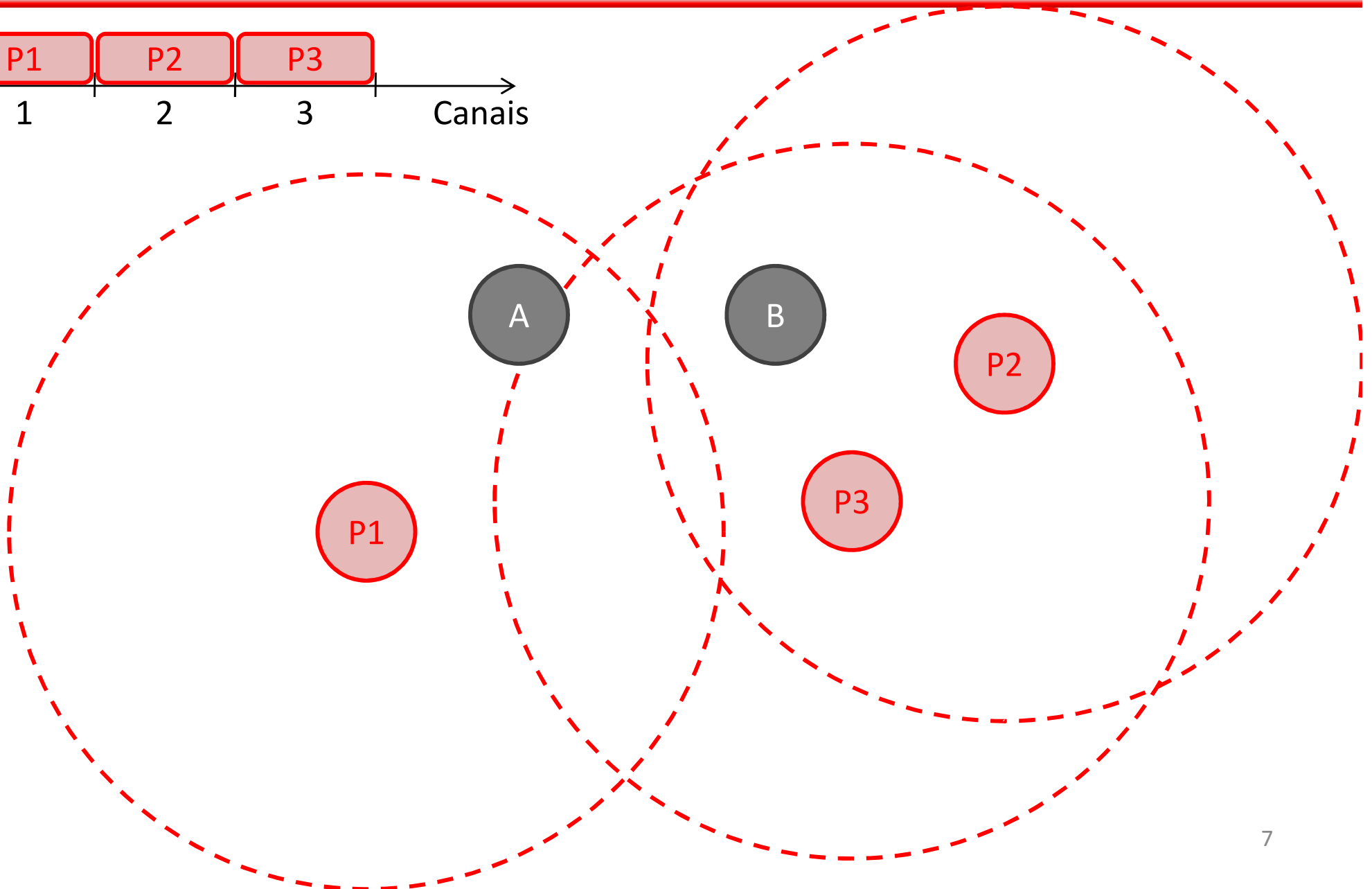
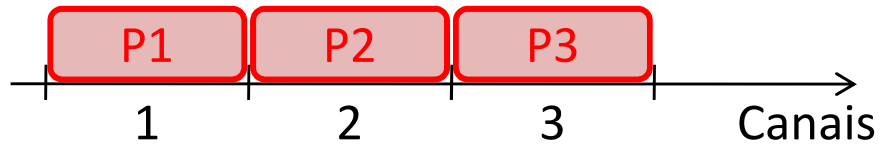
# Acesso Secundário



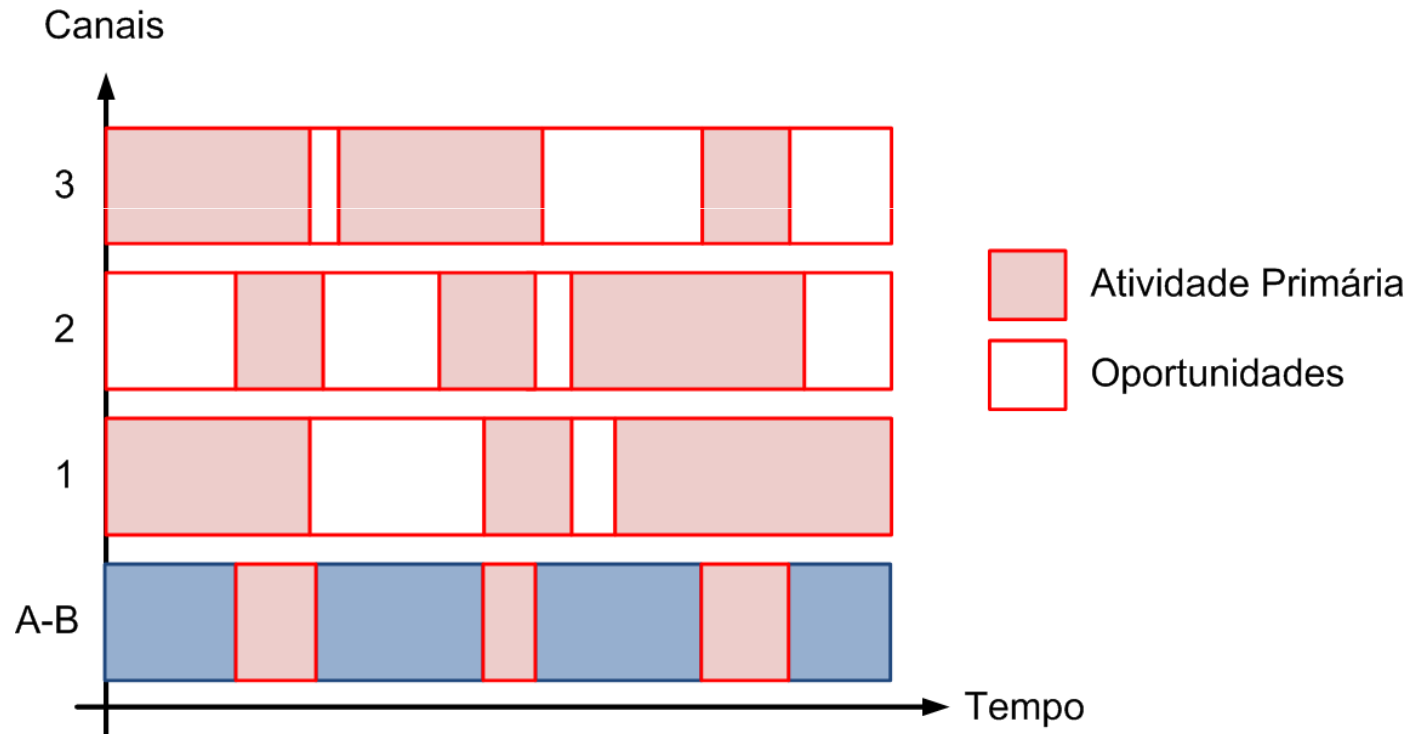
# Acesso Secundário



# Acesso Secundário



# Oportunidades Dinâmicas



- Grande dependência da atividade dos rádios primários
- Em cenários com atividade dinâmica dos primários
  - Frequentes interrupções nos enlaces entre rádios cognitivos
  - Problemas para o roteamento em redes de múltiplos saltos



# Roteamento em Redes Cognitivas com Oportunidades Dinâmicas

---

- Frequentes quebras de enlace → topologia dinâmica
  - Sobrecarga de informação de controle
  - Rotas com curto tempo de vida
  - Destinos inalcançáveis
- Demanda por novas soluções para minimizar o impacto da disponibilidade dinâmica dos enlaces sobre o roteamento em redes cognitivas

# Duas Propostas

---

1. Arquitetura de rede em malha híbrida
  - Rádios 802.11 em conjunto com rádios cognitivos
2. Protocolo de roteamento (RoAD)
  - Redes formadas apenas por rádios cognitivos

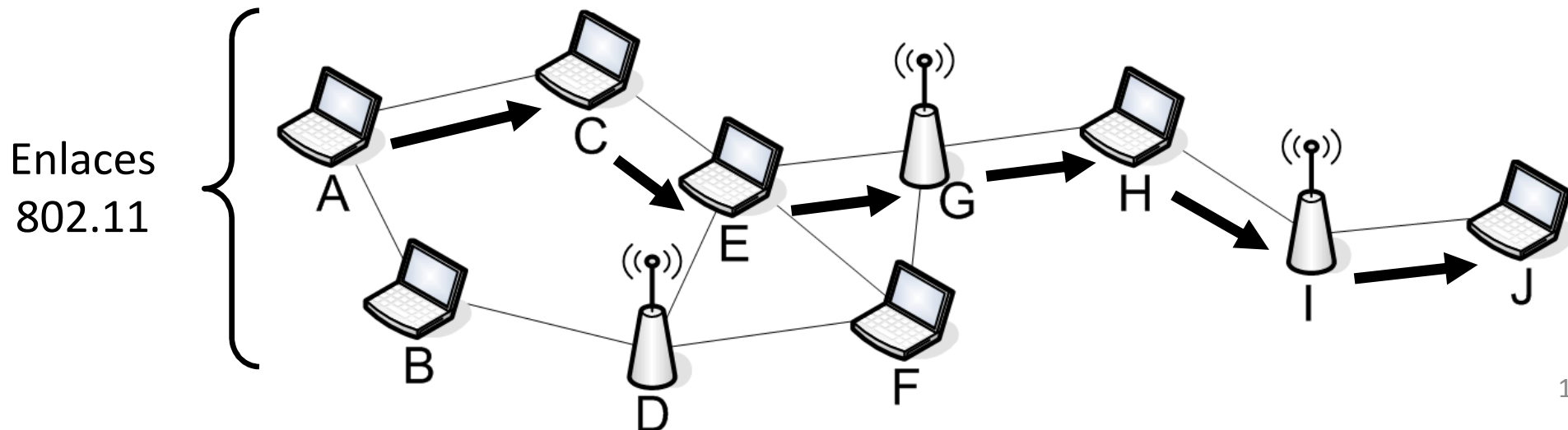
# Proposta 1: Arquitetura Híbrida

---

- IEEE 802.11
  - Alternativa imediata para períodos de indisponibilidade dos rádios cognitivos
    - Acesso ao espectro independente da atividade dos primários
- Rádios cognitivos
  - Adoção gradual
  - Melhorias de desempenho
    - Maior alcance de transmissão → menor freq. de operação
    - Maior capacidade → agregação de canais

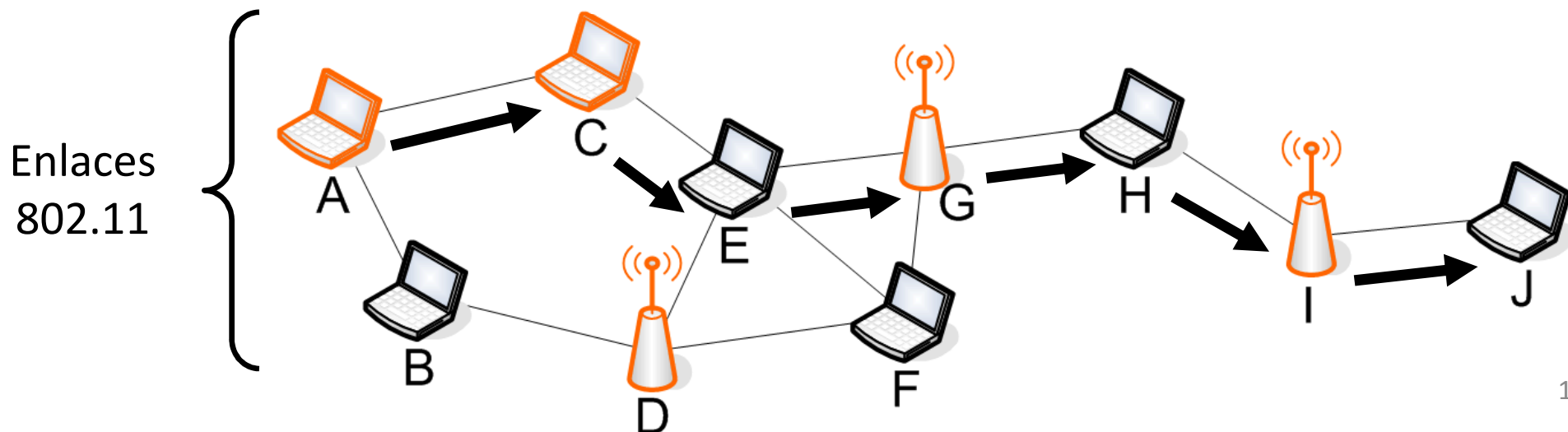
# Topologia da Rede Híbrida

- Criada a partir de uma rede 802.11 preexistente
  - Comunicação em múltiplos saltos

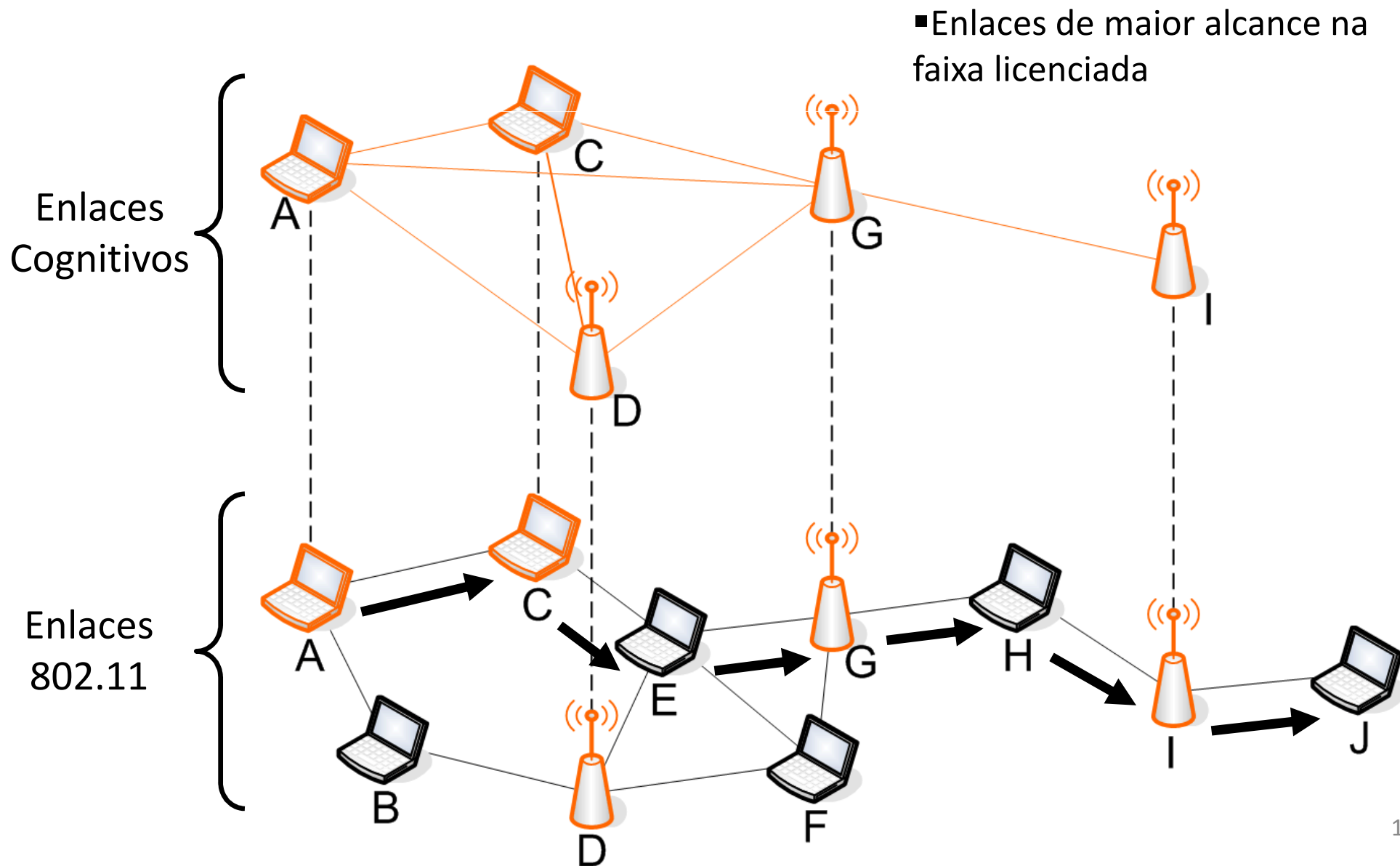


# Topologia da Rede Híbrida

- Criada a partir de uma rede 802.11 preexistente
  - Comunicação em múltiplos saltos
- Interface de rádio cognitivo adicional
  - Nós cognitivos
  - Duas interfaces (802.11 + cognitiva)



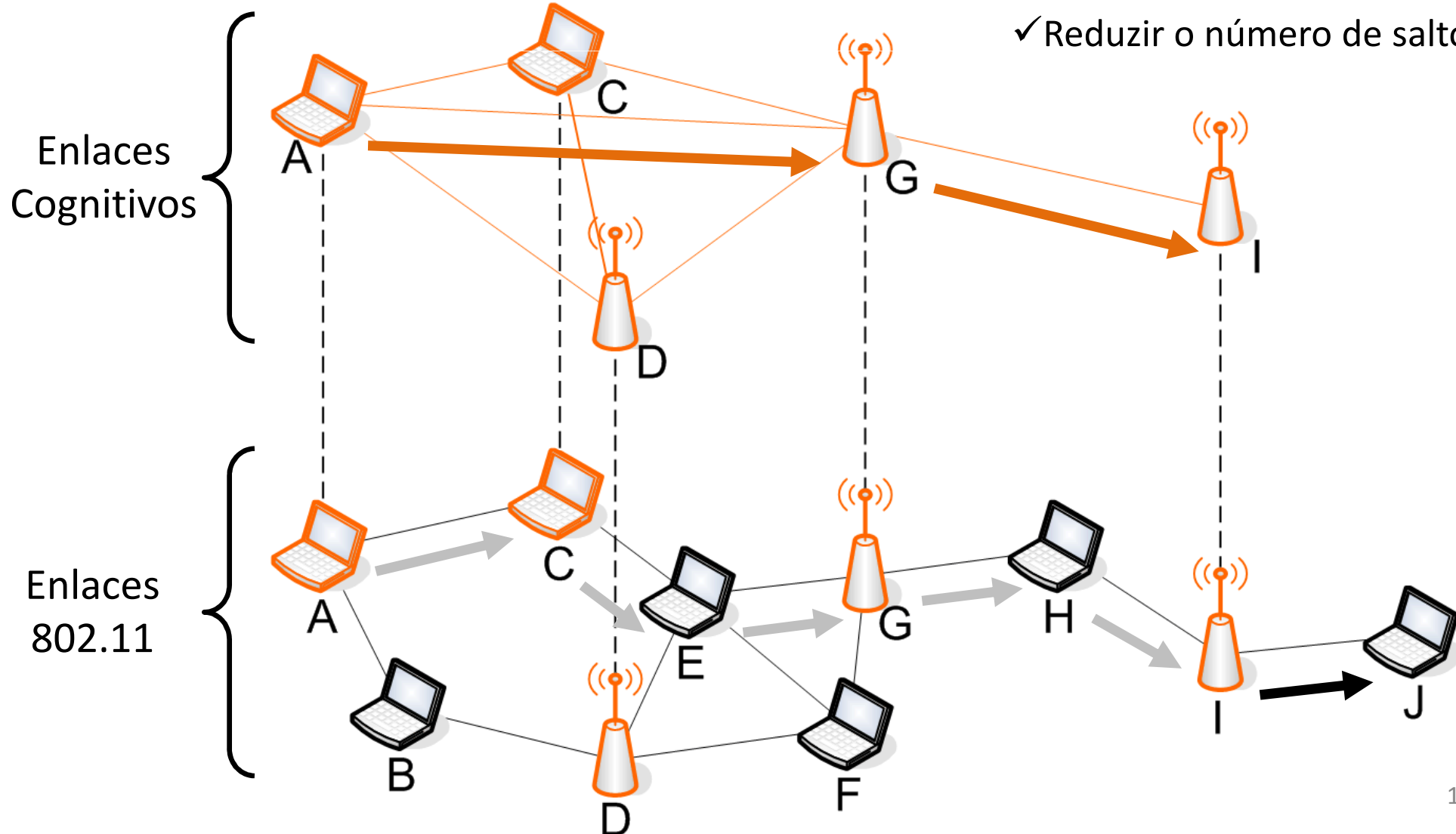
# Rede Sobreposta



# “Enlaces Cognitivos de Atalho”

- Desvio do tráfego
- Rotas híbridas

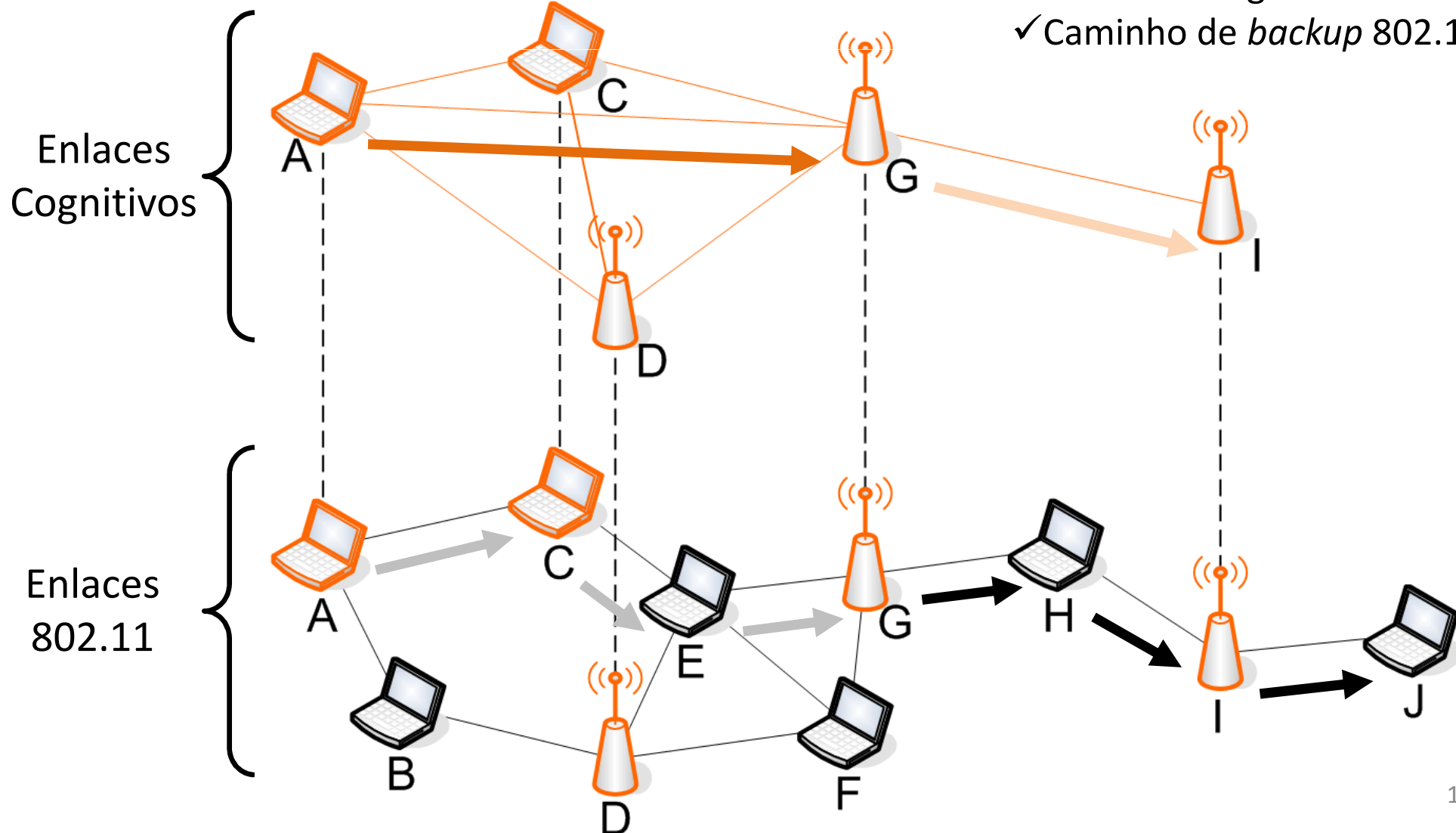
- ✓ Reduzir disputa pelo acesso na faixa não-licenciada
- ✓ Reduzir o número de saltos



# “Enlaces Cognitivos de Atalho”

- Desvio do tráfego
- Rotas híbridas

- ✓ Imunidade às instabilidades nos enlaces cognitivos
- ✓ Caminho de *backup* 802.11!





# Mecanismo de Criação de Atalhos

---

1. Comunicação se inicia por uma rota na rede 802.11
  - “Rota 802.11”
2. Nós cognitivos da rota 802.11 se coordenam através de sondas
  - Descobrir todos os enlaces cognitivos de atalho
3. Algoritmo SPF
  - Entrada → Enlaces da rota 802.11 + enlaces cognitivos de atalho
  - Resultado → Rota híbrida com o melhor conjunto de atalhos
  - Pesos dos enlaces determinam quais atalhos serão utilizados
    - Pesos iguais → rotas híbridas mais curtas
4. Escolha é notificada aos demais nós cognitivos

# Influência do Protocolo de Roteamento da Rede 802.11

---

- Roteamento na rede 802.11 pode criar rotas que passem preferencialmente por nós cognitivos
  - Maior probabilidade de enlaces de atalho
- Estado do enlace → Novas métricas de atribuição de pesos aos enlaces 802.11
  - Pesos iguais (EQUAL)
  - Número de nós cognitivos no enlace (NRC)
  - Percentual de canais livres (POP)

# Abordagem Alternativa: Criação Direta de Rotas Híbridas

---

- Usar grafo completo no roteamento da rede 802.11
  - Todos os enlaces 802.11 e cognitivos
- Vantagem
  - Descoberta de rotas híbridas ótimas
- Desvantagem
  - Enlaces cognitivos não possuem *backups* 802.11
- Possível solução → Descoberta de *backups* 802.11 para cada enlace cognitivo da rota híbrida
  - Também não resolve → Formação de *loops* de roteamento

# Avaliação de Desempenho

---

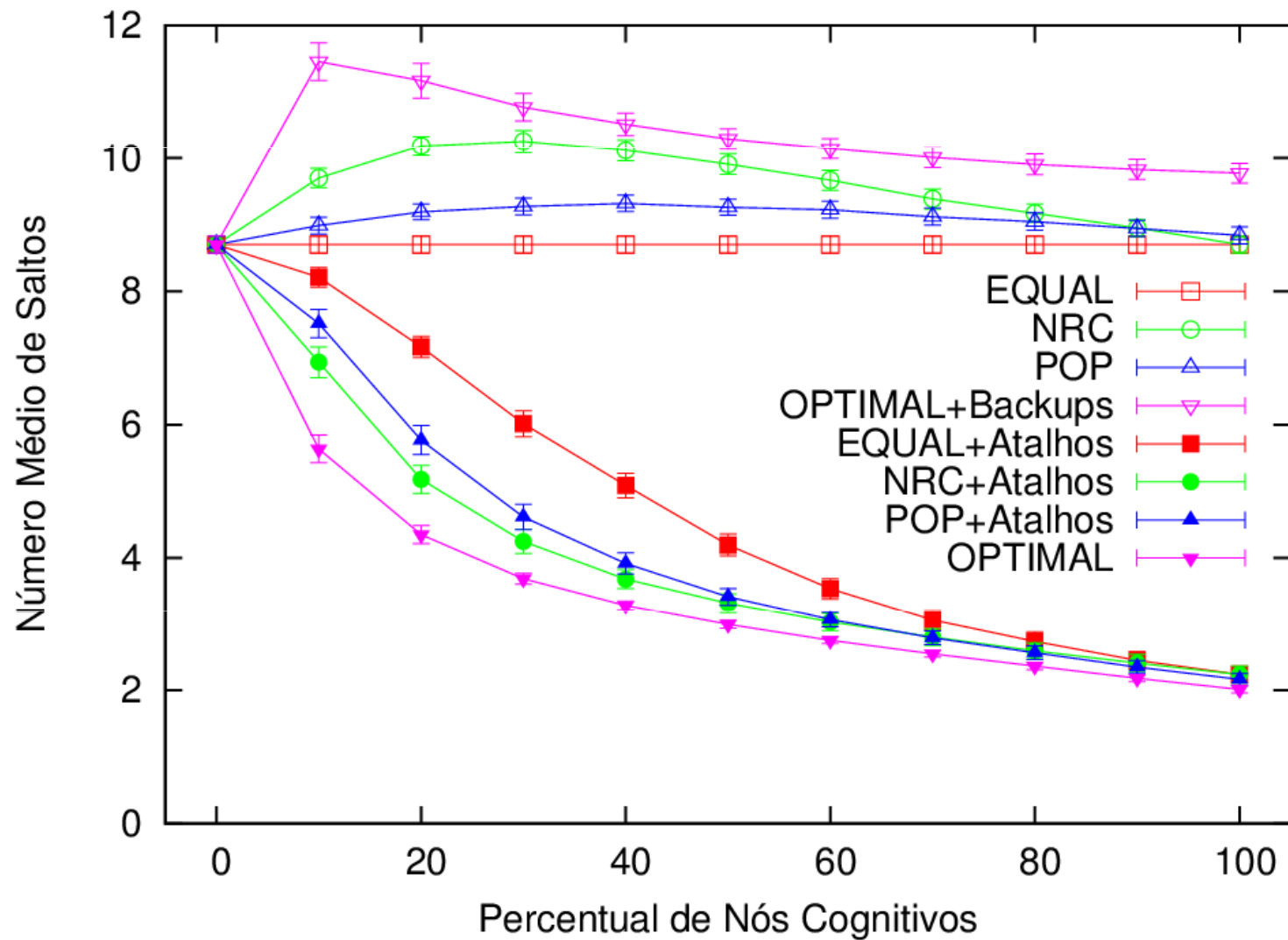
- Simulador próprio em TCL
  - Análises dos grafos e das rotas de cenários de rede híbrida
  - Implementação simplificada dos mecanismos
  - Número de saltos das rotas
- Algoritmo SPF
  - Protocolo de roteamento de estado de enlace na rede 802.11
  - Mecanismo de criação de atalhos
  - Criação direta de rotas híbridas (OPTIMAL)
    - Algoritmo guloso para a descoberta de *backups* 802.11

# Cenários no Simulador Próprio

---

- 30 cenários
- Posicionamento aleatório de 200 nós
- Área quadrada de 1000 metros de lado
- Alcance dos rádios 802.11: 80 metros
- Alcance dos rádios cognitivos: 320 metros
- Pesos dos enlaces 802.11: EQUAL, NRC e POP
- Faixa licenciada: 9 canais
- 2 pares de rádios primários em cada canal
  - Influência estática sobre os rádios cognitivos
- Métrica de desempenho
  - Número médio de saltos de todas as rotas entre todos os nós
    - $N*(N-1)$  rotas

# Número de Saltos Médio



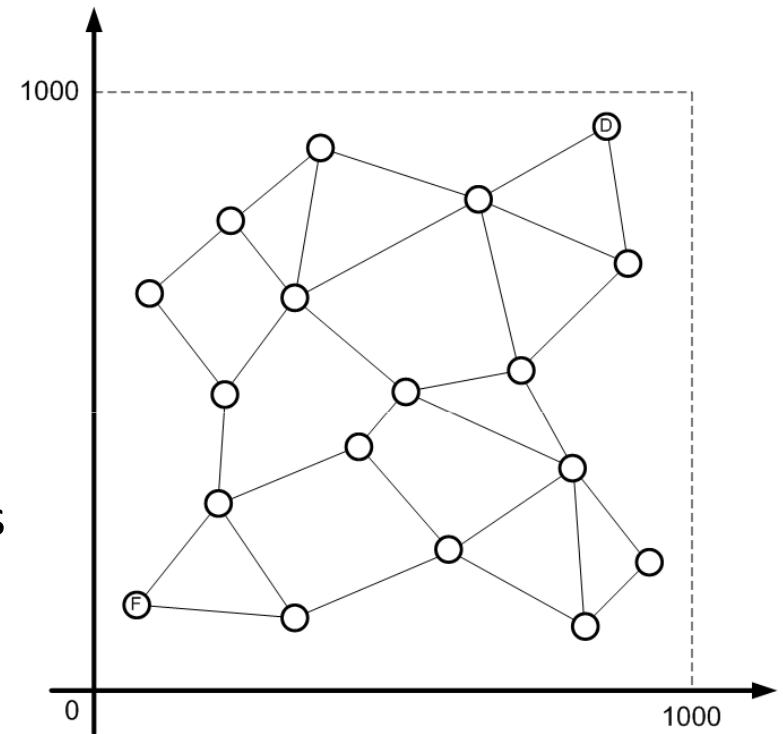
# Avaliação com ns-2

---

- Outras métricas de desempenho
  - Vazão e atraso
  - Validar ganhos da redução do número de saltos
- Diversas modificações no ns-2 original
  - Múltiplos canais e múltiplas interfaces
  - Protocolo MAC específico para rádios cognitivos
    - [Yuan *et.al.* 2007]
  - Influência dos primários
    - Pares de rádios primários
    - Atividade do tipo ON-OFF de média exponencial

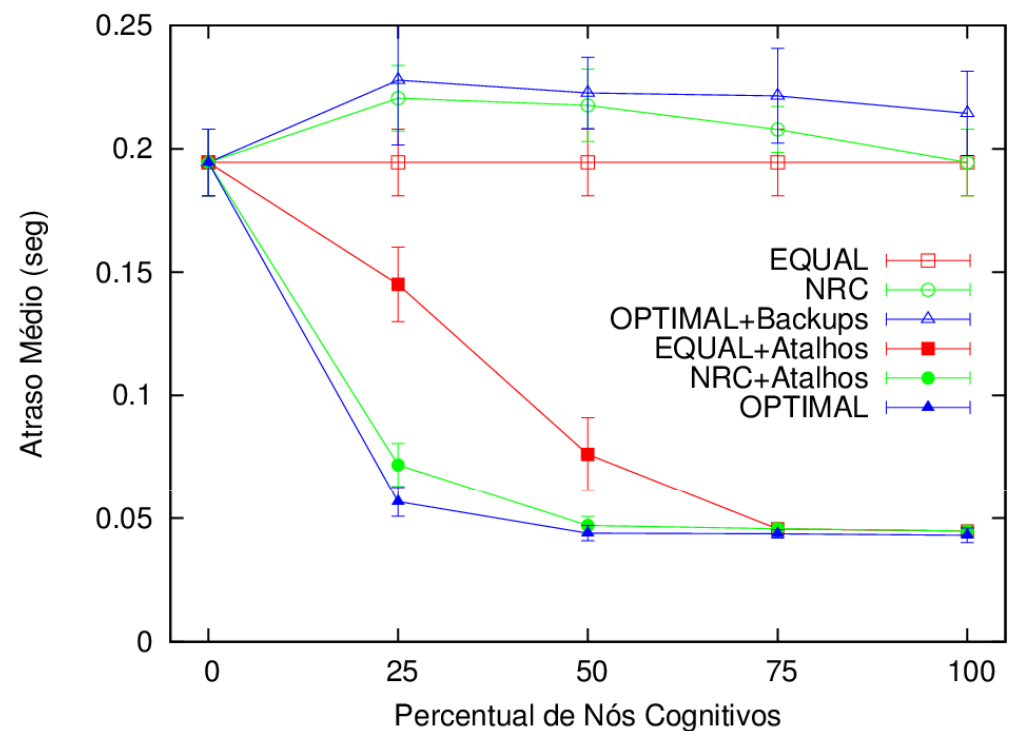
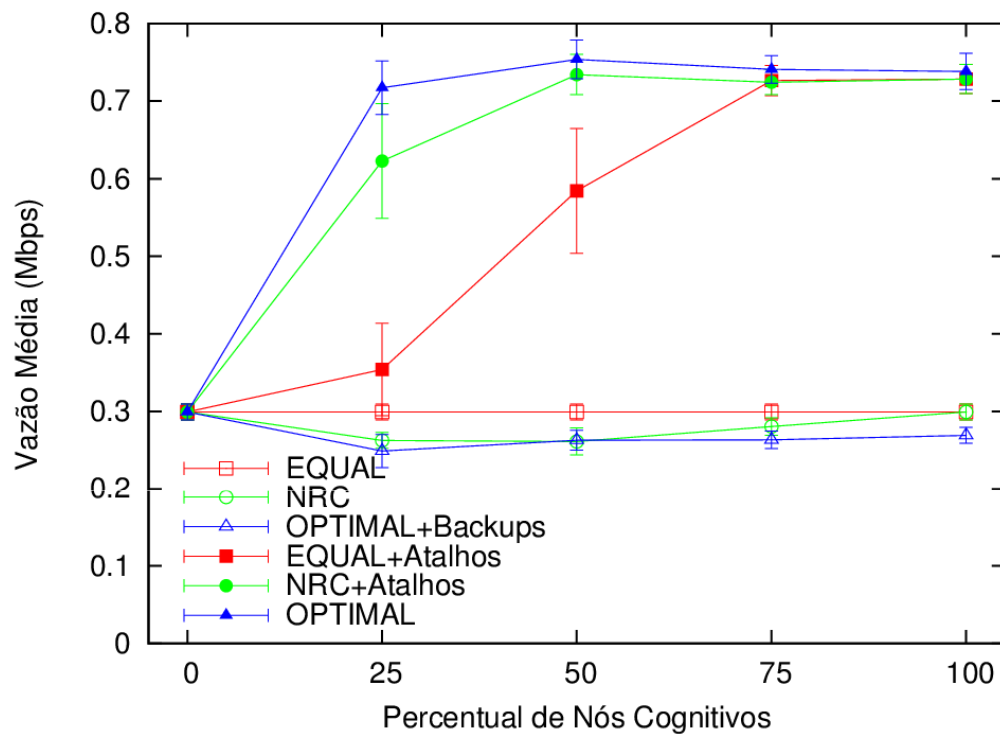
# Cenários no ns-2

- Mesmos cenários do simulador próprio
- Simulação de um fluxo de dados
  - Fonte e destino em cantos opostos do cenário
  - Tráfego CBR
    - Taxa de 1 Mbps
    - Pacotes de 512 bytes
    - Duração de 500s
- Métricas → Vazão e atraso
- Dois conjuntos de resultados
  - Sem influência dos primários
    - Todos os enlaces cognitivos disponíveis
    - Apenas com caminhos de *backup*
  - Com influência dos primários
    - Caso prático



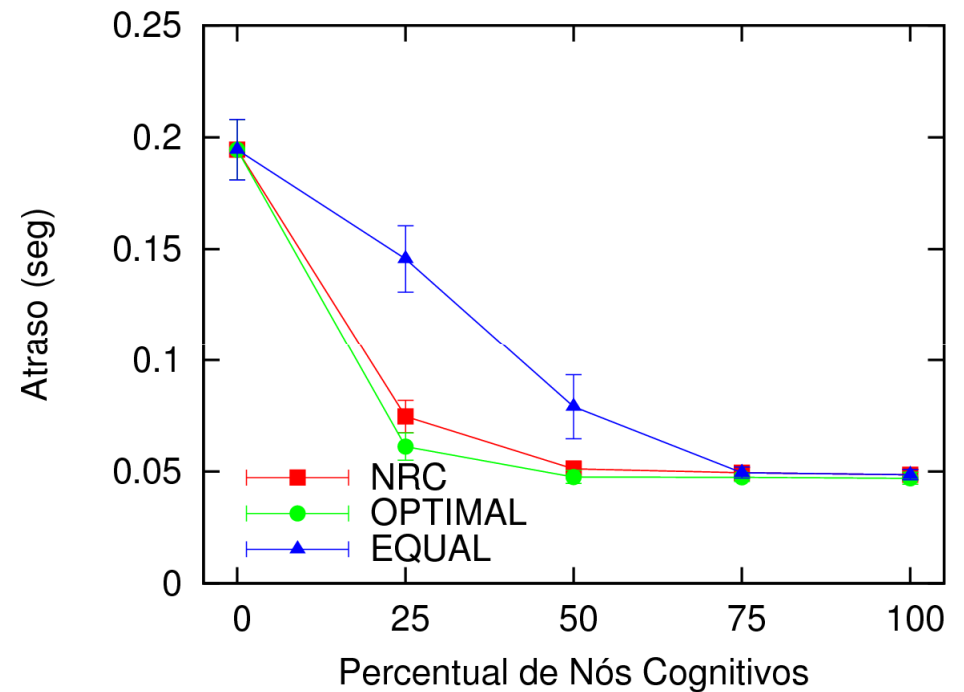
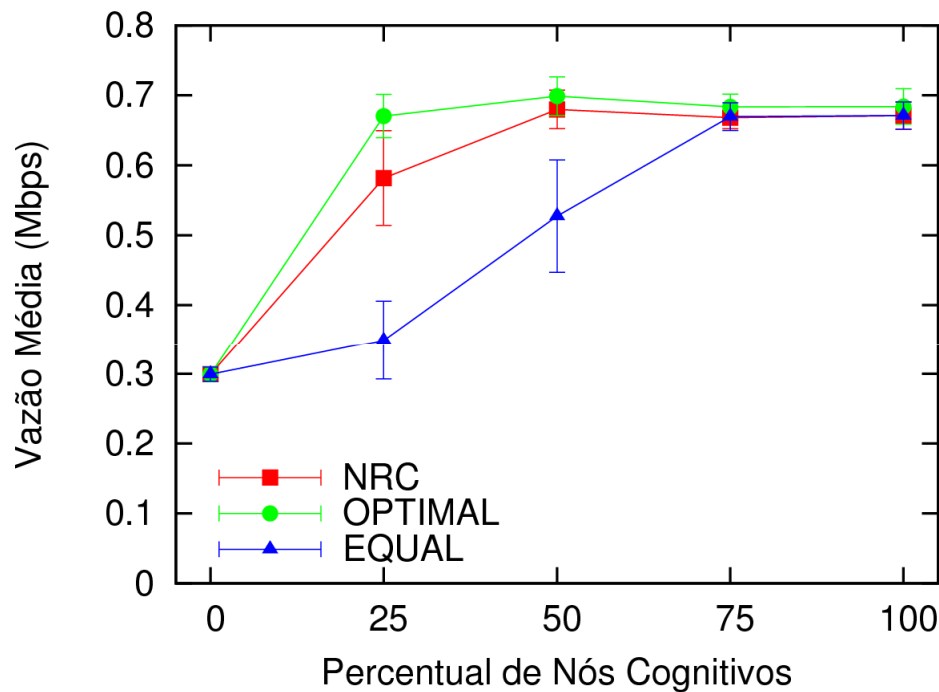


# Sem Influência dos Primários



# Com Influência de Primários

- 9 pares de primários
- $\mu_{on} = 1s$  e  $\mu_{off} = 5s$



# Conclusões (Arquitetura Híbrida)

---

- Arquitetura Híbrida
  - Imunidade às instabilidades dos enlaces cognitivos
    - Rotas de *backup* 802.11
- Mecanismo de Criação de Atalhos
  - Viabiliza o uso oportunista dos enlaces cognitivos
    - Garante a existência dos caminhos de *backup* 802.11
  - Melhorias de desempenho
    - Reduz o tamanho das rotas 802.11

# Redes Formadas Somente por Rádios Cognitivos

---

- Roteamento deve encontrar alternativas para a topologia dinâmica na própria rede cognitiva
- Proposta 2: Protocolo RoAD
  - RoAD – Roteamento de Alta Disponibilidade
  - Objetivo → Descobrir rotas muito disponíveis e minimizar os impactos da disponibilidade dinâmica dos enlaces cognitivos

# Protocolo RoAD

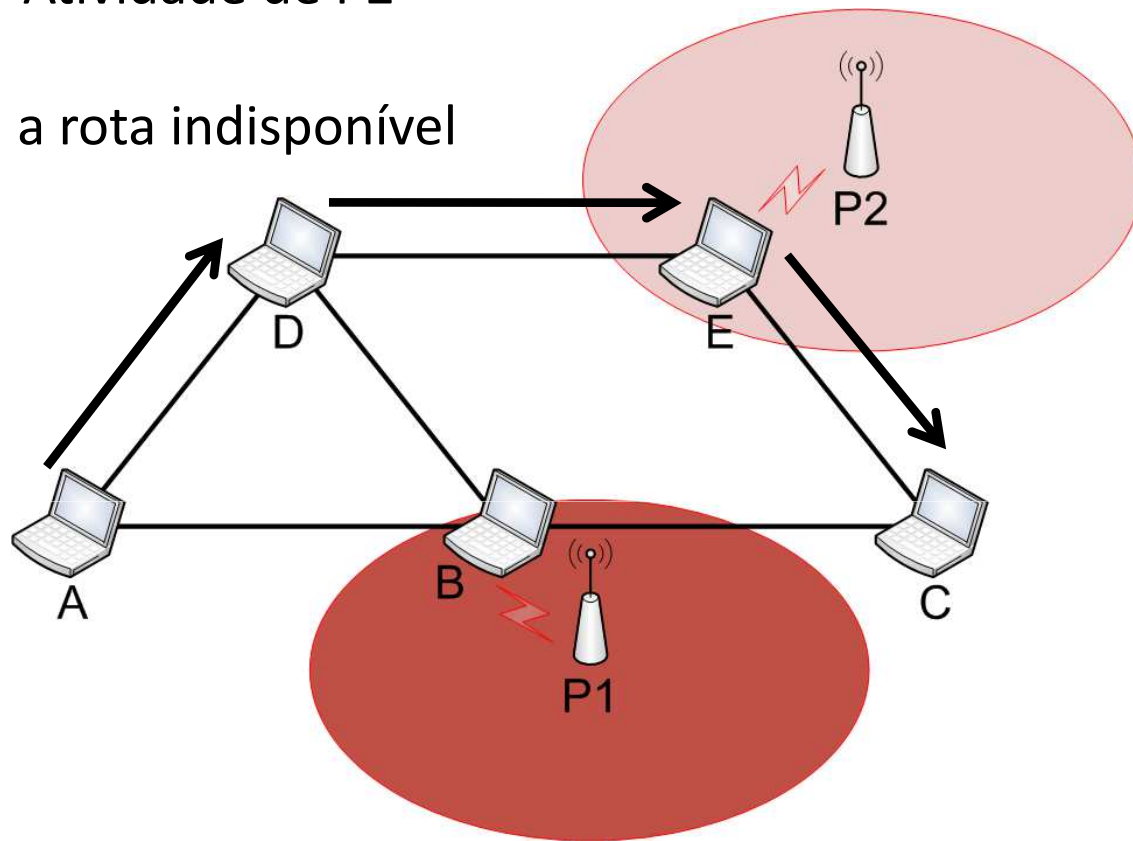
- Protocolo de roteamento pela fonte
  - Canal de controle dedicado
- Funcionamento
  - Inundação periódica
    - Identificadores dos vizinhos
    - Percentual de tempo que cada canal  $k$  está disponível ( $Disp_i^k$ )
  - Grafo da rede
    - Pesos dos enlaces  $\rightarrow$  Nível de indisponibilidade e capacidade

$$Peso_{ij} = \sum_{k=1}^N Indisp_{ij}^k \quad Indisp_{ij}^k = -\log(Disp_i^k \times Disp_j^k \times 0,9 + 0,1)$$

- Algoritmo SPF seleciona a rota mais disponível e com maior capacidade

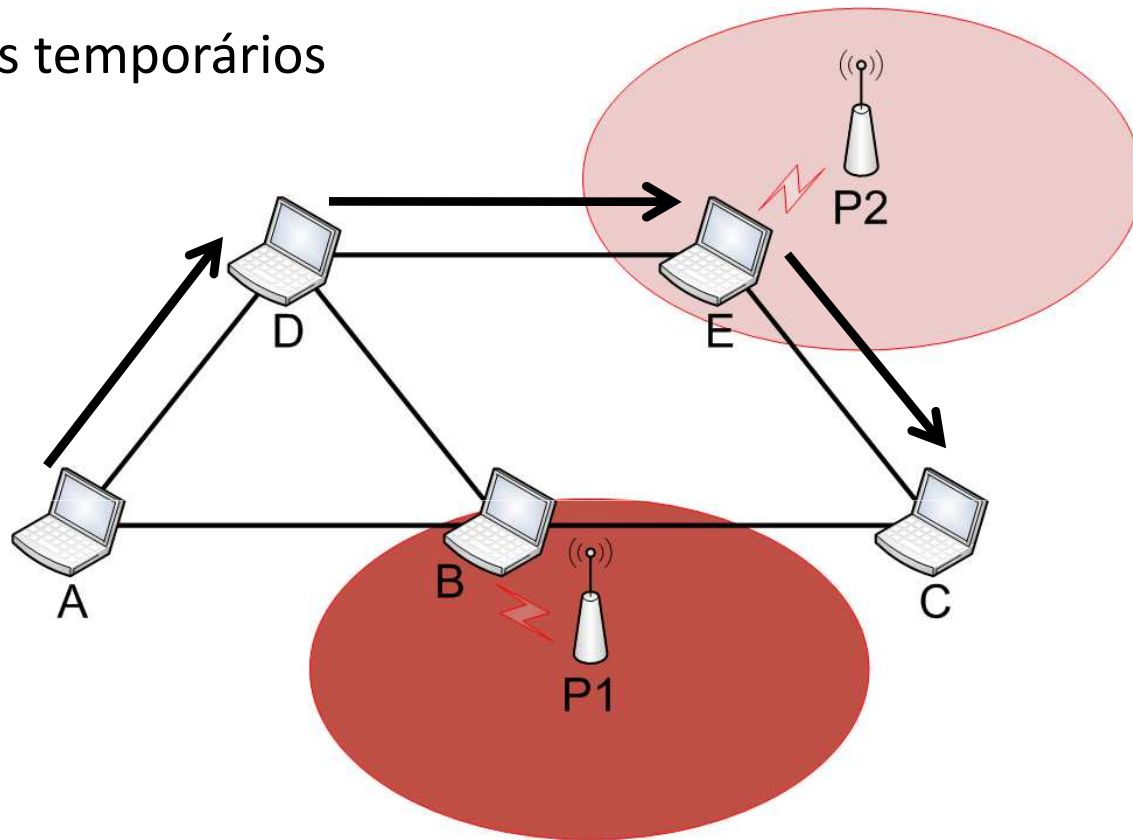
# Problema

- Caminho mais disponível pode ficar indisponível temporariamente
- Comunicação em múltiplos saltos de A para C
  - Atividade de P1 > Atividade de P2
- Atividade de P2 torna a rota indisponível



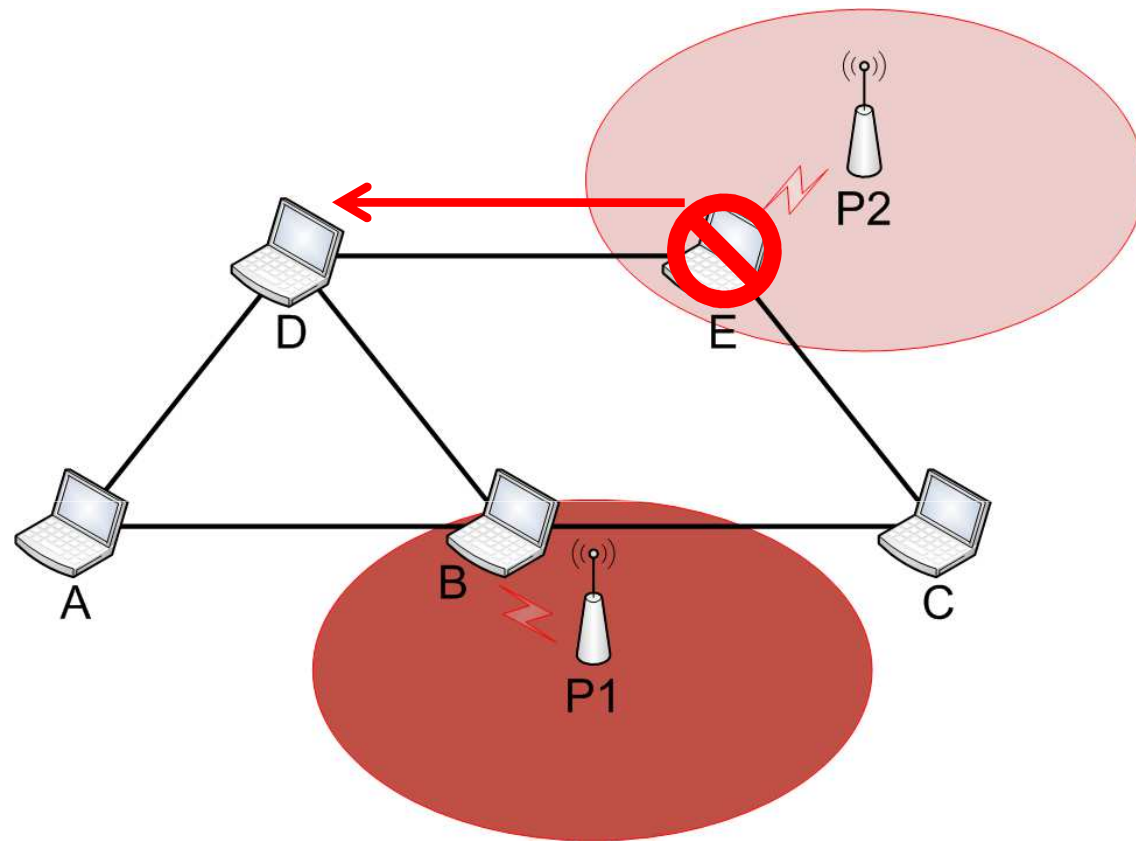
# Problema

- Influência heterogênea dos primários → Diferentes rotas sobre a influência de primários diferentes
- Caminhos alternativos temporários



# Algoritmo de Descoberta de Caminhos Alternativos (DCA)

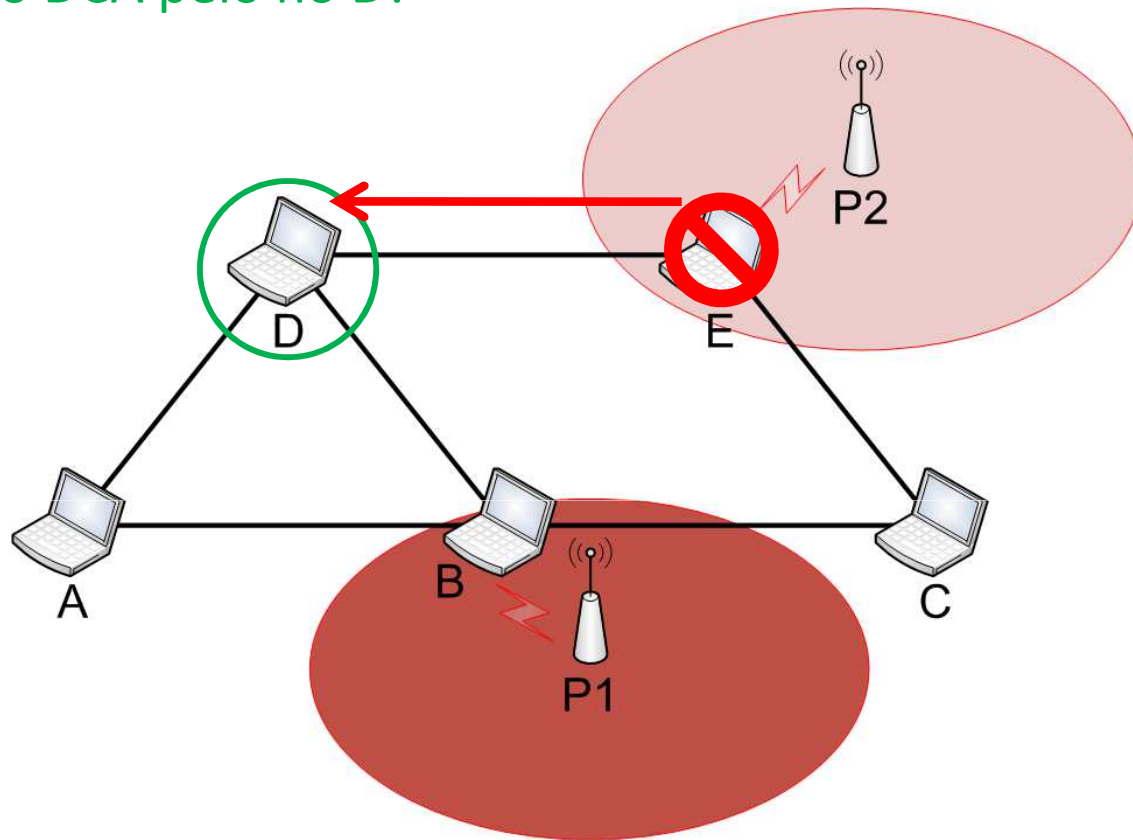
- Nó E fica impedido de se comunicar
- Nó D é sinalizado através do canal de controle





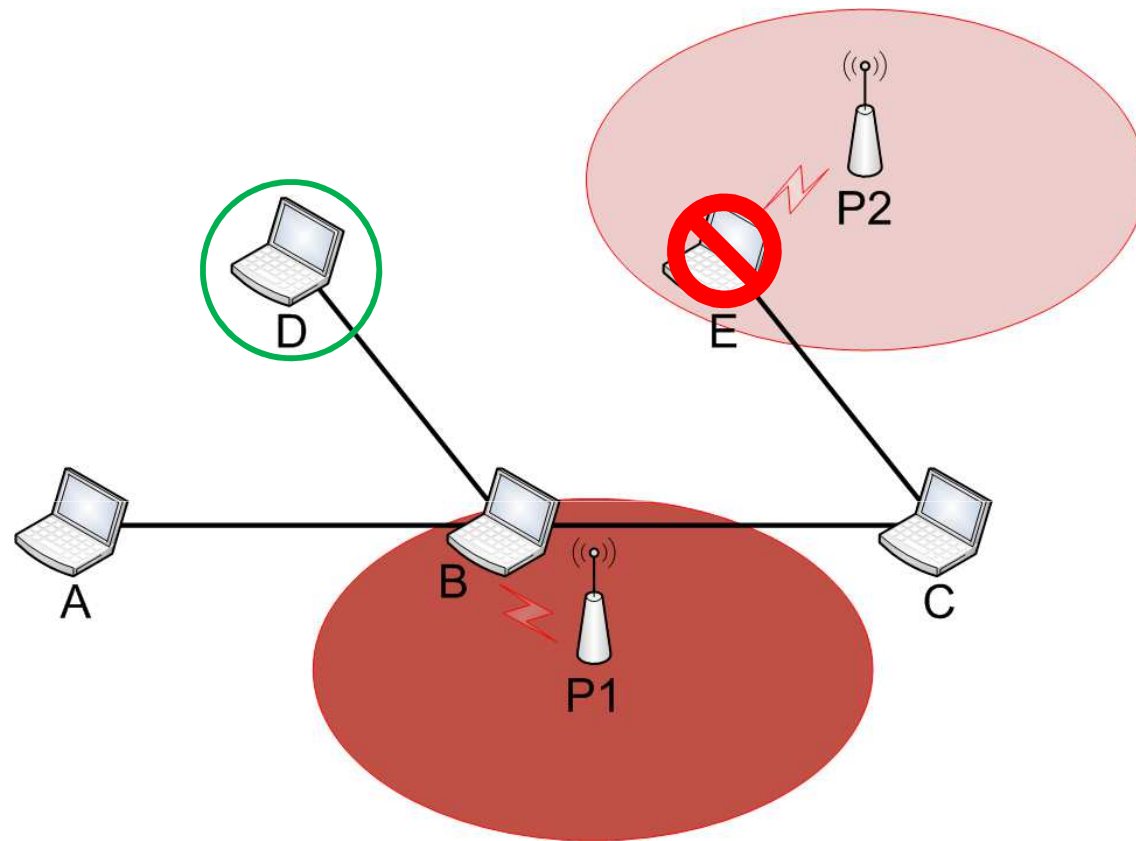
# Algoritmo de Descoberta de Caminhos Alternativos (DCA)

- Nó E fica impedido de se comunicar
- Nó D é sinalizado através do canal de controle
- Execução do algoritmo DCA pelo nó D!



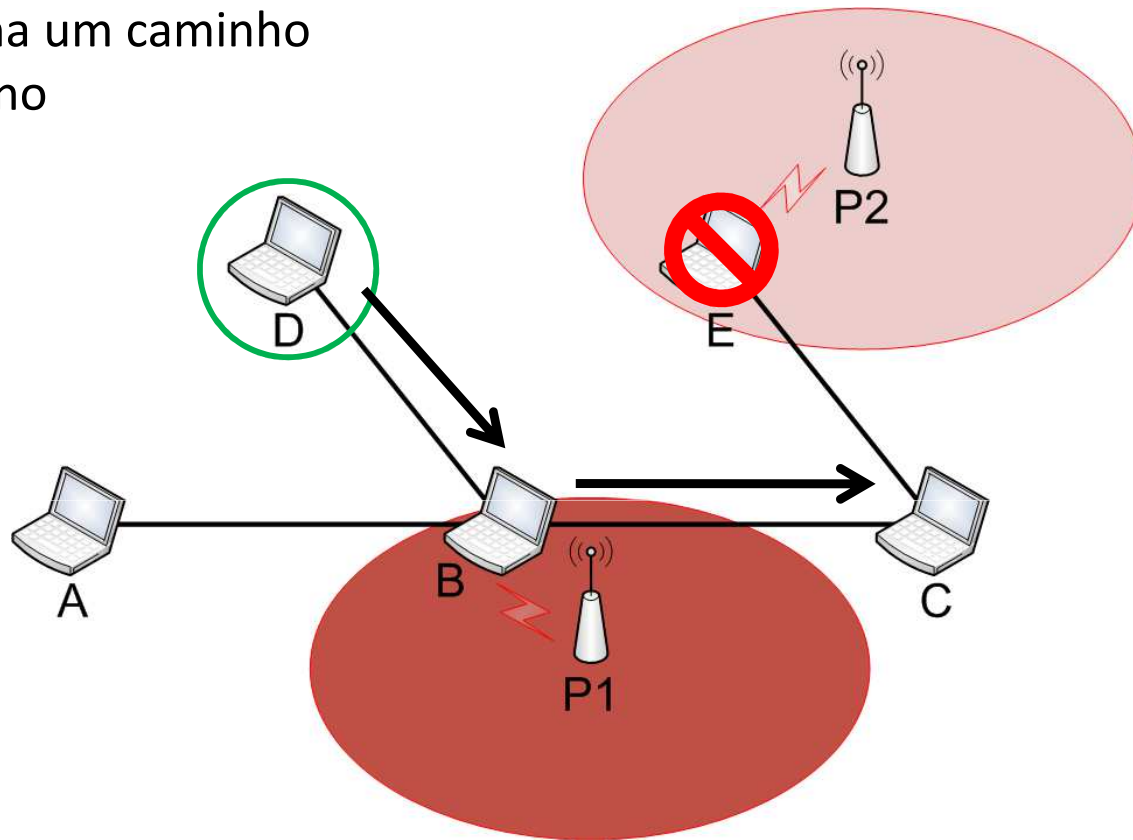
# Funcionamento do Algoritmo DCA

1. Nó D elimina da topologia todos os enlaces conhecidos indesejáveis e que podem formar *loops* de roteamento



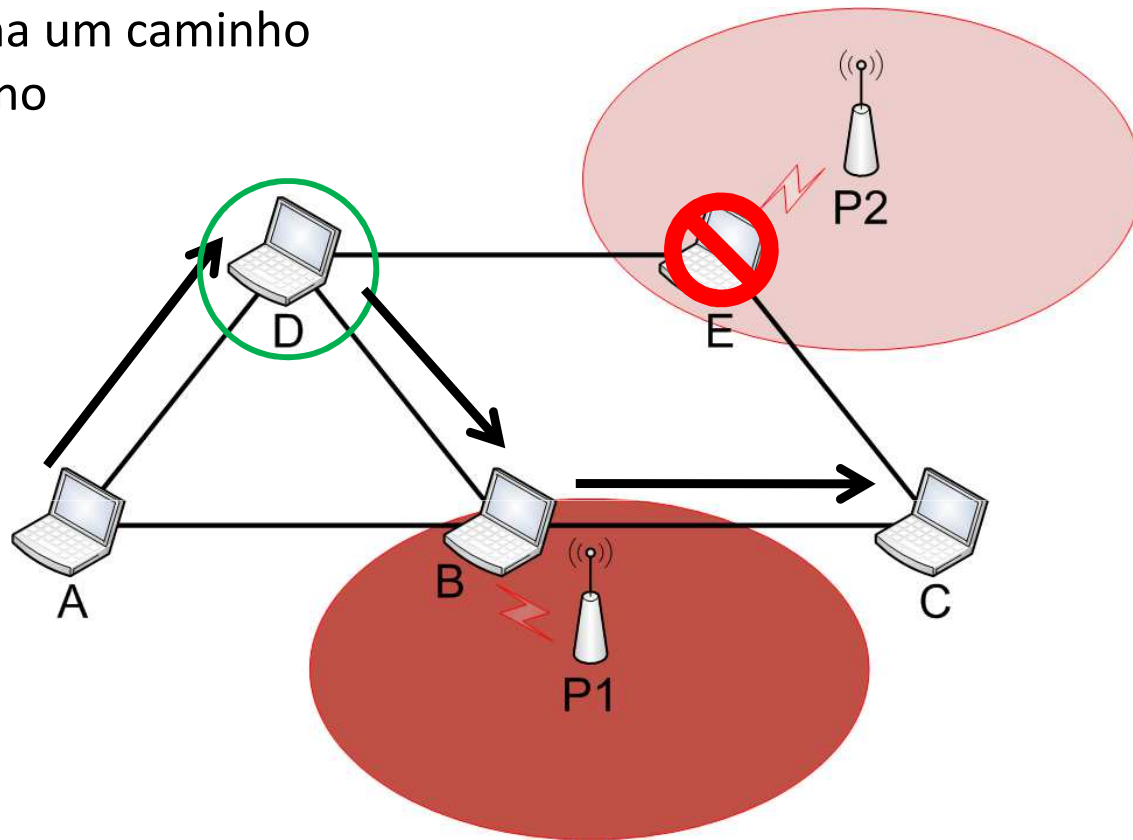
# Funcionamento do Algoritmo DCA

1. Nó D elimina da topologia todos os enlaces conhecidos indispóníveis e que podem formar *loops* de roteamento
2. Algoritmo SPF determina um caminho alternativo para o destino



# Funcionamento do Algoritmo DCA

1. Nó D elimina da topologia todos os enlaces conhecidos indispóníveis e que podem formar *loops* de roteamento
2. Algoritmo SPF determina um caminho alternativo para o destino



- Aproveitar disponibilidades heterogênea dos caminhos alternativos
- Aumento da disponibilidade fim-a-fim

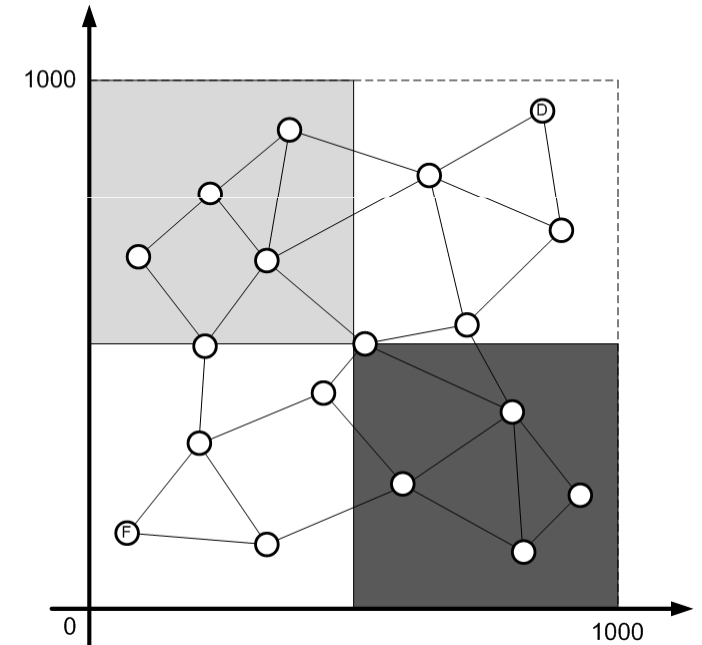
# Avaliação no ns-2

---

- Protocolos de roteamento implementados
  - Protocolo RoAD
  - Roteamento pela fonte (SR – *Source Routing*)
    - Pesos iguais (SR-EQUAL)
    - Métrica de disponibilidade dos enlaces (SR-DISP)
  - Protocolo SAMER [Pefkianakis *et.al.* 2008]
    - Malha de encaminhamento em torno da rota de menor número de saltos
    - Escolha do próximo salto local de acordo com uma métrica que representa disponibilidade

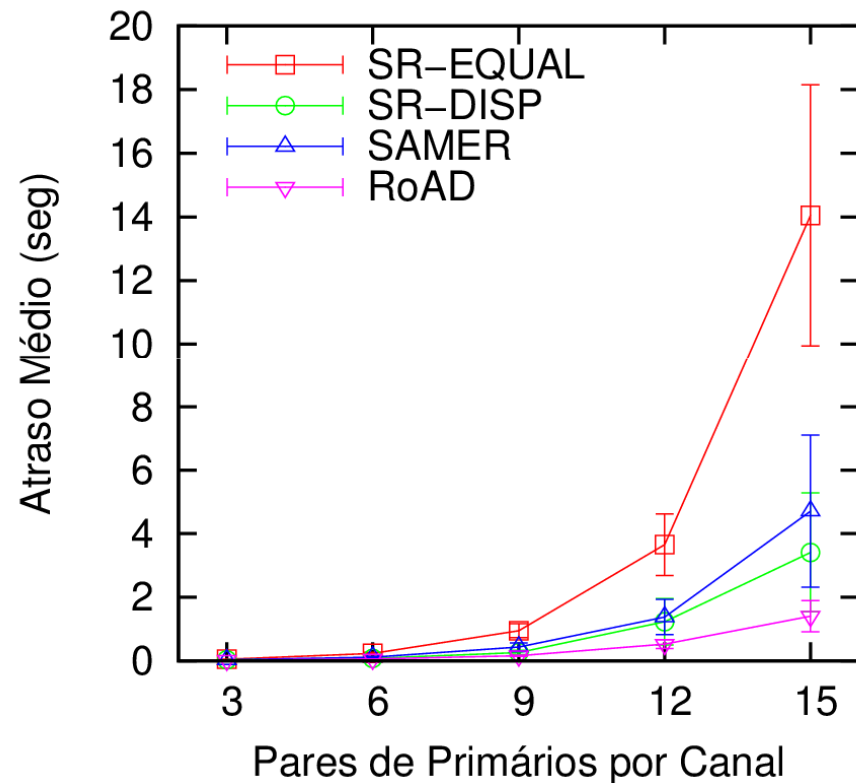
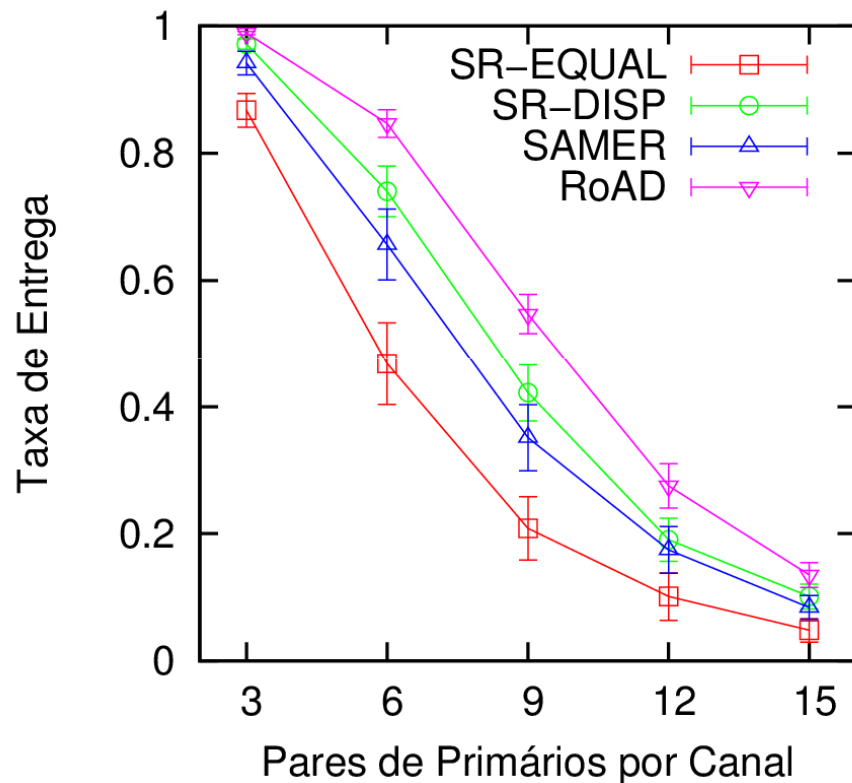
# Cenários de Simulação

- 50 cenários
- 30 nós cognitivos posicionados aleatoriamente
- Área quadrada de 1000 metros de lado
- Alcance de 320 metros
- Um fluxo de dados
  - Fonte e destino em cantos opostos do cenário
  - Tráfego CBR
    - Taxa de 600 Kbps
    - Pacotes de 1500 bytes
    - Duração de 900s
- Pares de primários posicionados em dois quadrantes
- 3 conjuntos de resultados
  1. Número total de pares de primários
  2. Número de canais na faixa licenciada
  3. Padrão de atividade dos pares de primários ( $\mu_{on}$  e  $\mu_{off}$ )



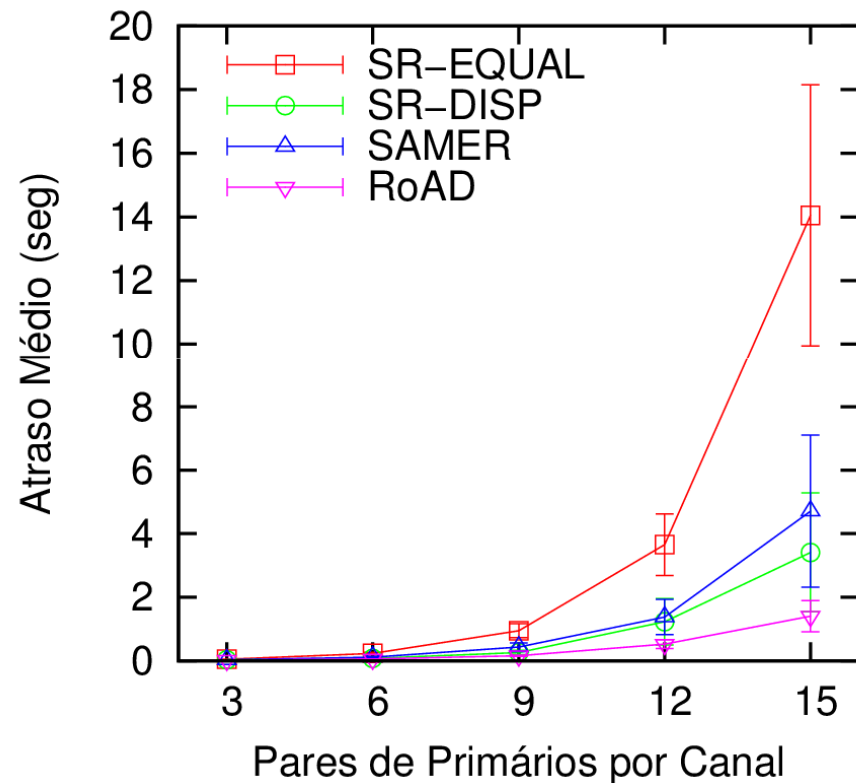
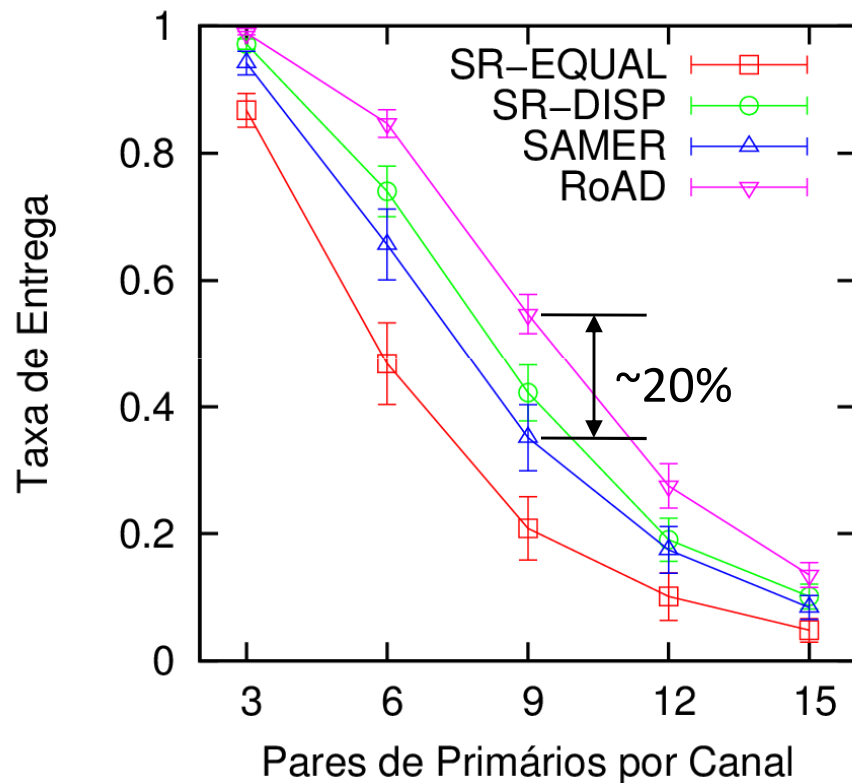
# Número de Pares de Primários

- Parâmetros fixos
  - 5 canais
  - $\mu_{\text{on}}=1\text{s}$  e  $\mu_{\text{off}}=1\text{s}$



# Número de Pares de Primários

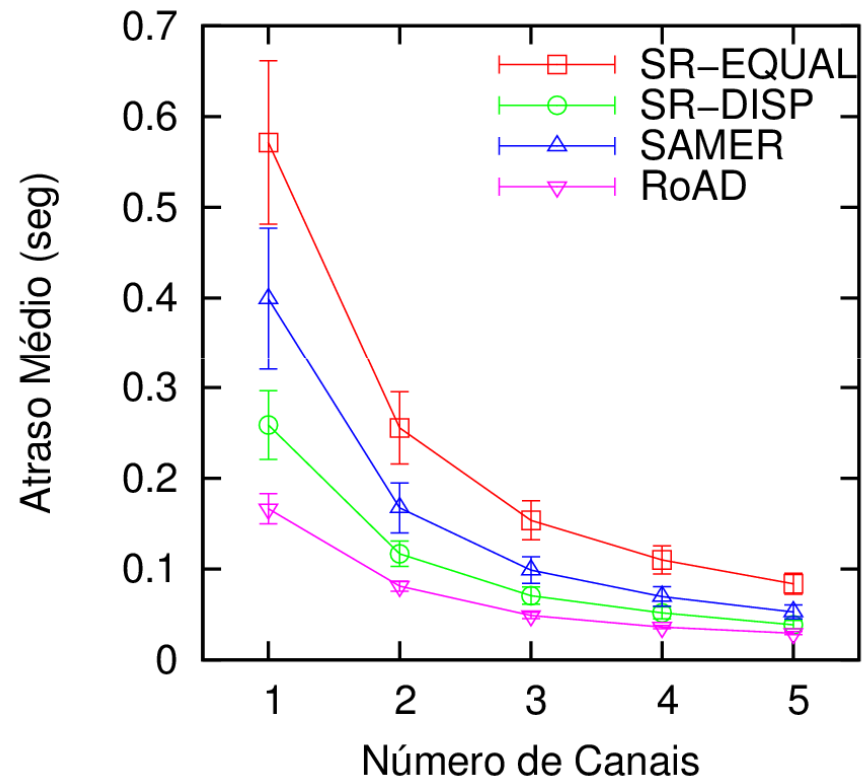
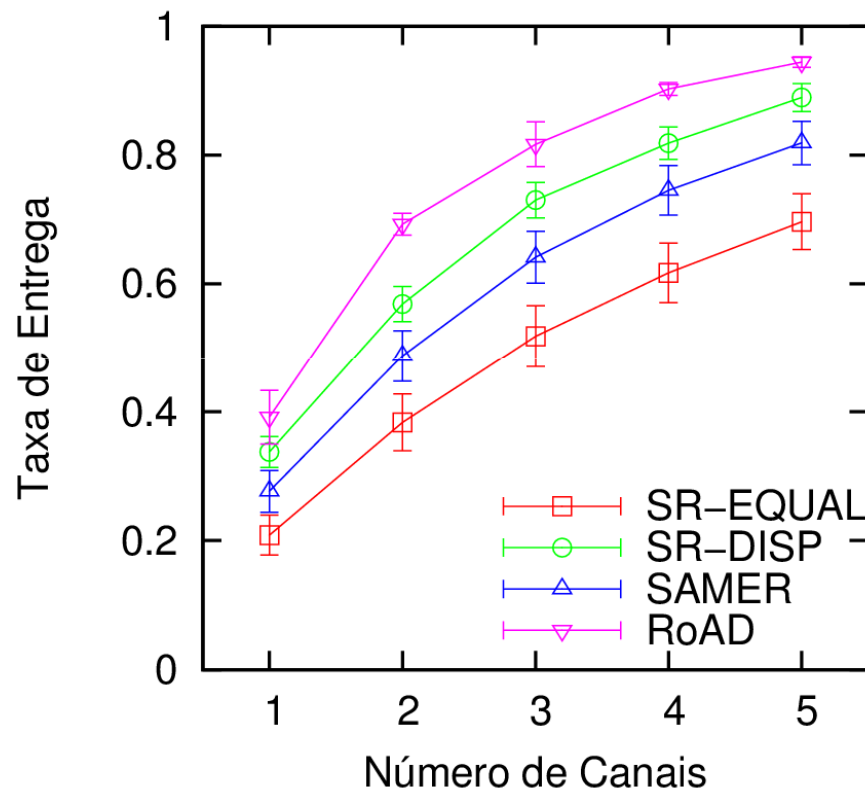
- Parâmetros fixos
  - 5 canais
  - $\mu_{\text{on}}=1\text{s}$  e  $\mu_{\text{off}}=1\text{s}$





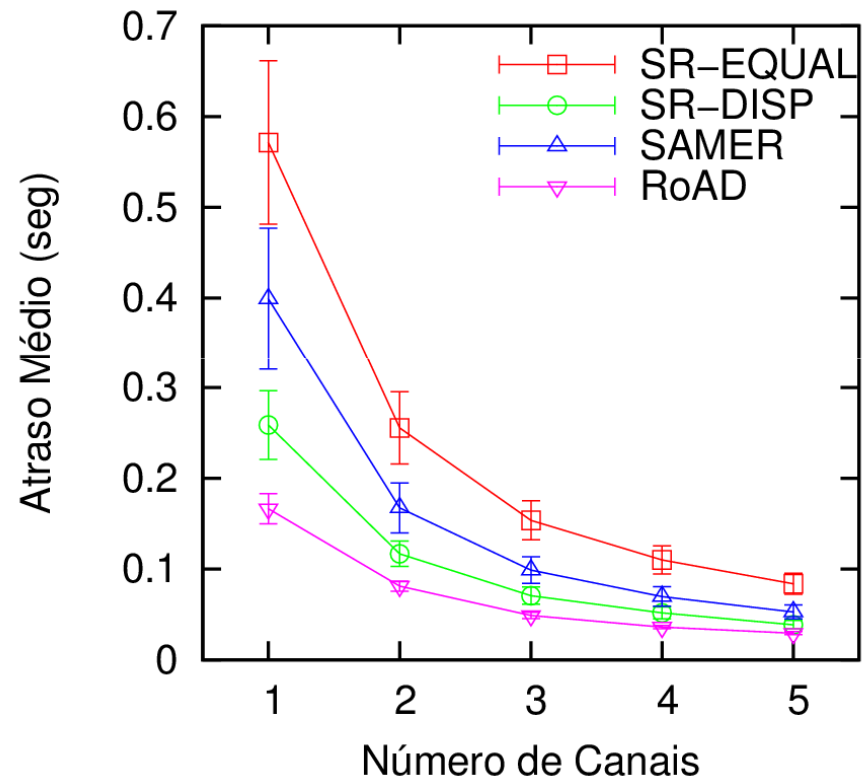
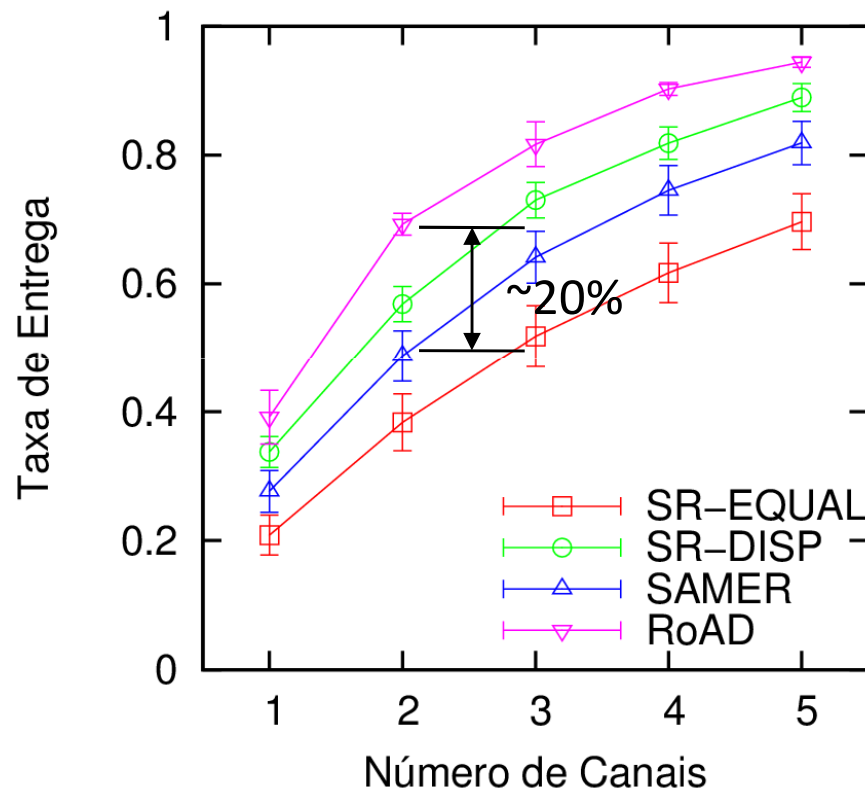
# Número de Canais

- Parâmetros fixos
  - 15 pares de primários
  - $\mu_{\text{on}}=1\text{s}$  e  $\mu_{\text{off}}=5\text{s}$



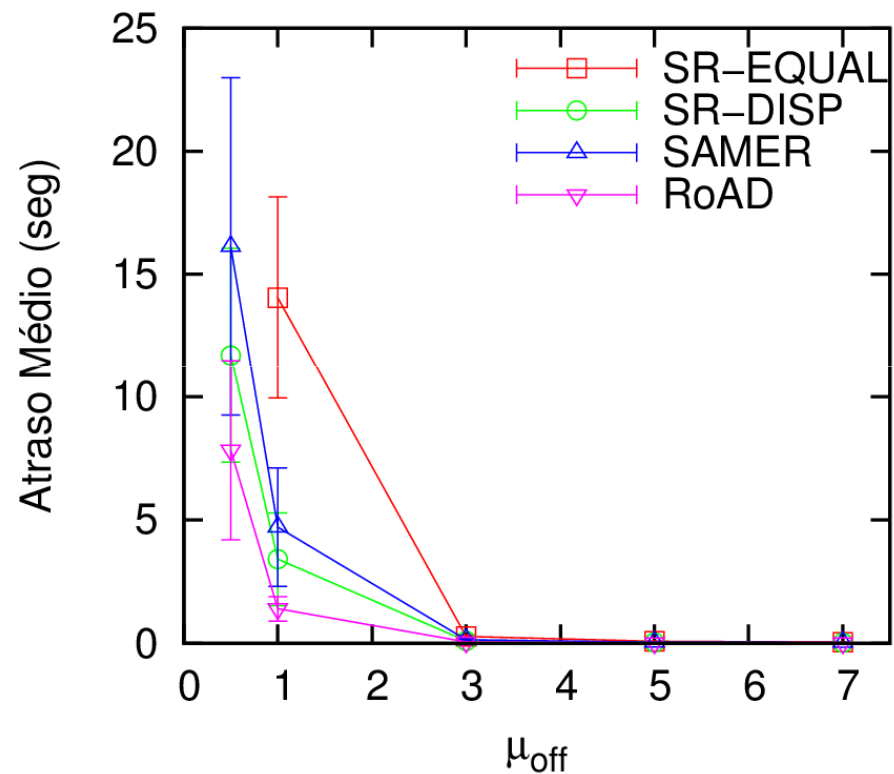
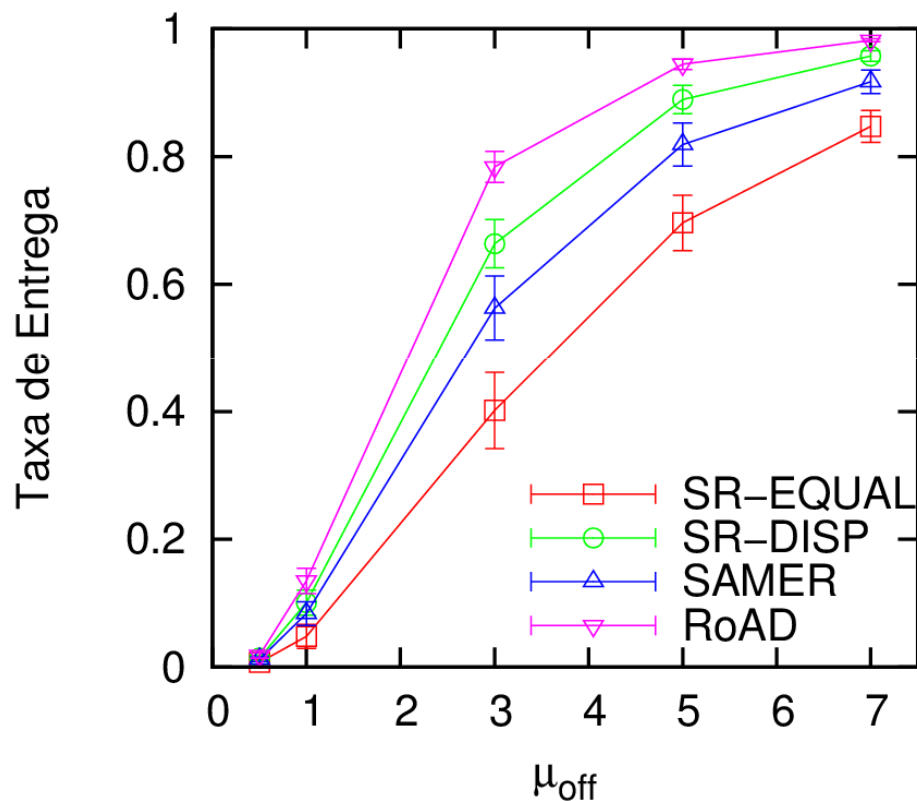
# Número de Canais

- Parâmetros fixos
  - 15 pares de primários
  - $\mu_{\text{on}}=1\text{s}$  e  $\mu_{\text{off}}=5\text{s}$



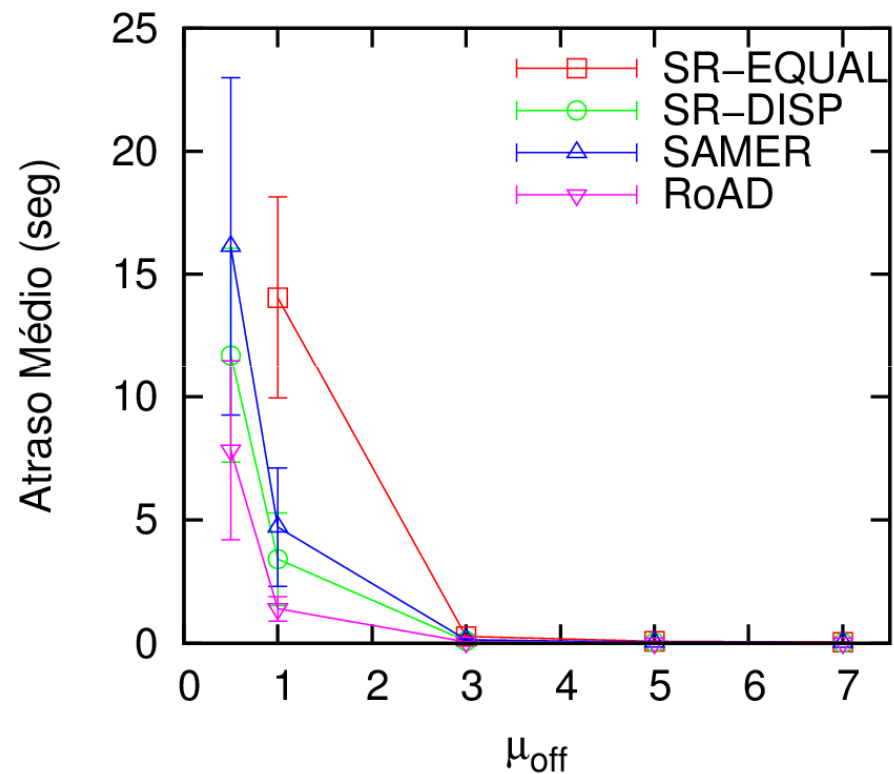
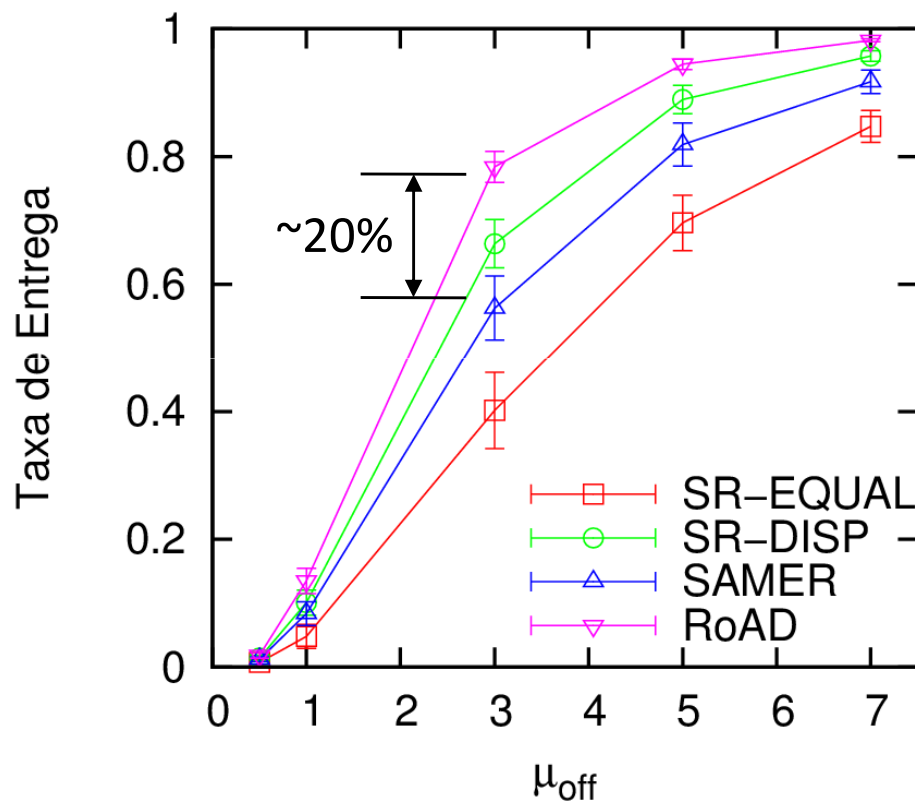
# Tempo Médio em OFF ( $\mu_{\text{off}}$ )

- Parâmetros fixos
  - 5 canais
  - 15 pares de primários,  $\mu_{\text{on}}=1\text{s}$



# Tempo Médio em OFF ( $\mu_{\text{off}}$ )

- Parâmetros fixos
  - 5 canais
  - 15 pares de primários,  $\mu_{\text{on}}=1\text{s}$



# Conclusões (RoAD)

---

- Nível de disponibilidade dos enlaces é um fator importante em redes cognitivas
- Protocolo RoAD
  - Ganhos de desempenho expressivos
    - “Rastrear” a disponibilidade dos enlaces
    - Influência heterogênea dos primários sobre a rede cognitiva → Algoritmo DCA

# Conclusões Finais

---

- Acesso secundário ao espectro
  - Enlaces com disponibilidade dinâmica
  - Problemas para o roteamento
- Contribuições
  - Arquitetura de rede em malha híbrida
    - Solução simples mas ainda não explorada
    - Permite inserção gradual dos rádios cognitivos
    - Garante imunidade às instabilidades dos enlaces cognitivos
  - Protocolo RoAD
    - Aumenta a disponibilidade fim-a-fim das comunicações na rede cognitiva
    - Aproveitamento da influência heterogênea dos primários
  - Desenvolvimento de ferramentas para a avaliação de desempenho de redes cognitivas

# Trabalhos Futuros

---

- Arquitetura de rede híbrida
  - Métricas para os pesos dos enlaces 802.11
  - Métricas para a seleção dos conjuntos de atalhos
  - Metodologias para a escolha dos nós cognitivos
- Protocolo RoAD
  - Proposta de novas métricas
  - Comparação de desempenho com outras propostas
  - Avaliação do impacto de erros na detecção das oportunidades



Obrigado!