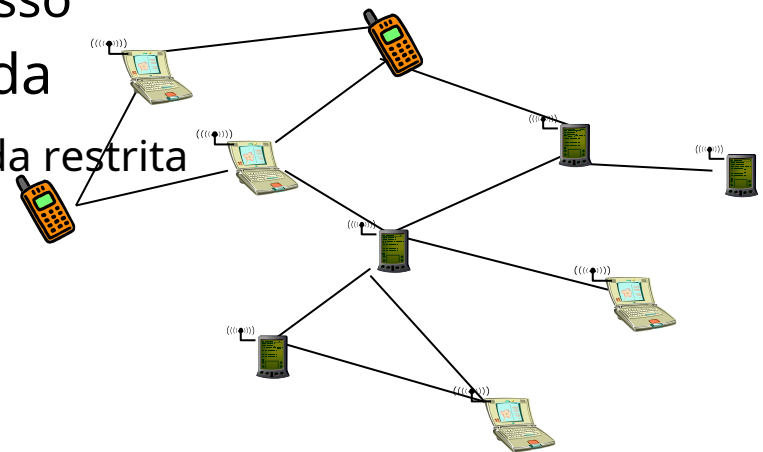


Redes Ad Hoc

**Mestrado em Engenharia de
Computadores e Telemática
2023/2024**

Redes ad-hoc móveis

- Os terminais podem aparecer e desaparecer em qualquer lugar e a qualquer hora, e podem se mover livremente
- Os nós podem atuar como roteadores ou terminais
- Redes formadas de forma independente, podem ser mescladas e divididas a qualquer momento
- Topologias dinâmicas
- Coexistência de diferentes meios de acesso
- A rede é inteligente e auto-organizada
- Links com capacidade variável e largura de banda restrita
- Operação com restrição de energia
- Segurança física limitada



Desafios em ambientes móveis – Ad-hoc aumenta-os

- Limitações da rede sem fio
 - Falta de entidade central para organização disponível
 - Alcance limitado de comunicação sem fio
 - Perda de pacotes devido a erros de transmissão
 - Links de capacidade variável
 - Desconexões/partições frequentes
 - Largura de banda de comunicação limitada
 - Natureza de transmissão das comunicações
- Limitações impostas pela mobilidade
 - Alterando topologias/rotas dinamicamente
 - Falta de consciência de mobilidade por sistema/aplicativos
- Limitações do computador móvel
 - Vida útil curta da bateria
 - Capacidades limitadas

Cenários de aplicação

Aplicações ad hoc

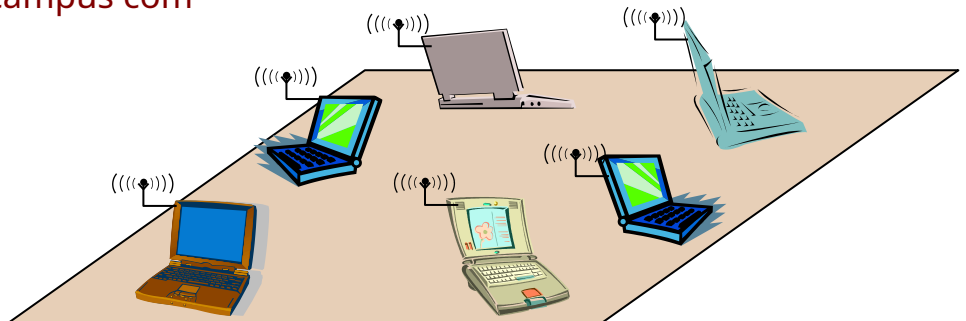
- Rede de área pessoal
 - Celular, laptop, fone de ouvido, relógio de pulso
- Ambientes militares
 - Soldados, tanques, aviões
- Ambientes civis
 - Rede de táxis
 - Sala de reuniões
 - Estádios esportivos
 - Barcos, pequenas aeronaves
- Operações de emergência
 - Busca e resgate
 - Policiamento e combate a incêndio

Cenários de uso – em geral

- A instalação de pontos de acesso fixos e infraestrutura de backbone nem sempre é viável
 - A infraestrutura pode não estar presente numa área de desastre ou zona de guerra
 - A infraestrutura pode não ser prática para rádios de curto alcance; Bluetooth (alcance ~ 10 m)
- Redes ad hoc
 - Não precisa de suporte de infraestrutura de backbone
 - São fáceis de implantar
 - Útil quando a infraestrutura está ausente, destruída ou impraticável
- Ou quando o objetivo é ter
 - Redes autoadaptáveis e autossuficientes
 - Redes que requerem mobilidade
 - Redes móveis
 - Requisito de ausência de qualquer configuração externa e processo de gerenciamento

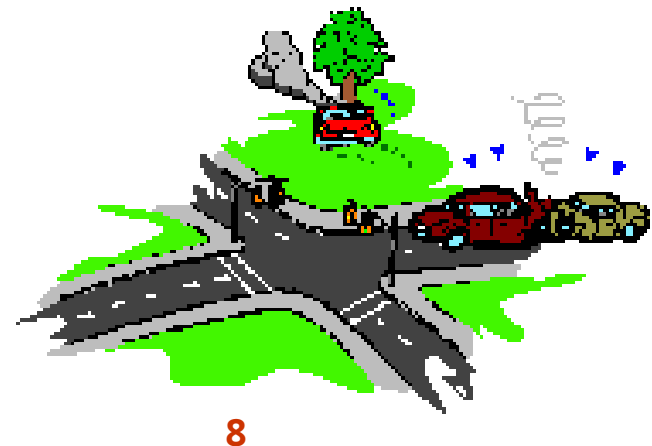
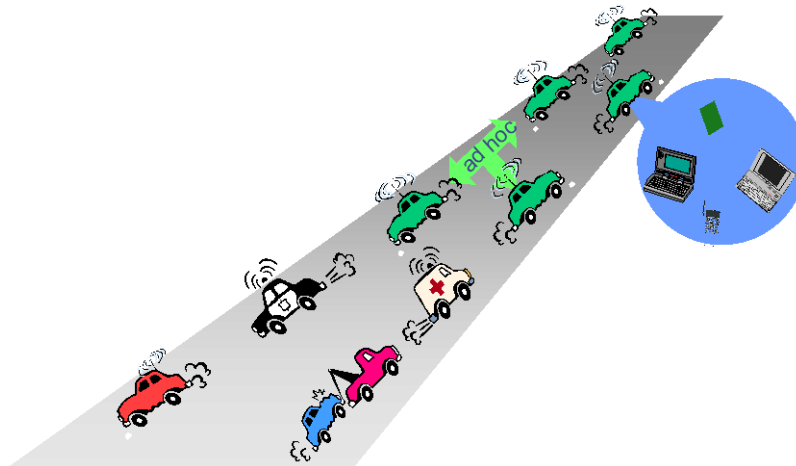
Ambientes civis

- Sala de aula de ciência da computação
 - Rede ad-hoc entre laptops de alunos
- Conferência
 - Usuários em salas diferentes acessando serviços através de outros usuários
- Shopping center, restaurante, cafeterias
 - Os clientes passam parte do dia em um shopping repleto de lojas especializadas, cafeterias e restaurantes
- Campus grande
 - Funcionários de uma empresa que se deslocam para um grande campus com laptops, e celulares



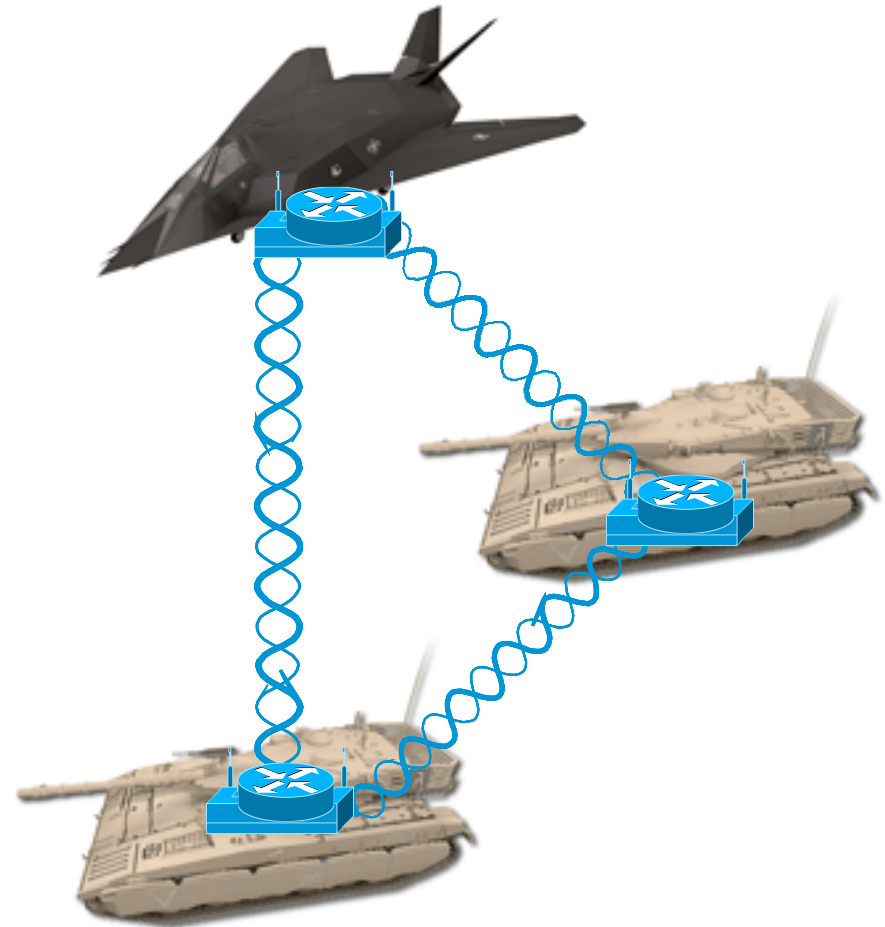
Ambientes civis

- Redes de tráfego (carros inteligentes e estradas inteligentes)
- Os sistemas de bordo conversam com a estrada
 - Mapa de atrasos e bloqueios
 - Obter mapas
 - Informar a estrada sobre suas ações
- Descobrir estacionamentos vazios em uma cidade, sem perguntar a um servidor
- Comunicação entre carros



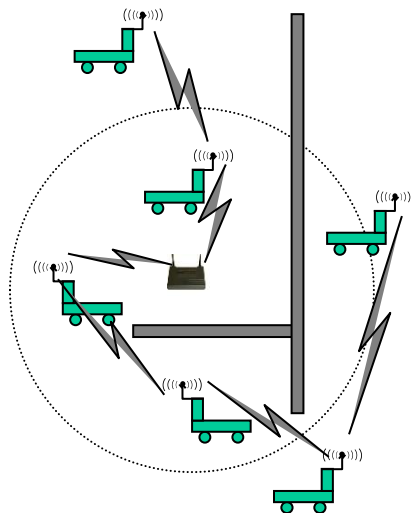
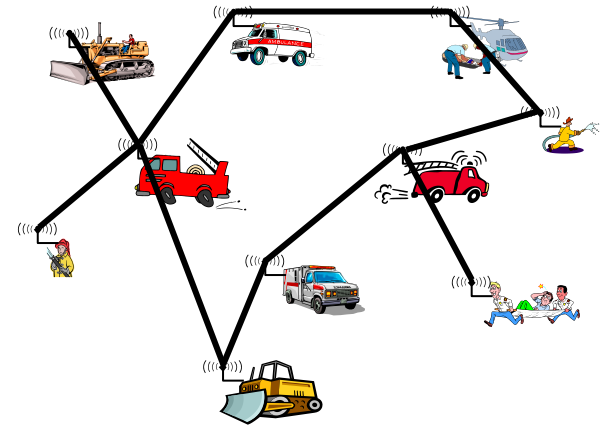
Ambientes militares

- Regimento de combate em campo
 - Cerca de 4.000-8.000 objetos em movimento constante e imprevisível
- Forçar intercomunicação
 - Proximidade, função, plano de batalha
- Movendo soldados com computadores vestíveis
 - Ataques de espionagem, negação de serviço e personificação podem ser lançados
- Vantagens
 - Baixa probabilidade de detecção
 - Topologia aleatória e associação entre nós



Outros...

- Recuperação de desastres
- Automação de chão de fábrica



Roteamento

12 Roteamento: Desafios e

• Grandes desafios **Requisitos**

- Mobilidade – quebras de caminho, colisões de pacotes, loops transitórios
- Restrição de largura de banda – canal compartilhado por todos os nós na região de transmissão
- Canal compartilhado e propenso a erros – leve em consideração os BERs maiores em ad-hoc sem fio
- Contenção dependente da localização – alta quando o número de nós aumenta

• Requisitos principais

- Atraso mínimo de aquisição de rota
- Reconfiguração rápida de rotas (lidar com quebras de caminho)
- Roteamento sem loop (evita desperdício de recursos)
- Abordagem de roteamento distribuído (reduz a largura de banda consumida)
- Sobrecarga mínima de controle (largura de banda, colisões)
- Escalabilidade (escala com grande rede – minimiza a sobrecarga de controle)
- Provisionamento de QoS (fornece níveis de QoS) - suporte para tráfego urgente
- Segurança e privacidade (resilientes a ameaças e vulnerabilidades)

Proativo e Reativo

Protocolos

- Protocolos proativos
 - Sempre mantenha rotas
 - Pouco ou nenhum atraso para determinação da rota
 - Consumir largura de banda para manter as rotas atualizadas
 - Manter rotas que nunca poderão ser utilizadas
- Protocolos reativos
 - Menor sobrecarga, uma vez que as rotas são determinadas sob demanda
 - Atraso significativo na determinação da rota
 - Empregar inundações (pesquisa global)
 - O tráfego de controle pode estar em rajadas
- Qual abordagem alcança um melhor compromisso depende dos padrões de tráfego e mobilidade

Protocolos de roteamento reativos

AODV - Ad Hoc sob demanda

Roteamento vetorial de distância

15 Distância sob demanda d hoc

Roteamento vetorial (AODV)

- AODV mantém tabelas de roteamento nos nós, para que os pacotes de dados não precisem conter rotas
- As rotas são mantidas apenas entre nós que precisam se comunicar

Operação AODV

- Solicitações de rota (RREQ)
- Quando um nó retransmite uma solicitação de rota, ele configura um caminho reverso apontando para a origem
 - AODV assume links simétricos (bidirecionais)
- Quando o destino recebe uma solicitação de rota, ele responde enviando um Resposta de rota (RREP)
- A resposta de rota percorre o caminho inverso configurado quando a solicitação de rota é encaminhada

```

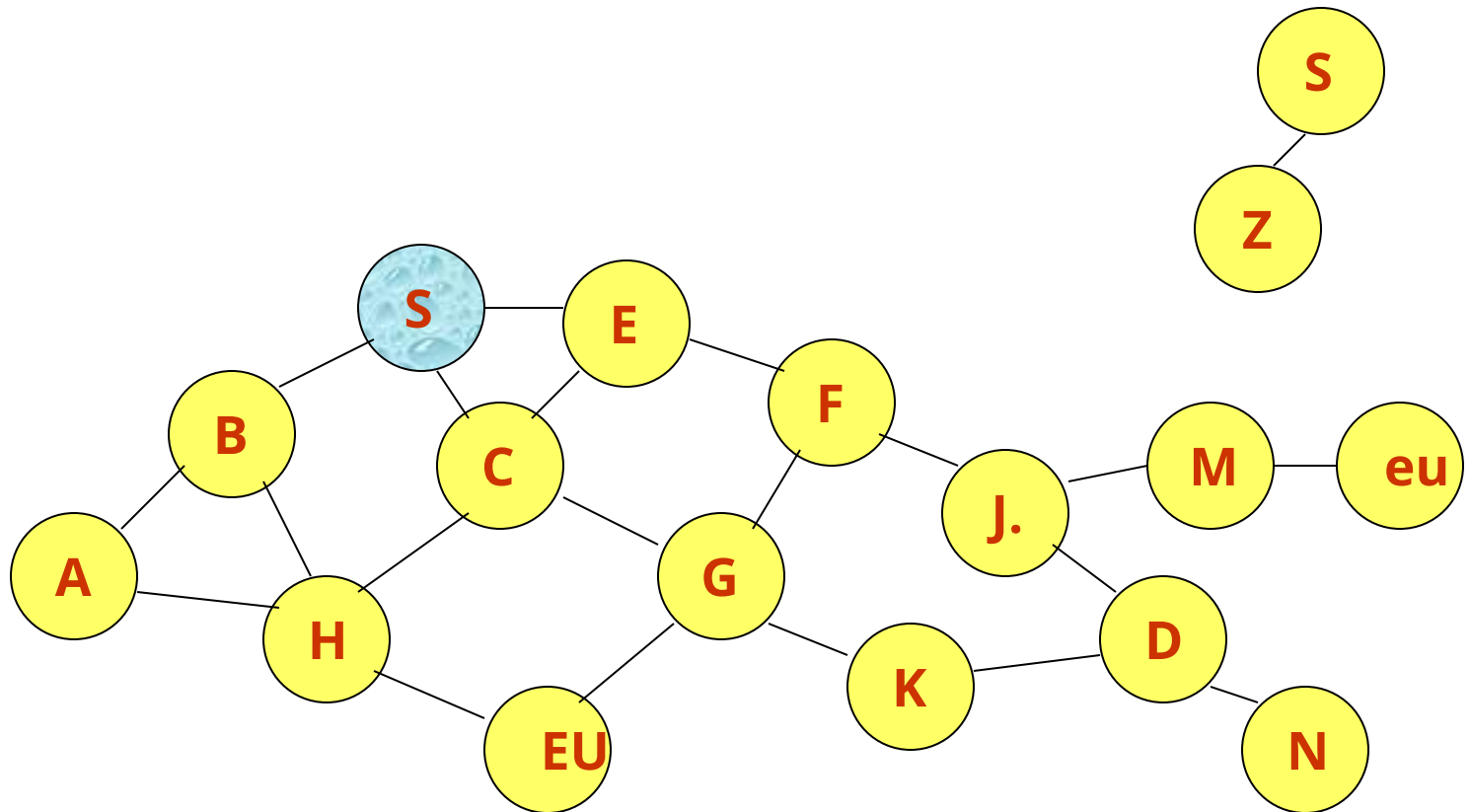
0          1          2          3
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 0 1
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +
- + - - | Tipo |J|R|G|D|U| Reservado | Contagem de saltos |
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +
|          ID RREQ          |
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +
|          Endereço IP de destino          |
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +
|          Número de sequência de destino          |
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +
|          Endereço IP do originador          |
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +
|          Número de sequência do originador          |
+ - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - + - +

```


Operação AODV

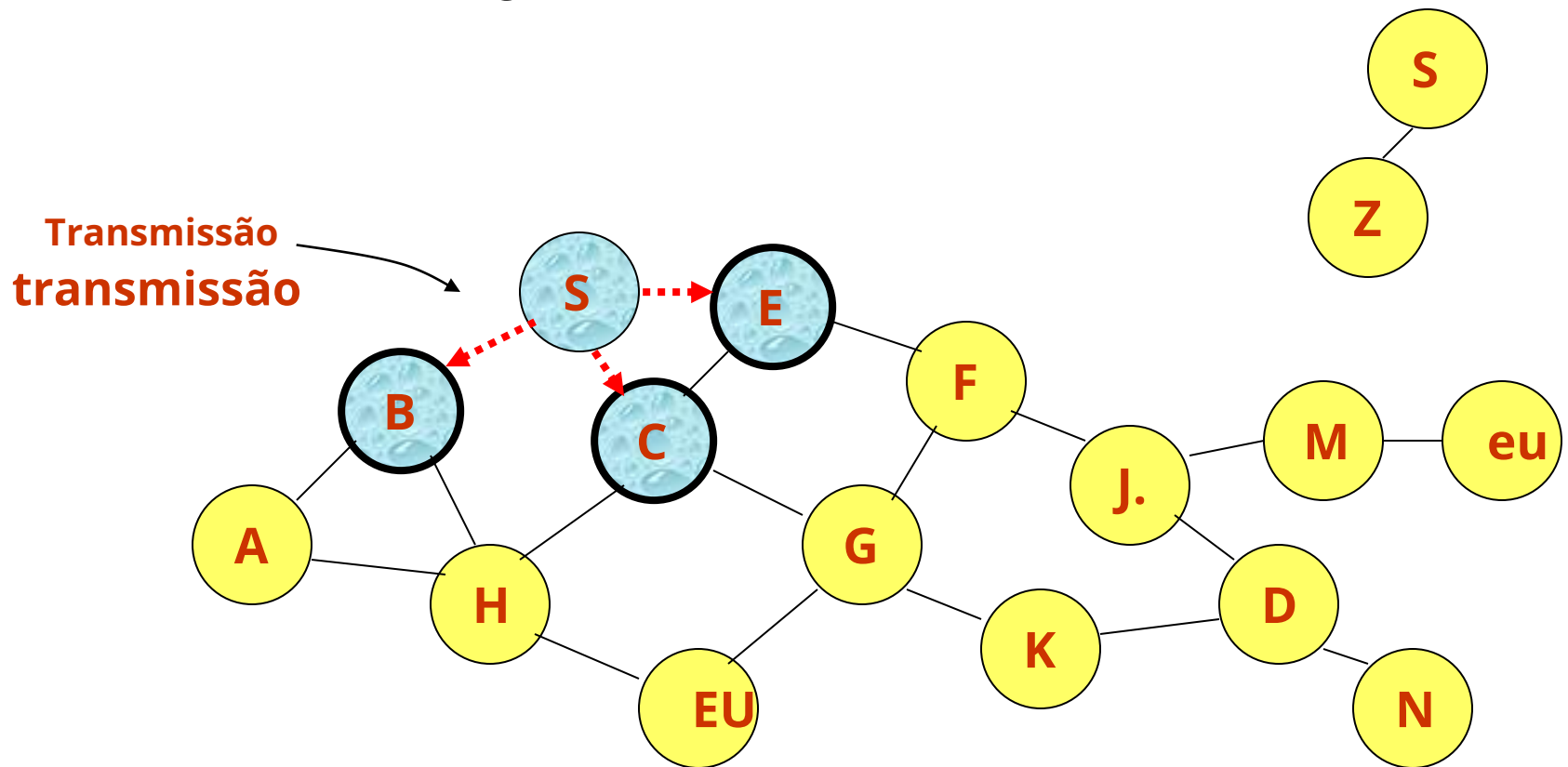
- Cada nó mantém números de sequência não decrescentes
 - Enviado em mensagens RREQ, RREP; incrementado a cada nova mensagem
 - Usado para “marcar data e hora” nas entradas da tabela de roteamento para comparação de “atualidade”
- O nó intermediário pode retornar RREP se tiver uma entrada na tabela de roteamento para o destino que seja “mais recente” que a origem (ou igual com menor contagem de saltos)
- Entradas da tabela de roteamento atribuídas “vitalícias”, excluídas na expiração
- ID exclusivo incluído no RREQ para rejeição de duplicatas

Solicitações de rota em AODV



Representa um nó que recebeu RREQ para D de S

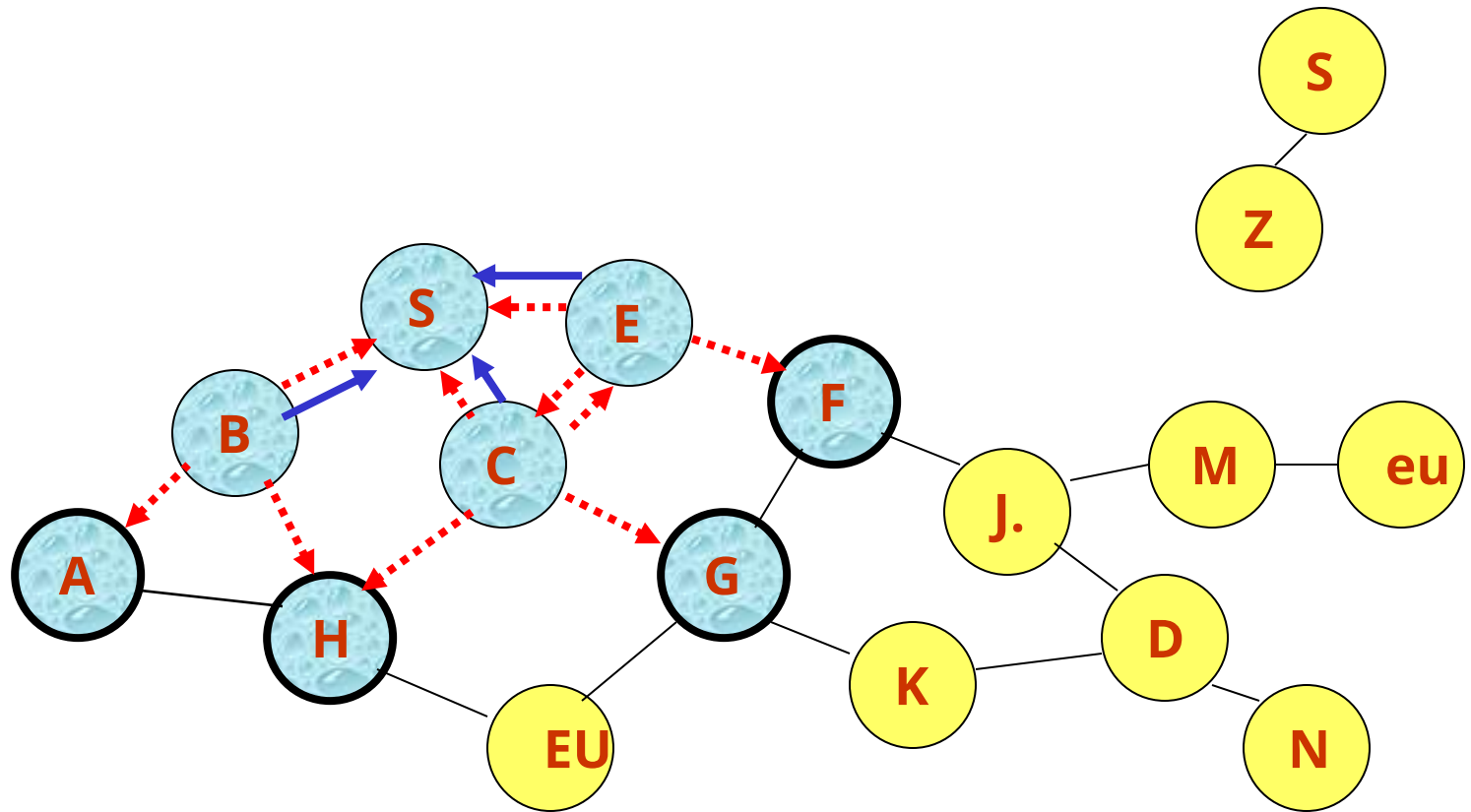
Solicitações de rota em AODV



Representa transmissão de RREQ

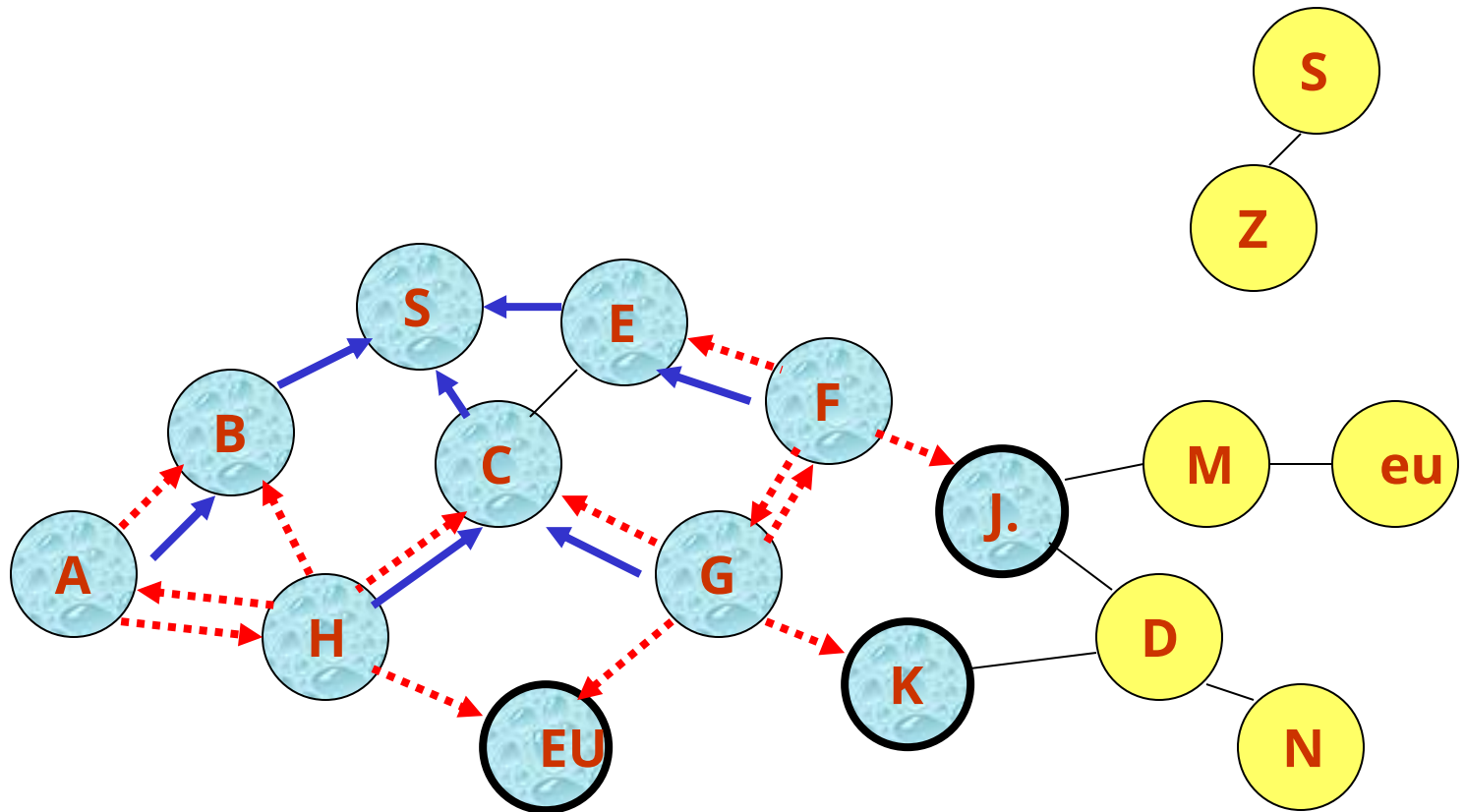
O nó E recebe RREQ Faz entrada de rota
reversa para S destino = S, próximo salto = S,
salto cnt = 1 Não tem rota para D, então
retransmite RREQ

Solicitações de rota em AODV



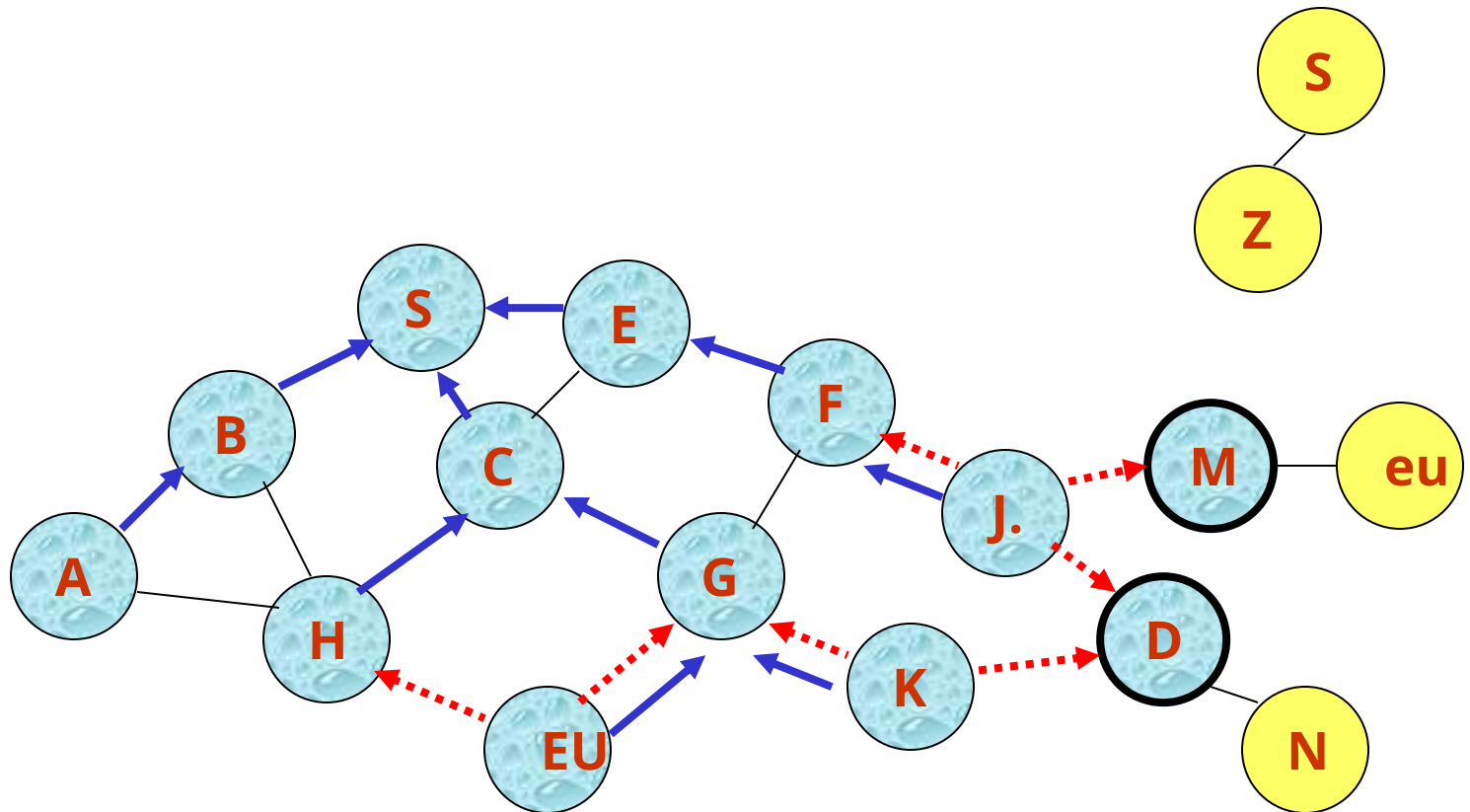
Representa links no caminho reverso

Configuração de caminho reverso em AODV



- O nó C recebe RREQ de G e H, mas não o encaminha novamente, porque o nó C possui já encaminhado RREQ uma vez

Configuração de caminho reverso em AODV



O nó J recebe RREQ

Faz entrada de rota reversa para S, dest = S, próximo salto = F, salto cnt = 3

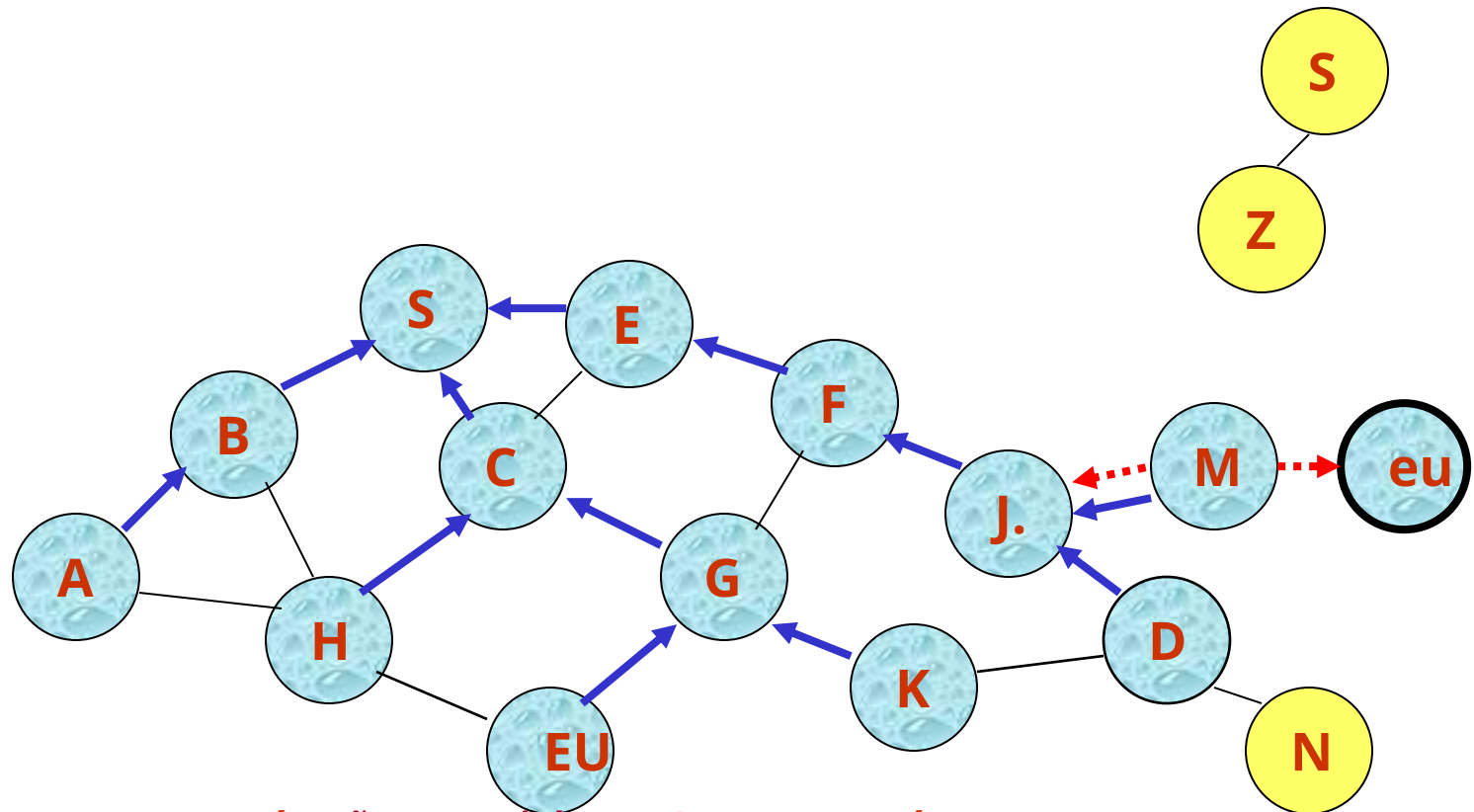
Tem uma rota para D, e o seq# da rota para D é <D's seq# em RREQ (rota desatualizada)

Ou

Faz entrada de rota reversa para S, dest = S, próximo salto = F, salto cnt = 3

Tem uma rota para D, e o seq# da rota para D é ≥ seq# de D em RREQ (rota atualizada)

Configuração de caminho reverso em AODV



- **Nó D não encaminha RREQ, porque o nó D é o alvo do RREQ**
Nó D envia RREP

D cria uma resposta de rota (RREP), insere o endereço IP de D, endereço IP de seq #S, contagem de saltos para D(=0)

Unicasts RREP para J

OuNó J envia RREP

J cria uma resposta de rota (RREP), insere o endereço IP de D, seq #S endereço IP, contagem de saltos para D(=1)

Unicasts RREP para F

26 Solicitação de rota e rota

Responder

- Solicitação de rota (RREQ) inclui o último conhecido **número sequencial** para o destino
- Um nó intermediário também pode enviar uma resposta de rota (RREP), desde que conheça um **caminho mais recente** do que aquele anteriormente conhecido pelo remetente
- Nós intermediários que encaminham o RREP também registram o próximo salto para o destino
- Uma entrada na tabela de roteamento mantendo um **caminho inverso** é eliminado após um intervalo de tempo limite
- Uma entrada na tabela de roteamento mantendo um **caminho a seguir** é purgado se **não usado** para **active_route_timeout** intervalo

Falha de link

- Um vizinho do nó X é considerado **ativo** para uma entrada na tabela de roteamento se o vizinho enviou um pacote dentro *active_route_timeout* intervalo que foi encaminhado usando essa entrada
- Nós vizinhos trocam periodicamente **olá** mensagens
- A resposta periódica da rota aos vizinhos atua como **olá**, instalando e atualizando a rota
- Quando o link do próximo salto em uma entrada da tabela de roteamento é interrompido, todos **ativo** vizinhos são informados
- Falhas de link são propagadas por meio de **Erro de rota (RERR)** mensagens, que também atualizam números de sequência de destino

Erro de rota

- Quando o nó X não consegue encaminhar o pacote P (do nó S para o nó D) no link (X,Y), ele gera uma mensagem RERR
- O nó X incrementa o número de sequência de destino para D armazenado em cache no nó X
- O **número de sequência incrementado** N está incluído no RERR
- Quando o nó S recebe o RERR, ele inicia uma nova descoberta de rota para D usando um número de sequência de destino pelo menos tão grande quanto N
- Quando o nó D recebe a solicitação de rota com número de sequência de destino N , o nó D definirá seu número de sequência como N , a menos que já seja maior que N

RRR local

- Usado quando ocorre quebra de link
 - Quebra de link detectada por mensagens ACK da camada de link, “ACK passivo”, AODV “Hello”
- O nó detectado pode tentar “reparo local”
 - Envia RREQ para destino do nó intermediário
- Mensagem de erro de rota (RERR) gerada
 - Enviado para “precursores”: vizinhos que enviaram recentemente pacotes que foram encaminhados pelo link quebrado
 - Propagado recursivamente

AODV: Resumo

- As rotas não precisam ser incluídas nos cabeçalhos dos pacotes
- Os nós mantêm tabelas de roteamento contendo entradas apenas para rotas que estão em uso ativo
- No máximo um próximo salto por destino mantido em cada nó
- Números de sequência são usados para evitar rotas antigas/interrompidas
- Rotas não utilizadas expiram mesmo que a topologia não mude

Protocolos de roteamento proativos

OLSR - Protocolo de roteamento de estado de link otimizado



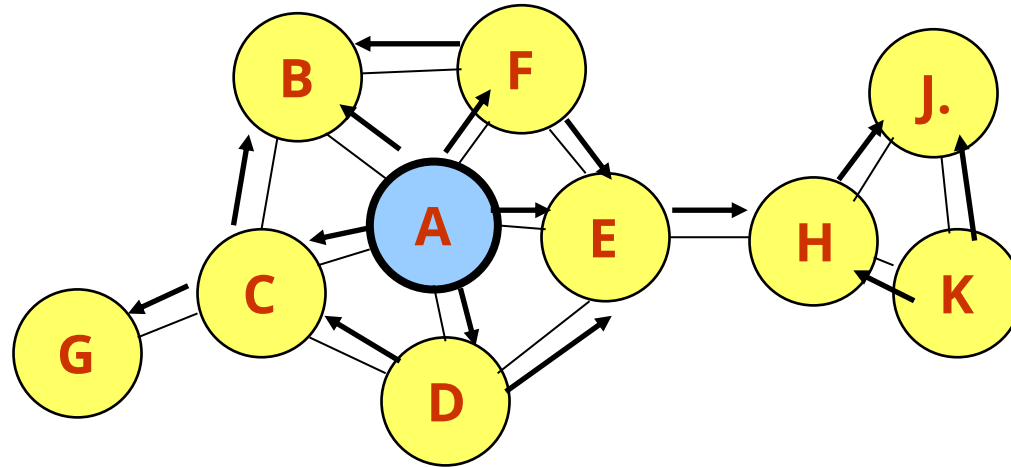
roteamento de estado de link otimizado

Protocolo (OLSR)

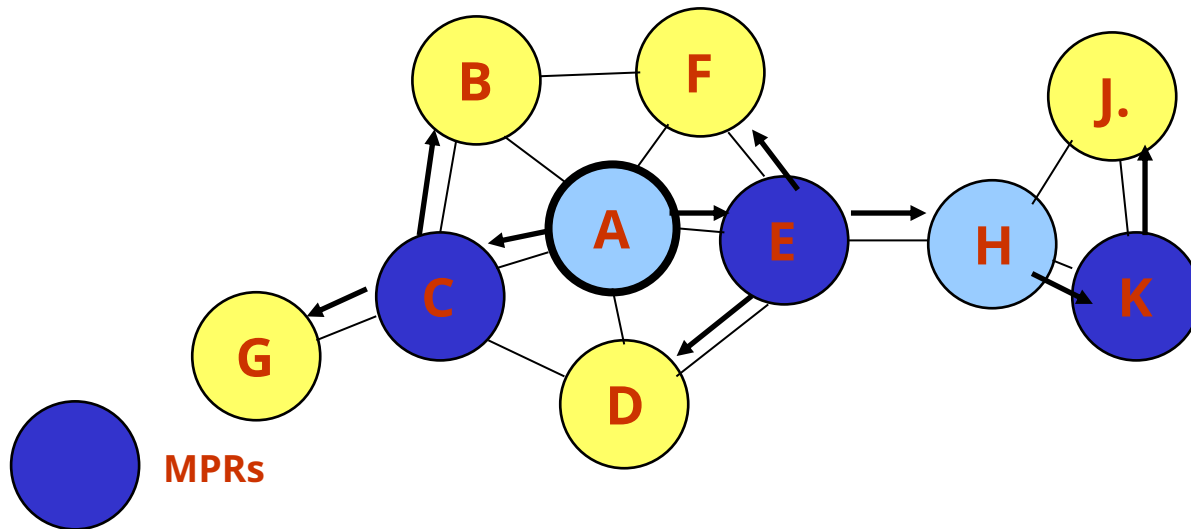
- **Protocolo proativo**
- **Mecanismo eficiente de encaminhamento de pacotes de estado de link**
 - **Retransmissão multiponto**
 - Tamanho reduzido dos pacotes de controle
 - Apenas um subconjunto dos links no estado do link é atualizado
 - » Encaminhamento de pacotes realizado apenas por relés multiponto
 - Número reduzido de links usados para encaminhar os pacotes de estado de link
 - Relés multiponto

Exemplo de MPR em OLSR

- Inundação simples

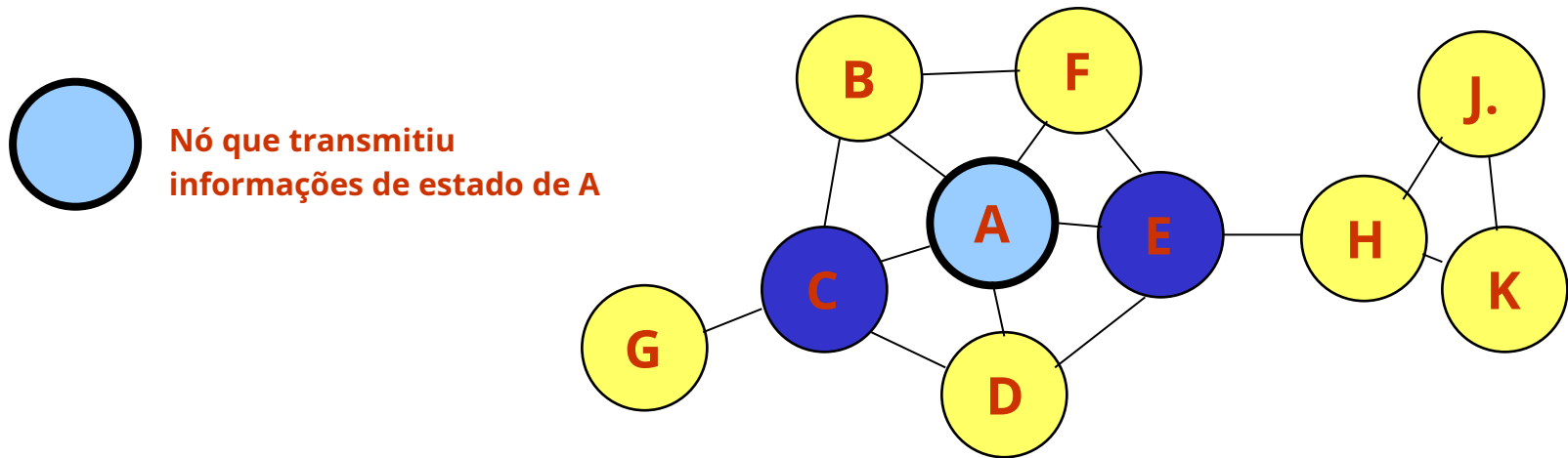


- OLSR



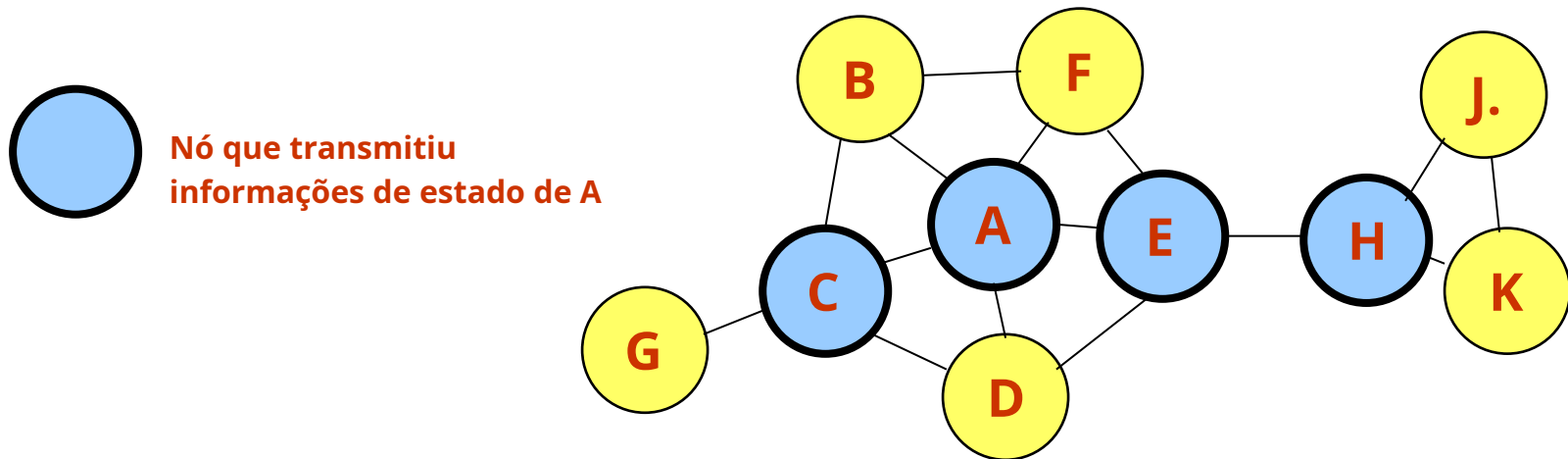
Encaminhamento de estado de link

- Os nós C e E são relés multiponto do nó A
 - Relés multiponto de A são seus vizinhos tais que cada vizinho de dois saltos de A é vizinho de um salto de um relé multiponto de A
 - Os nós trocam listas de vizinhos para conhecer seus vizinhos de 2 saltos e escolher os relés multiponto

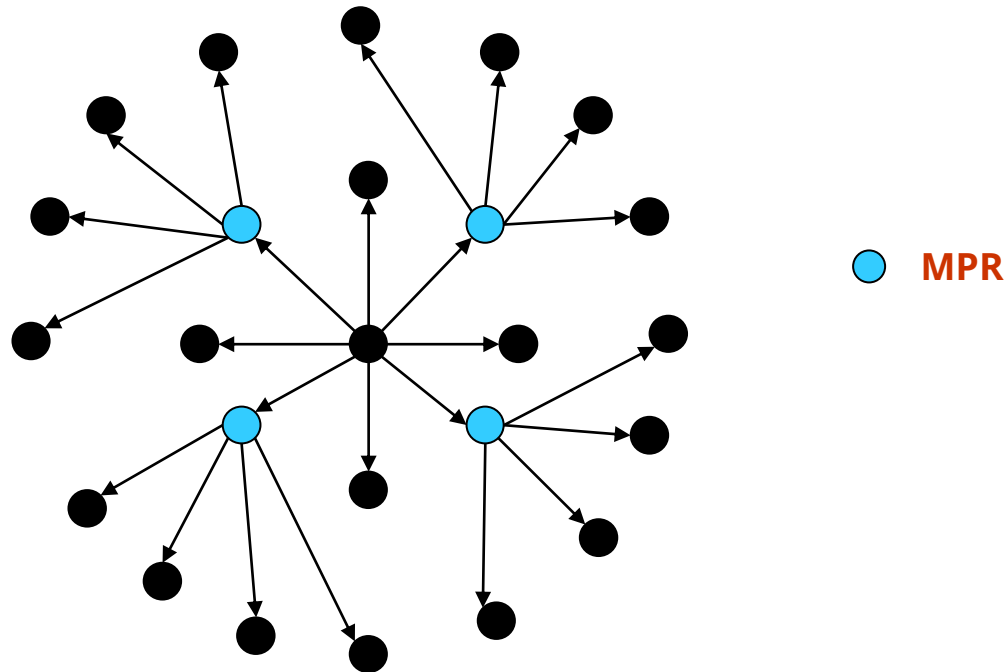


Encaminhamento de estado de link

- Os nós C e E encaminham informações recebidas de A
- Os nós E e K são relés multiponto para o nó H
- O nó K encaminha informações recebidas de H



OLSR: Exemplo



**4 retransmissão para
difundir uma mensagem em até 2
saltos**

Conjuntos MPR e seletores MPR

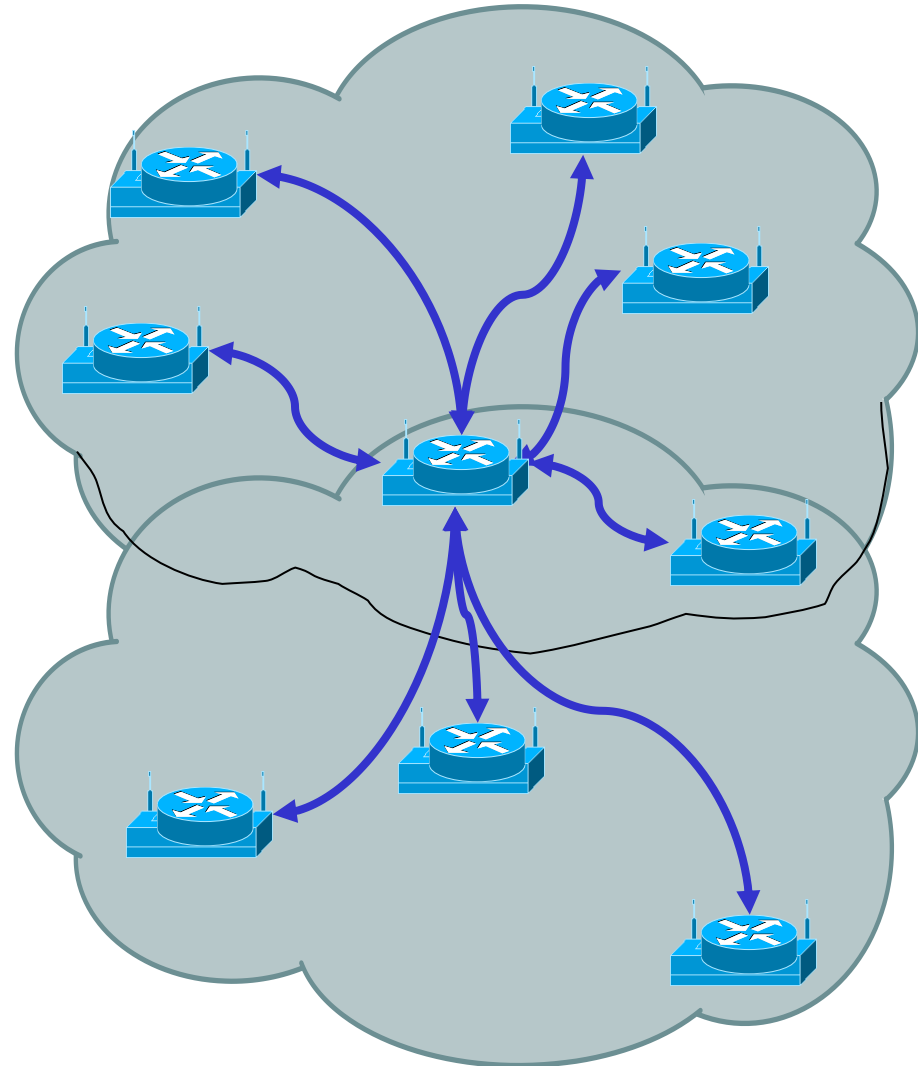
- Conjuntos MPR
 - Conjunto de nós que são relés multiponto
 - Cada nó seleciona um MPRset para processar e encaminhar cada pacote de link state originado por ele.
 - Outros nós processam os pacotes de estado de link, mas não os encaminham
- Seletores MPR
 - Conjunto de vizinhos que selecionaram o nó como relé multiponto
 - MPR encaminha pacotes recebidos de seletores MPR
- Os membros dos conjuntos de MPR e seletores de MPR mudam ao longo do tempo – mecanismos de seleção eficientes

Seleção de MPR

- Selecione como MPR cada nó na vizinhança de dois saltos do nó que tenha um link bidirecional com o nó
- Selecionar como MPR os nós que cobrem nós “isolados”, ou seja, para os quais existe um vizinho que tem outro nó como pai único
- Selecione como MPR o nó que cobre o número máximo de nós

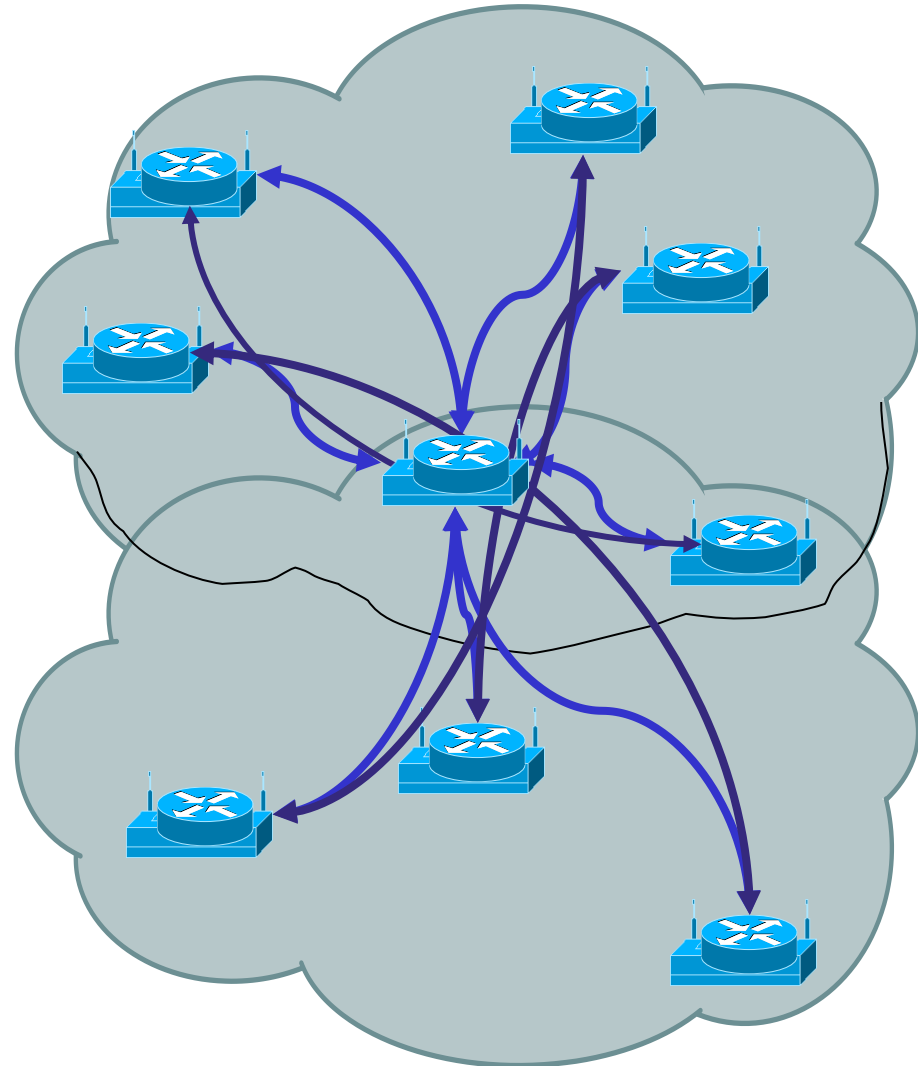
Relações com vizinhos

- Cada dispositivo emite um “Olá” periódico
 - Anuncie-se para seus vizinhos
 - Determine quem mais está lá
 - Selecione alguns sistemas para atuar como Relés MultiPoint



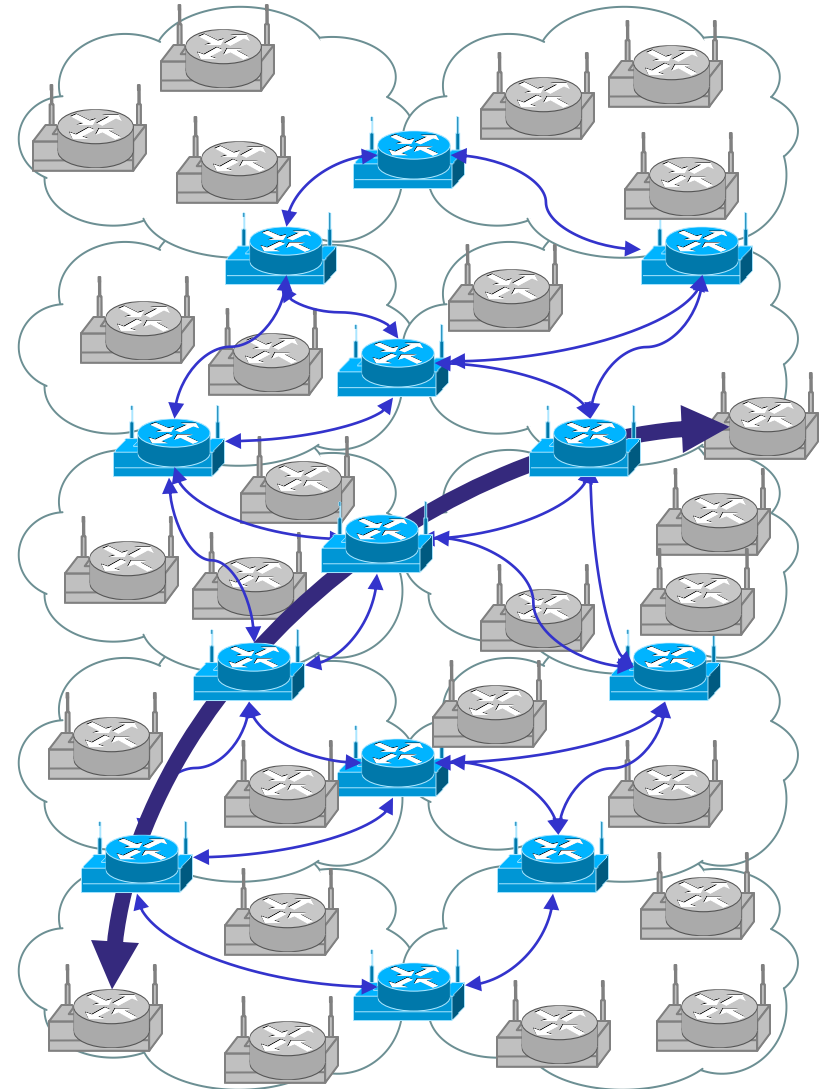
Relés Multiponto

- Topologia de passes
Informação (topologia
mensagens de controle)
 - Atua como roteador entre
hosts
 - Minimiza a retransmissão
de informações
 - Forma um backbone de
roteamento



Estrutura de uma rede OLSR

- MPRs formam backbone de roteamento
 - Outros nós atuam como “hosts”
- À medida que os dispositivos se movem
 - Mudança de relacionamentos topológicos
 - Mudança de rotas
 - Mudanças na forma e composição da espinha dorsal



Protocolos de roteamento baseados em localização

LAR – Roteamento Auxiliado por Localização

Os principais problemas dos anteriores mecanismos

- A localização dos nós muda rapidamente
- Nenhuma informação sobre
 - Localização atual
 - Velocidade
 - Direção
- Conhecer a localização
 - Minimiza a zona de pesquisa
 - Não há necessidade de inundar a rede
- Conhecer a velocidade e/ou direção
 - Mais minimização da zona de pesquisa
 - Aumenta a probabilidade de encontrar o nó necessário



Roteamento Auxiliado por Localização (LAR)

- Cada nó sabe sua localização a cada momento
- Usando informações de localização para descoberta de rotas
- O roteamento é feito usando o último local conhecido + uma suposição
- A descoberta de rota é iniciada quando
 - S não conhece uma rota para D
 - Rota anterior de S para D está quebrada
- Premissas
 - Conhecimento de localização
 - Sem erro
 - Movimento 2D
 - Cooperação total

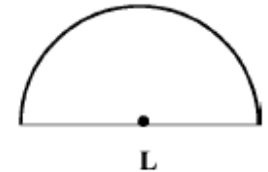
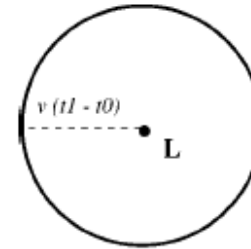
Informações de localização

- Alinhamento de satélites e estações terrestres
- Sistema de Posicionamento Global (GPS) - EUA
- Sistema Global de Navegação por Satélite (GLONASS) - Rússia
- Galileu – UE
- Posicionamento 3D
- Precisão de 3 a 100 metros
- Pode fornecer mais informações
 - Velocidade
 - Tempo

LAR - Definições

- Zona Esperada (EZ)

- S conhece a localização L de D em t_0
- Hora atual t_1
- A localização de D em t_1 é a zona esperada
- Suponha velocidade máxima/média v



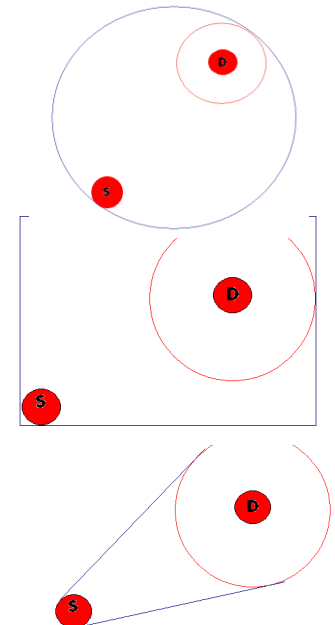
- Zona de Solicitação (RZ)

- Inundação com uma modificação
- O nó S define uma zona de solicitação para a solicitação de rota
- Como determinar o tamanho e formato da zona de solicitação?

- Várias considerações

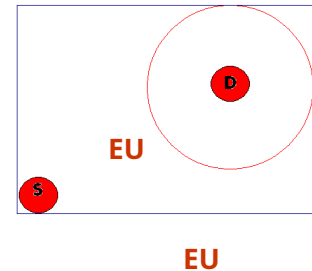
- Caso a EZ de destino não inclua o nó de origem, outras regiões deverão ser incluídas na ZR

- Nem sempre será encontrada uma rota utilizando uma determinada RZ



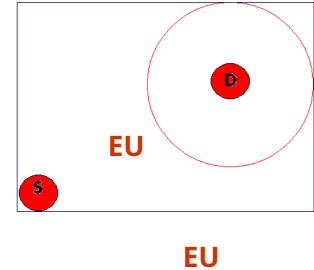
LAR – esquema 1 (Algoritmo)

- O nó I recebe RREQ
 - Localização de I – (X_{eu}, S_{eu})
 - Se I estiver dentro do retangular, I encaminha o RREQ para seus vizinhos
 - Caso contrário, descarto o RREQ
- O nó D recebe o RREQ
 - Respostas RREP
 - Adiciona sua localização atual



LAR – esquema 1 (algumas questões)

- O tamanho retangular é proporcional a
 - Velocidade média (v)
 - Tempo decorrido (t_1-t_0)



Portanto

- Baixa velocidade - v pequeno no mesmo (t_1-t_0) - RZ menor
- Alta velocidade - v grande no mesmo (t_1-t_0) - RZ maior
- Melhorias
 - D pode adicionar sua velocidade/média. velocidade no RREP, isso pode ajudar outros nós em futuras descobertas de rotas
 - D pode pegar carona em sua localização em outros pacotes

HOMEM MORCEGO

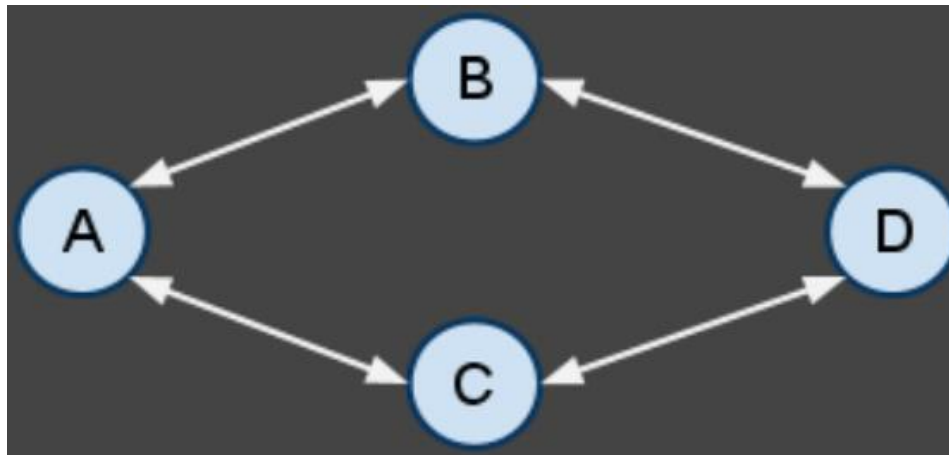
Uma abordagem melhor para redes ad hoc móveis

https://www.researchgate.net/publication/320172464_Better_approach_to_mobile_ad-hoc_networking_BATMAN

https://www.open-mesh.org/projects/batman-adv/wiki/BATMAN_IV

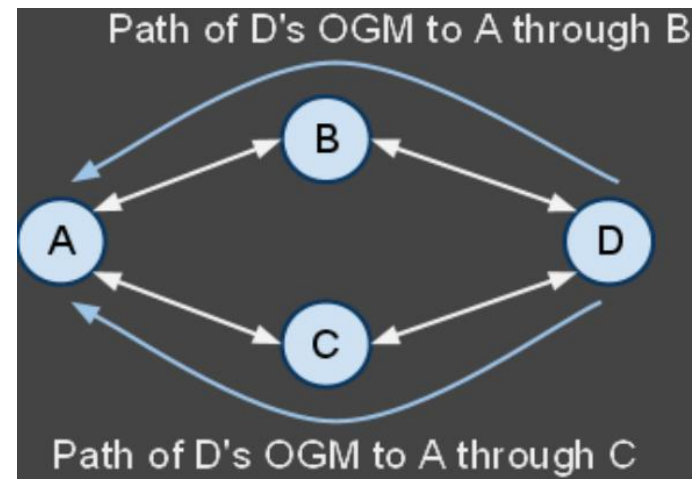
homem Morcego

- Tradicionalmente, os nós trocam pacotes de controle que contêm informações sobre o estado do link (utilização atual do link, largura de banda, etc.).
 - Os nós determinam os melhores caminhos com base nos pacotes de controle.
 - Cada nó deve ter informações quase completas sobre toda a rede
- BATMAN adota uma abordagem diferente:
 - A presença ou ausência de pacotes de controle é usada para indicar a qualidade do link (e do caminho).



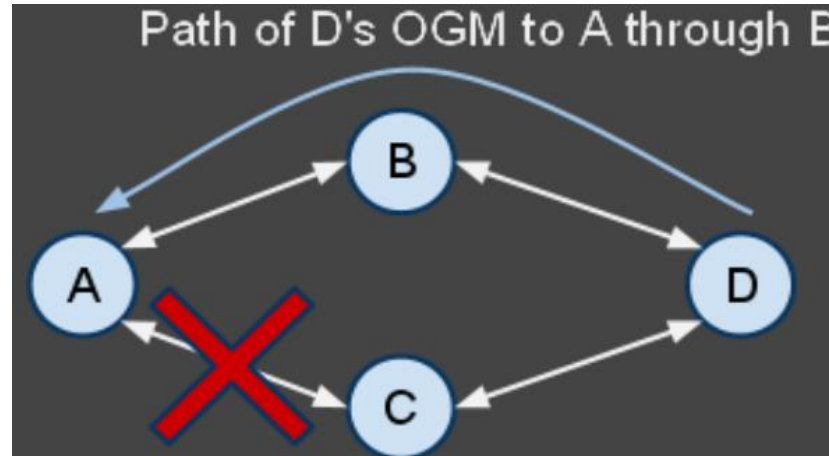
Operação Batman

- Cada nó possui um conjunto de vizinhos de link direto
 - Na figura, o nó A tem vizinhos B e C. Estes são os nós através dos quais A envia e recebe todos os seus pacotes.
- Cada nó da rede envia periodicamente uma Mensagem Originadora (OGM), a fim de informar todos os outros nós de sua presença
 - OGMs incluem um número de sequência
- Se todos os enlaces mostrados forem perfeitos, o nó A receberá a OGM do nó D através de ambos os seus vizinhos B e C.
 - Se todas as OGMs de D chegarem através de B e C, então quando A precisar enviar algo para D, ele poderá usar B ou C como próximo salto em direção ao nó de destino D.



Operação Batman

- Se o link entre os nós A e C cair
 - A OGM do nó D só chegará a A através do nó B.
 - O nó A, portanto, considera o nó B como o melhor vizinho do próximo salto para todos os pacotes destinados ao nó D.
 - Além disso, os OGMs do Nó C também alcançarão apenas o nó A através do nó B. O Nó B é o melhor próximo salto para dados destinados ao Nó C.



Batman: janela deslizante

- Se algumas OGMs, mas não todas, chegarem através de um link
 - Janela deslizante
- Uma janela deslizante indica quais dos últimos números de sequência WINDOW_SIZE (no exemplo, 8) foram recebidos
 - Usa os números de sequência recebidos através de OGMs

	Out of Range				In Window Range								Out of Range			
Seq. Numbers:	...	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	...
Arrived:	...	-	-	-	1	1	1	0	1	0	1	1	-	-	-	...

54 Números de sequência e deslizamento janela

- Quando um número de sequência fora do intervalo é recebido, neste caso a sequência # 17, a janela muda para cima.
 - De 6 números de sequência no intervalo para apenas 5.

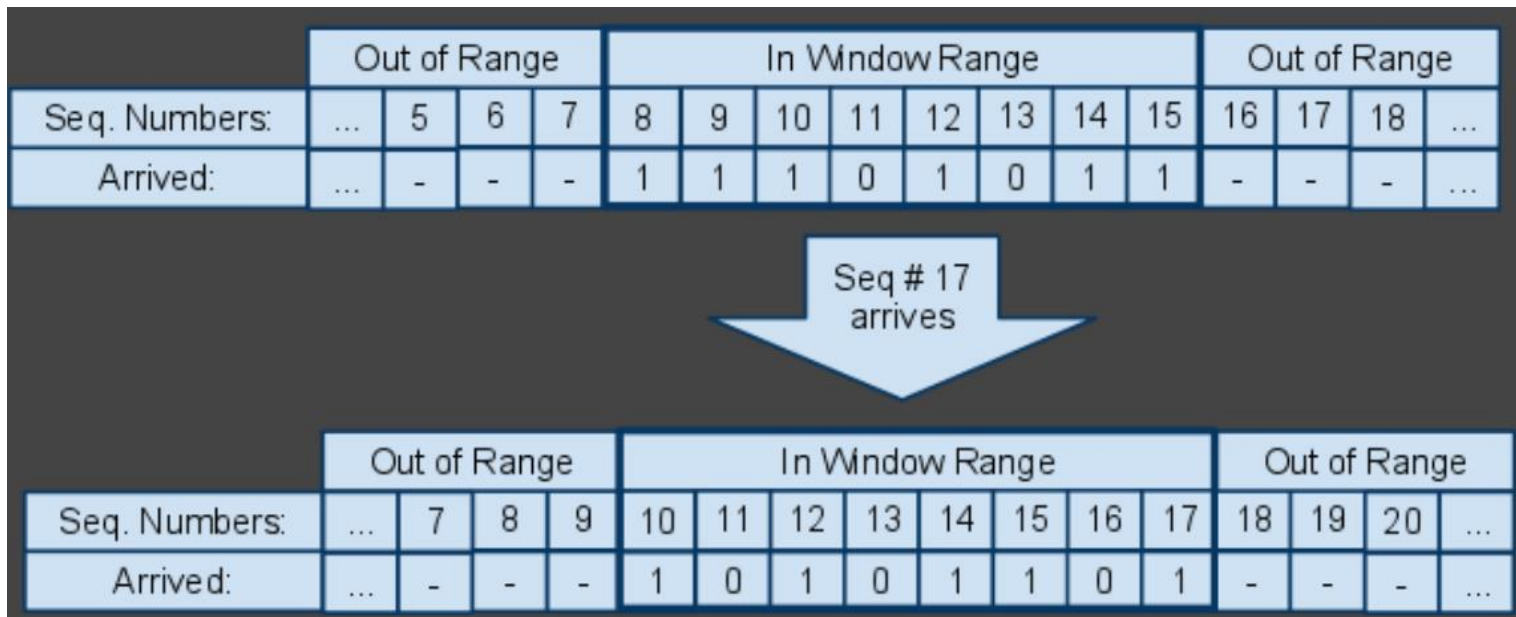
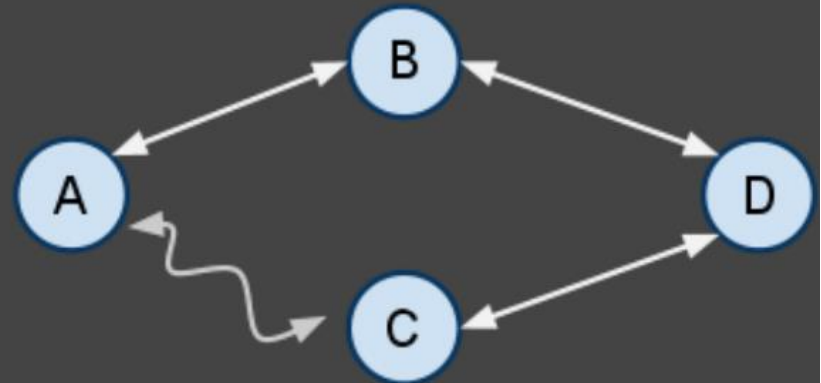


Tabela de roteamento

- Todos os nós possuem uma janela deslizante para cada originador (outro nó) na rede para cada vizinho

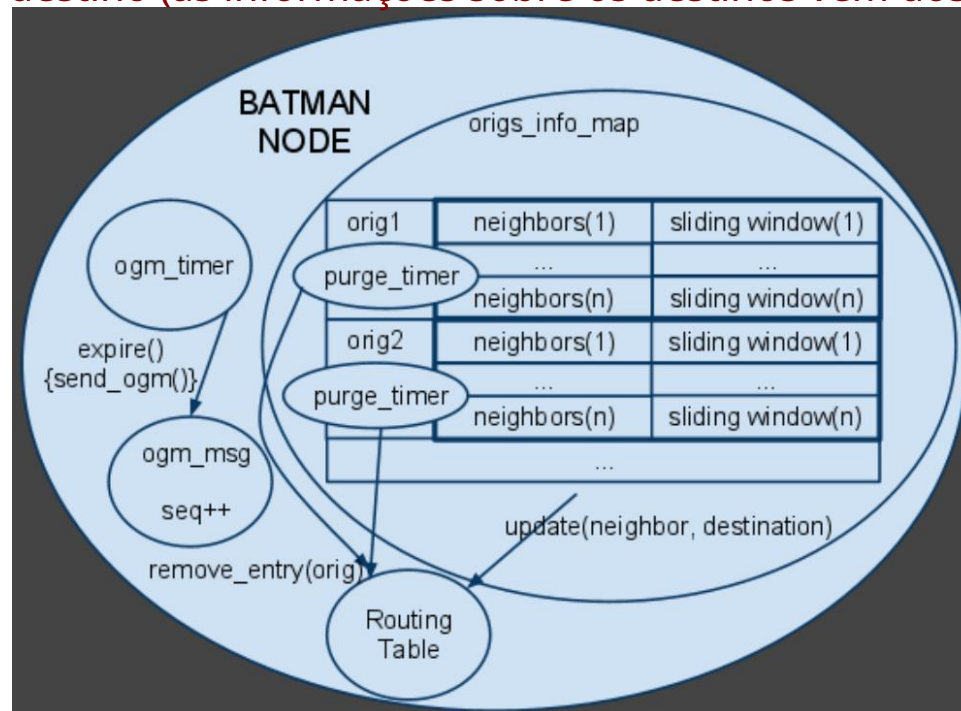
Originators	Neighbour	In Window Range Packet Count
B	B	8
	C	3
C	B	6
	C	2
D	B	7
	C	2

Information stored by node A in order to determine best next hop to each node in the network



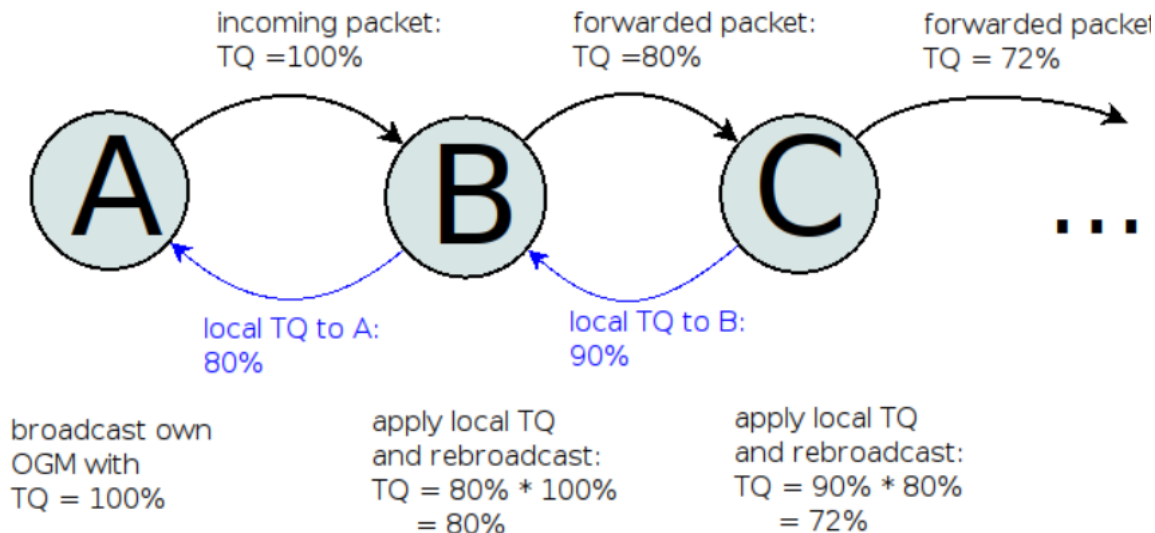
Operação Batman

- BATMAN recebe informações sobre a qualidade do link (e do caminho) através da presença ou ausência de pacotes de controle.
 - Inteligência coletiva - a retransmissão de uma OGM implica que ela chegou com sucesso através de um vizinho de melhor link
 - Nenhum nó precisa ter conhecimento exaustivo da rede, apenas os próximos saltos até o destino (as informações sobre os destinos vêm dos OGMs)



Qualidade de transmissão (Batman v.4)

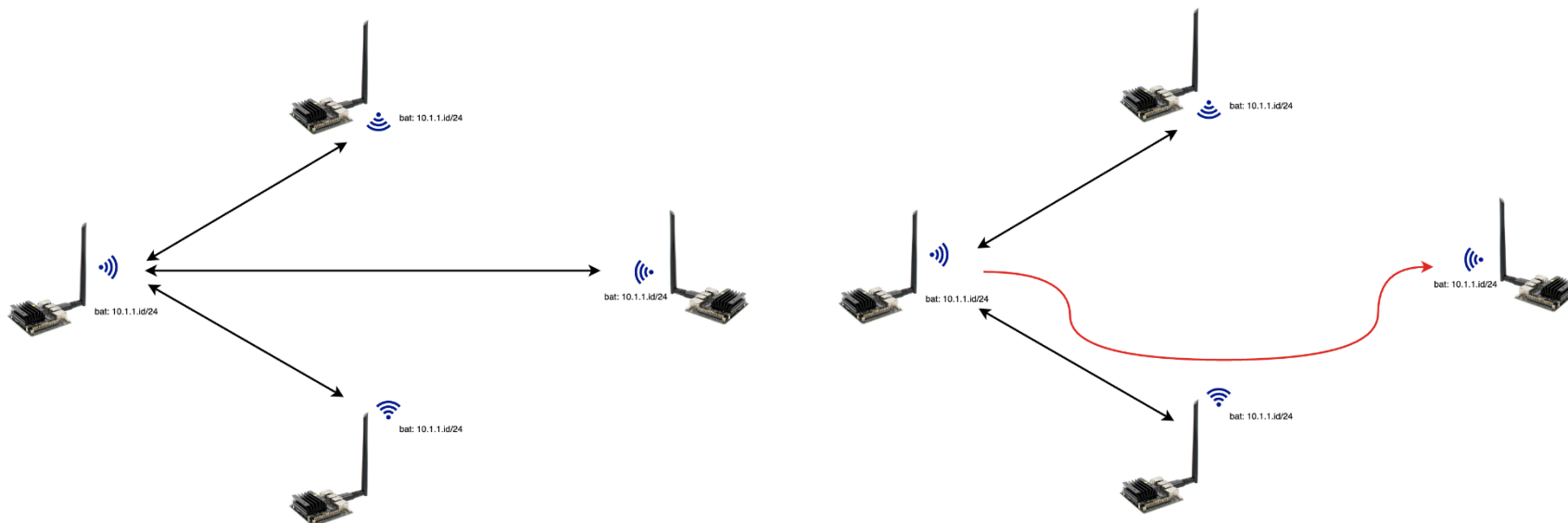
- Para adicionar a qualidade do link local ao valor TQ, é realizado o seguinte cálculo:
- $TQ = TQ_{\text{entrada}} * TQ_{\text{local}}$
- Exemplo: O nó A transmite o pacote com TQ máx. O nó B recebe, aplica o cálculo TQ e retransmite. Quando o nó C recebe o pacote ele sabe sobre a qualidade de transmissão para o nó A.



58 Qualidade de transmissão (Batman v.5)

- A métrica baseada em perda de pacotes não é adequada
 - Número crescente de dispositivos e tipos de links com pouca ou nenhuma perda de pacotes
- Taxa de transferência de pacotes como métrica de toda a malha.
- Determine o rendimento automaticamente:
 - sem fio: os drivers WiFi modernos exportam a taxa de transferência estimada por vizinho WiFi. Este valor é recuperado periodicamente e calculada a média antes de ser propagado na malha.
 - com fio: a maioria dos dispositivos compatíveis com Ethernet exporta seu rendimento teórico e capacidades duplex por meio da API ethtool.
 - medidor de rendimento (próximo): Se o rendimento não puder ser consultado por meio de alguma API e não for configurado manualmente, o BATMAN V executará um teste de rendimento periódico com seu protocolo de teste de rendimento integrado.
- A estimativa de rendimento depende da capacidade do driver WiFi de estimar o rendimento
 - Com tráfego de carga útil a ser enviado a cada vizinho para que a estimativa seja precisa
 - Em links inativos, o BATMAN V iniciará o tráfego de carga útil de tempos em tempos para alimentar a lógica de estimativa do driver WiFi.
- A taxa de transferência do caminho entre o nó A e o nó B é calculada como o mínimo entre o valor da taxa de transferência de todos os links fornecidos no caminho entre o nó A e o nó B

Exemplo



Comparação

- Prós e contras do AODV
 - Baixa sobrecarga
 - Descoberta e recuperação lentas
- Prós e contras do OLSR
 - Sobrecarga média
 - Descoberta e recuperação rápidas
 - Automação de MPRs
- Prós e contras do LAR
 - Sobrecarga média
 - Como descobrir a localização do destino?
- Prós e contras do Batman
 - Sobrecarga média-alta
 - Informação implícita de qualidade
 - Descoberta e recuperação rápidas