



**Disciplina:
Laboratório de
Redes de Sensores**

Prof. Guilherme L. Moritz
Prof. Ohara K. Rayel

PPGSE - UTFPR

RPL

IPv6 Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks

Hermano Pereira

Curitiba, 25 de outubro de 2016

Introdução

RPL – Funcionamento

RPL – Métricas e Restrições

RPL – MRHOF com ETX+Rank

Considerações Finais

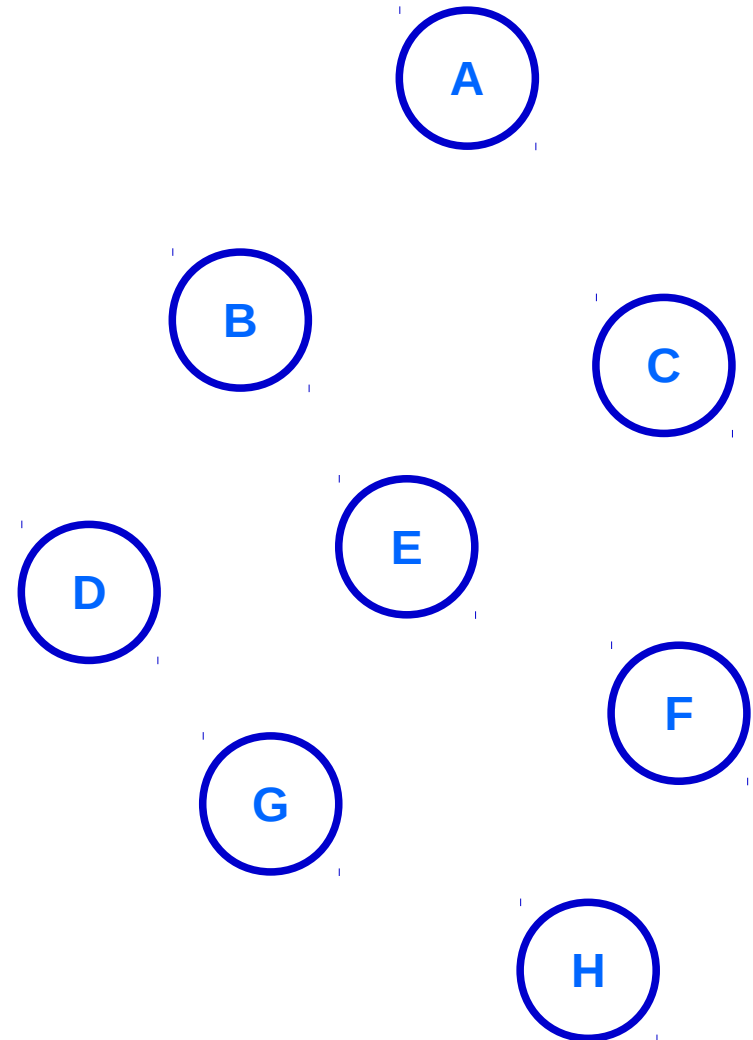
Routing Protocol for Low-power and Lossy Networks

- Grupo ROLL (IETF)
- RFC 6550 – Março de 2012
- Configuração rápida de roteamento em uma rede restrita
- 802.15.4 (6LowPAN) 802.15.4e (6tsch)
- Ideal para a Internet das Coisas

Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)

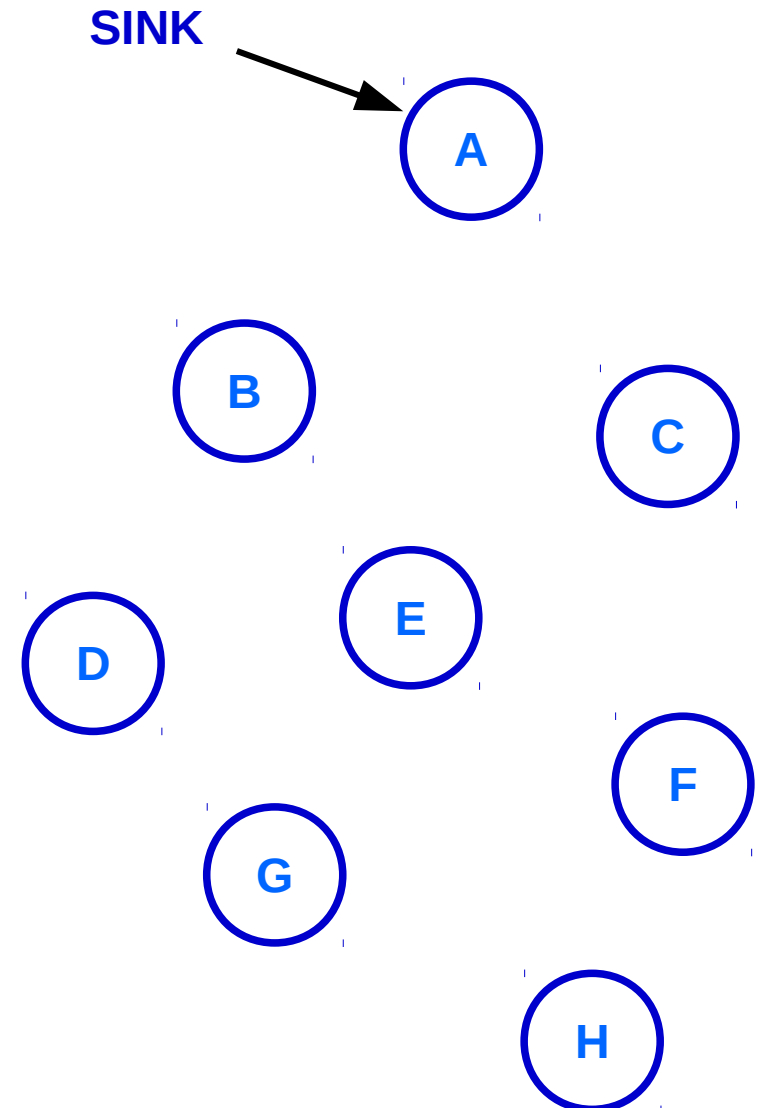
**Directed
Acyclic
Graph**



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)

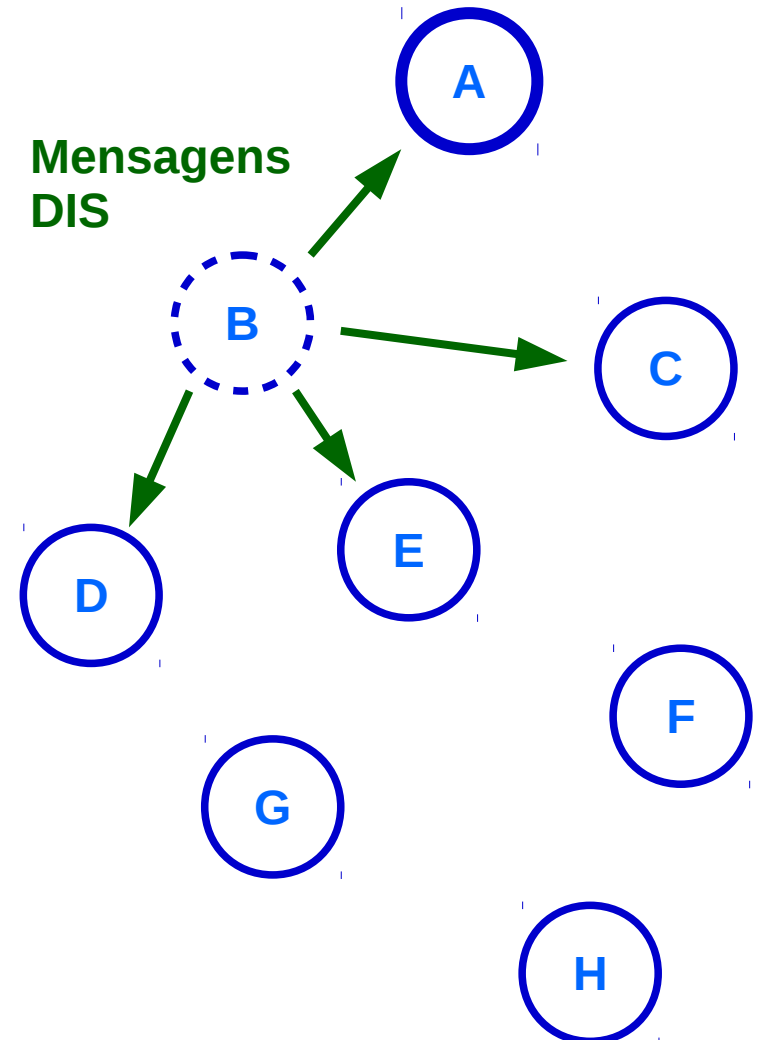
**Destination
Oriented
DAG**



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)

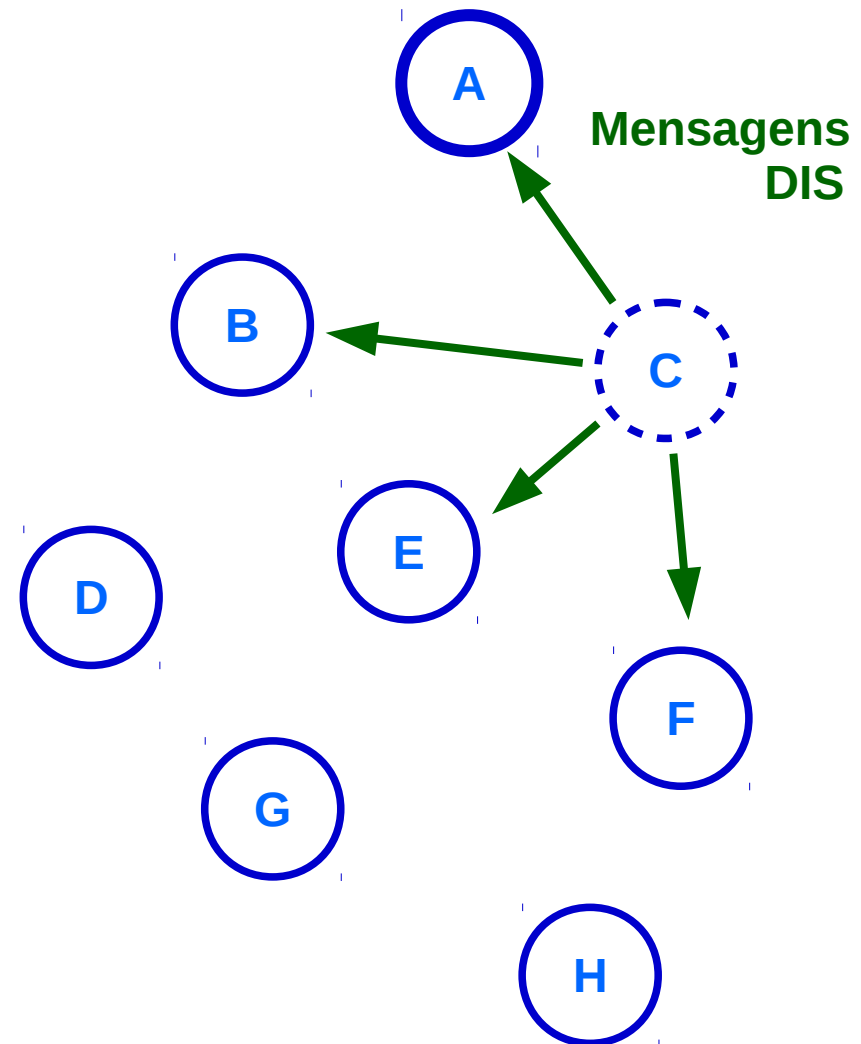
DODAG
Information
Solicitation



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)

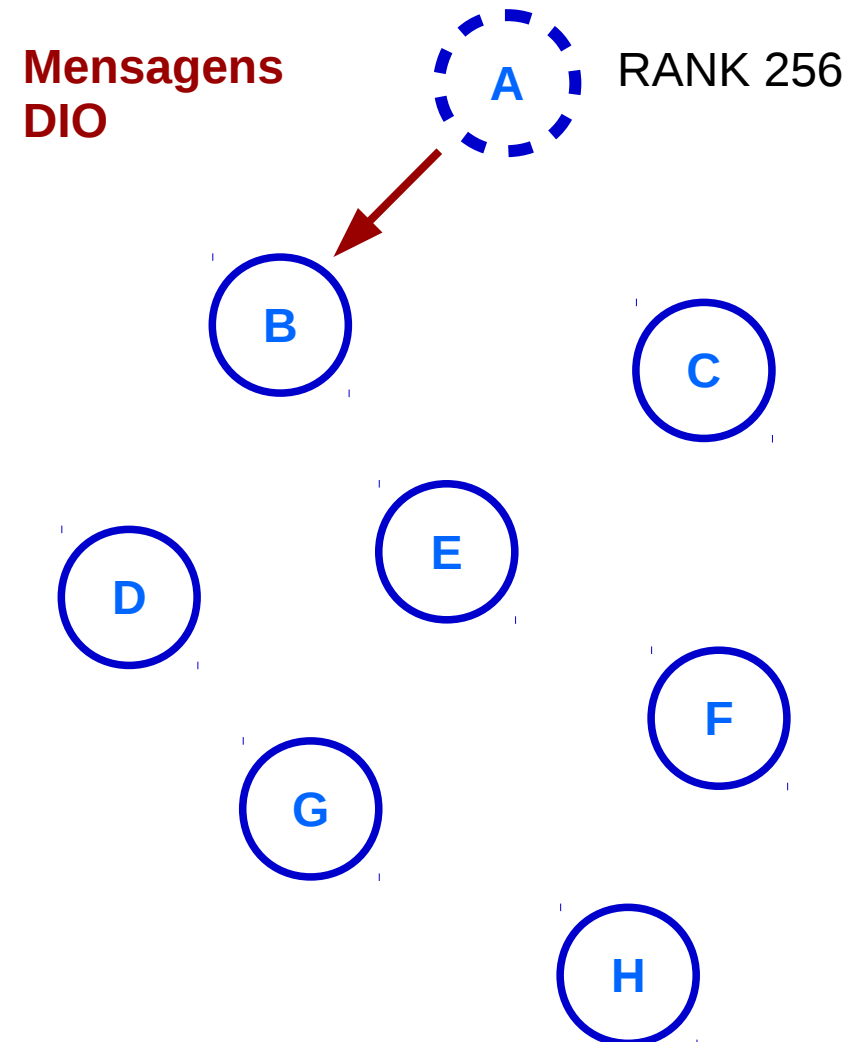
DODAG
Information
Solicitation



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)

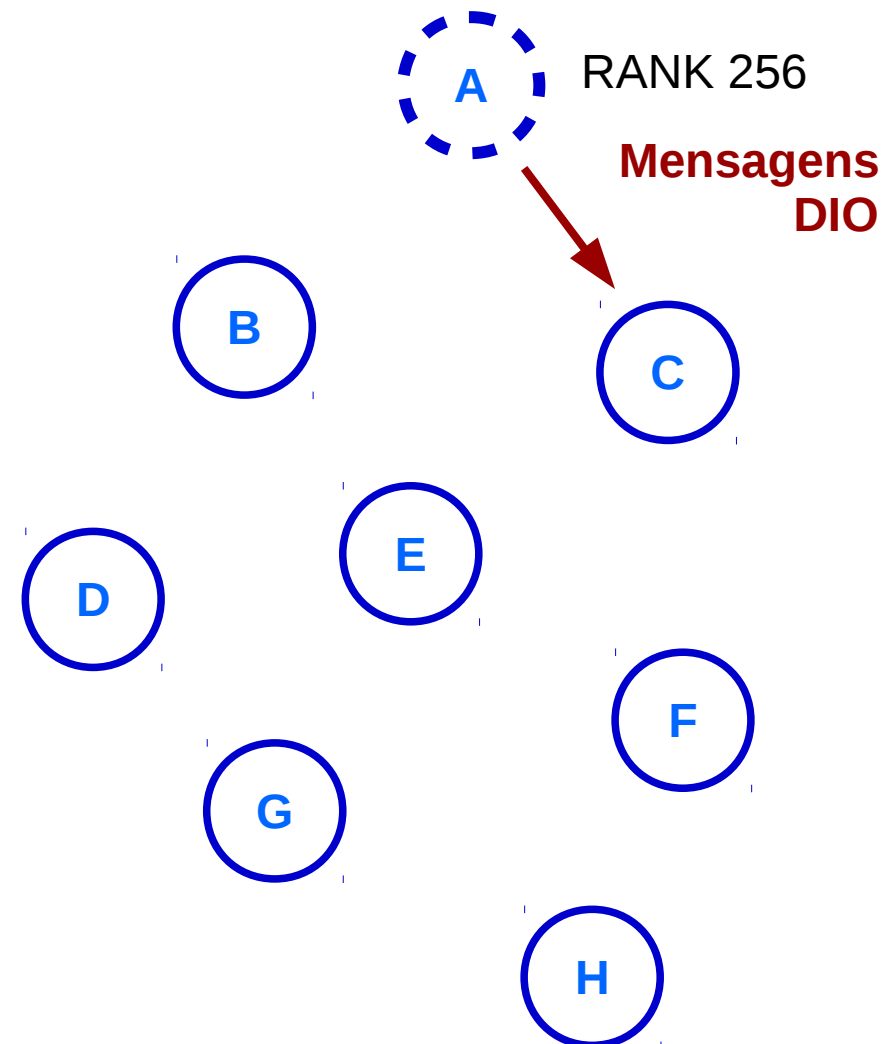
DODAG
Information
Object



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)

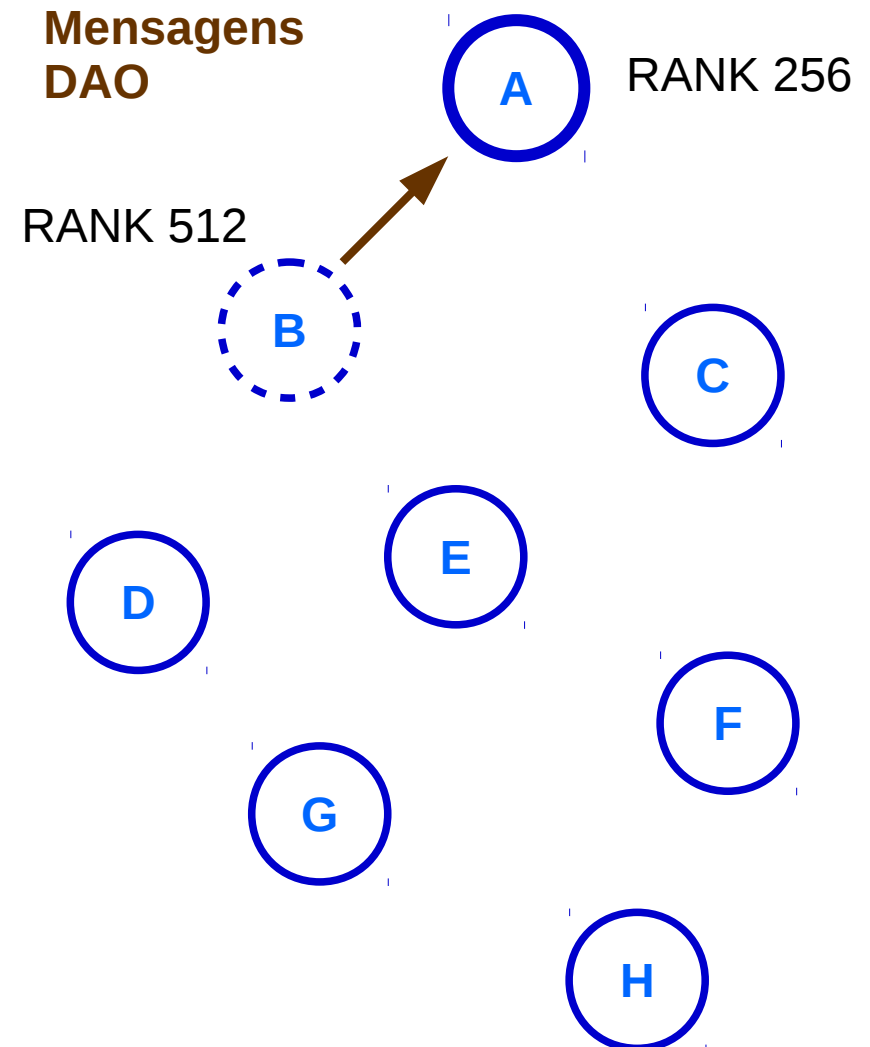
DODAG
Information
Object



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)

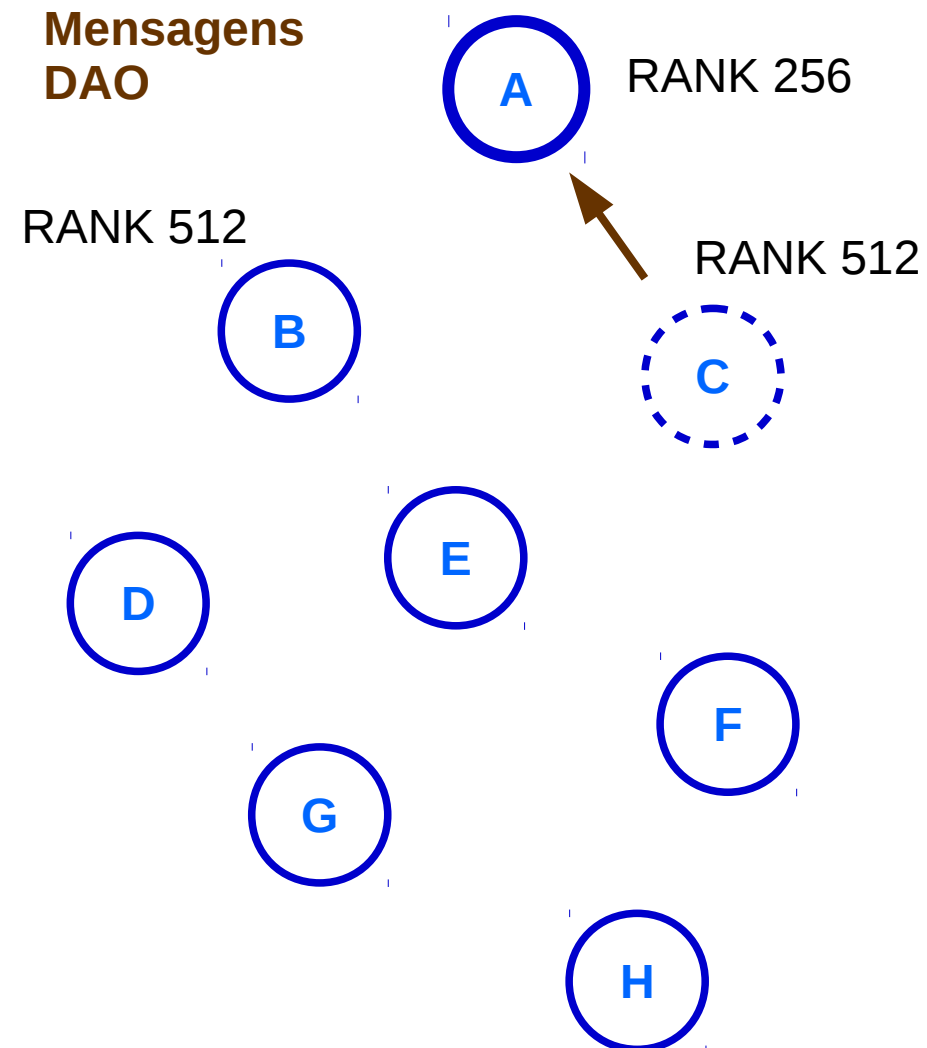
Destination
Advertisement
Object



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)

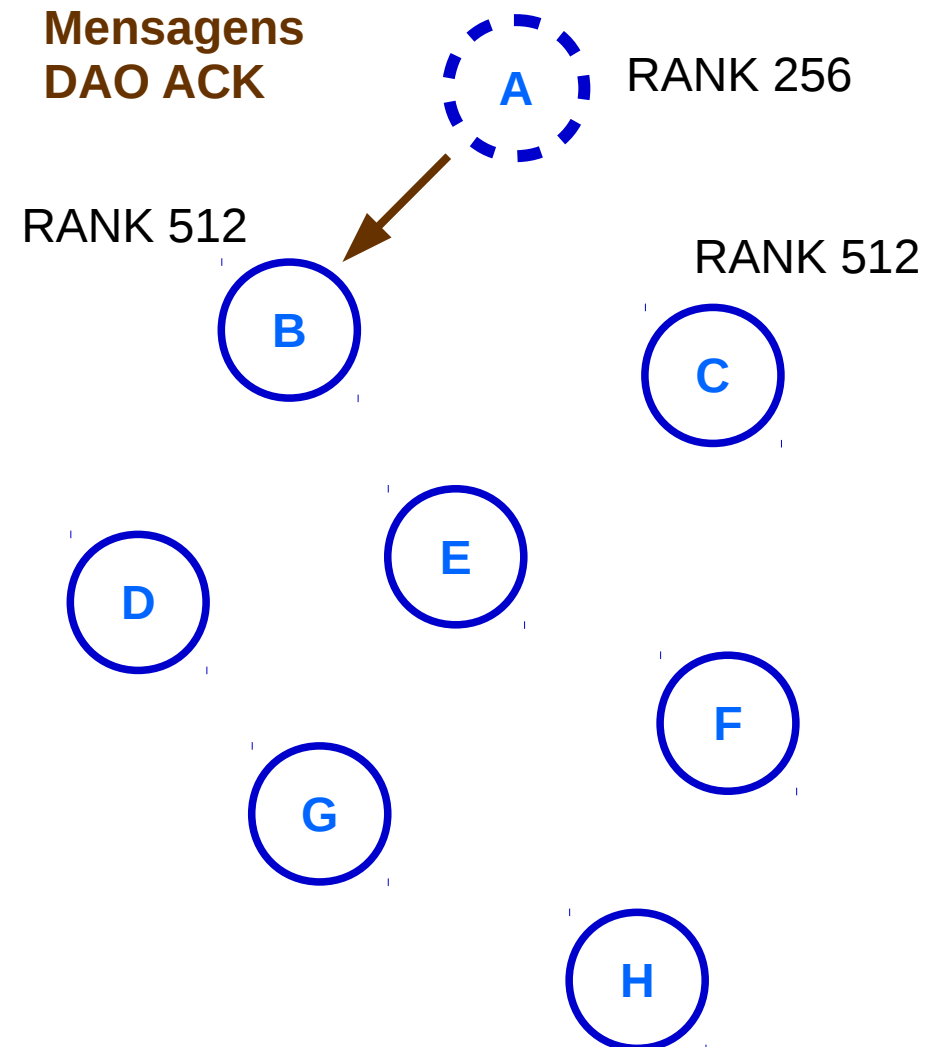
Destination
Advertisement
Object



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)

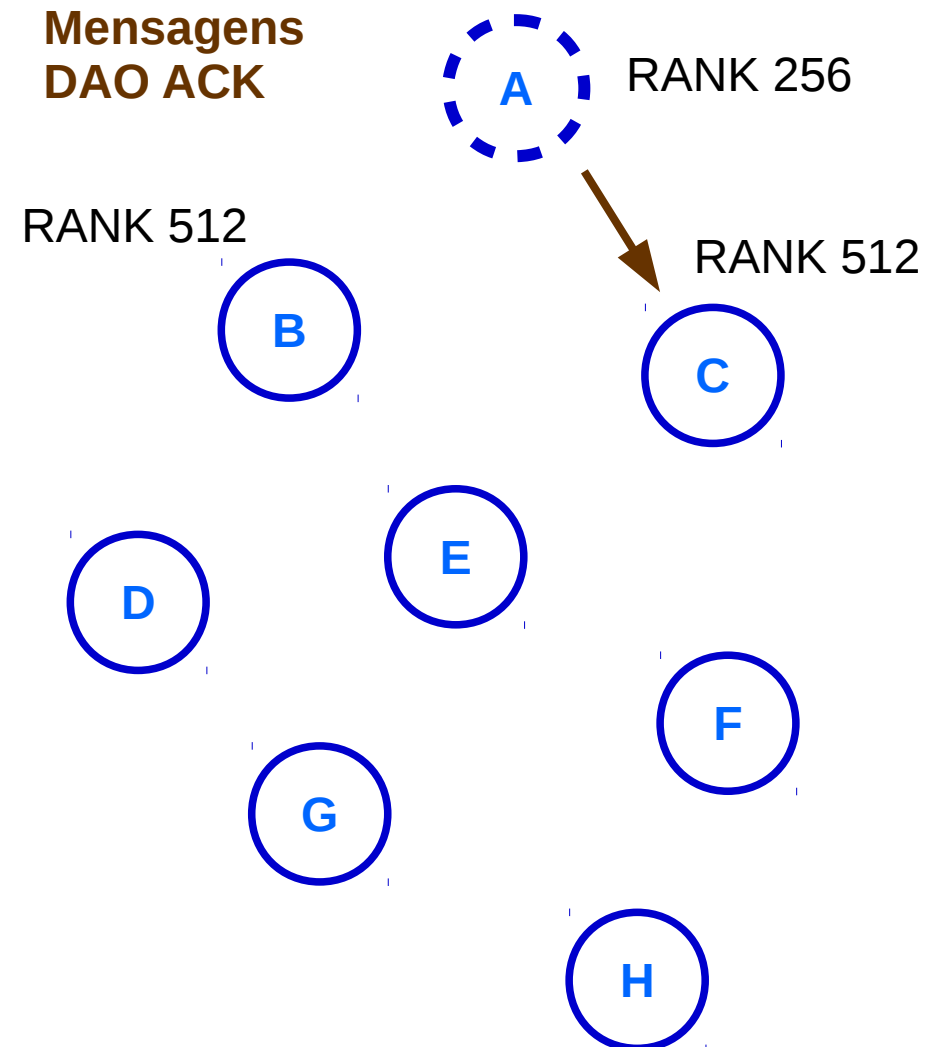
DAO-Ack



Convergência do Protocolo RPL:

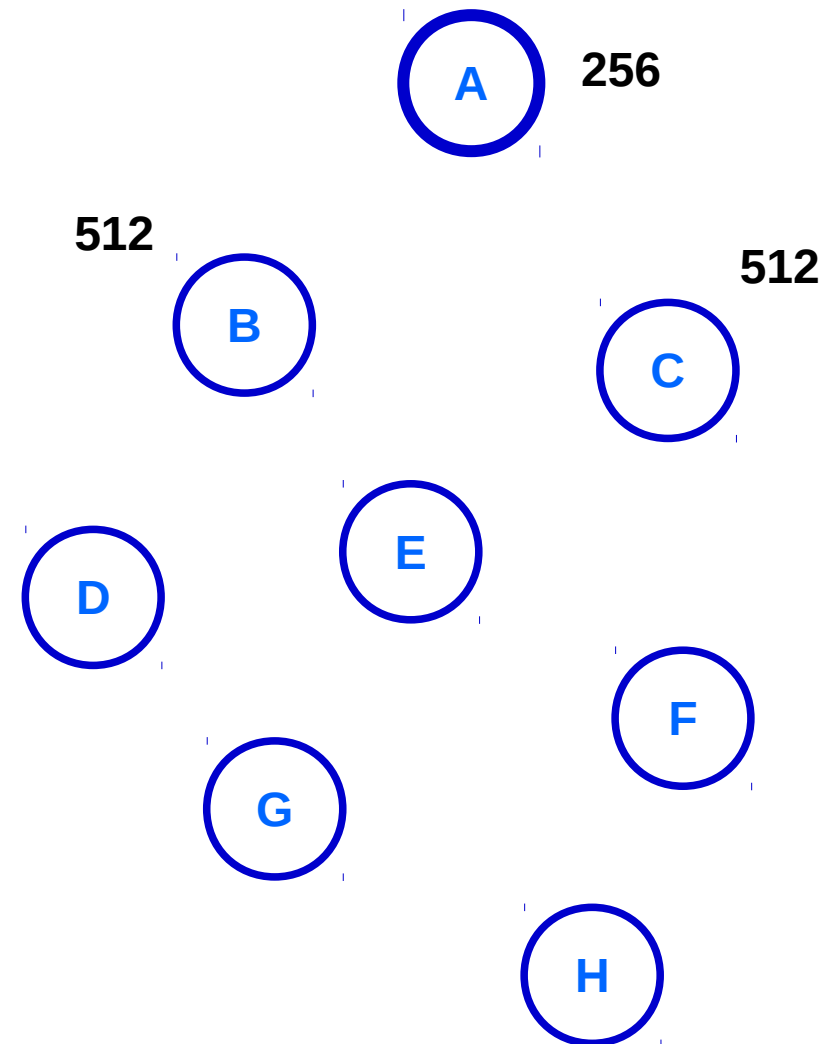
- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)

DAO-Ack



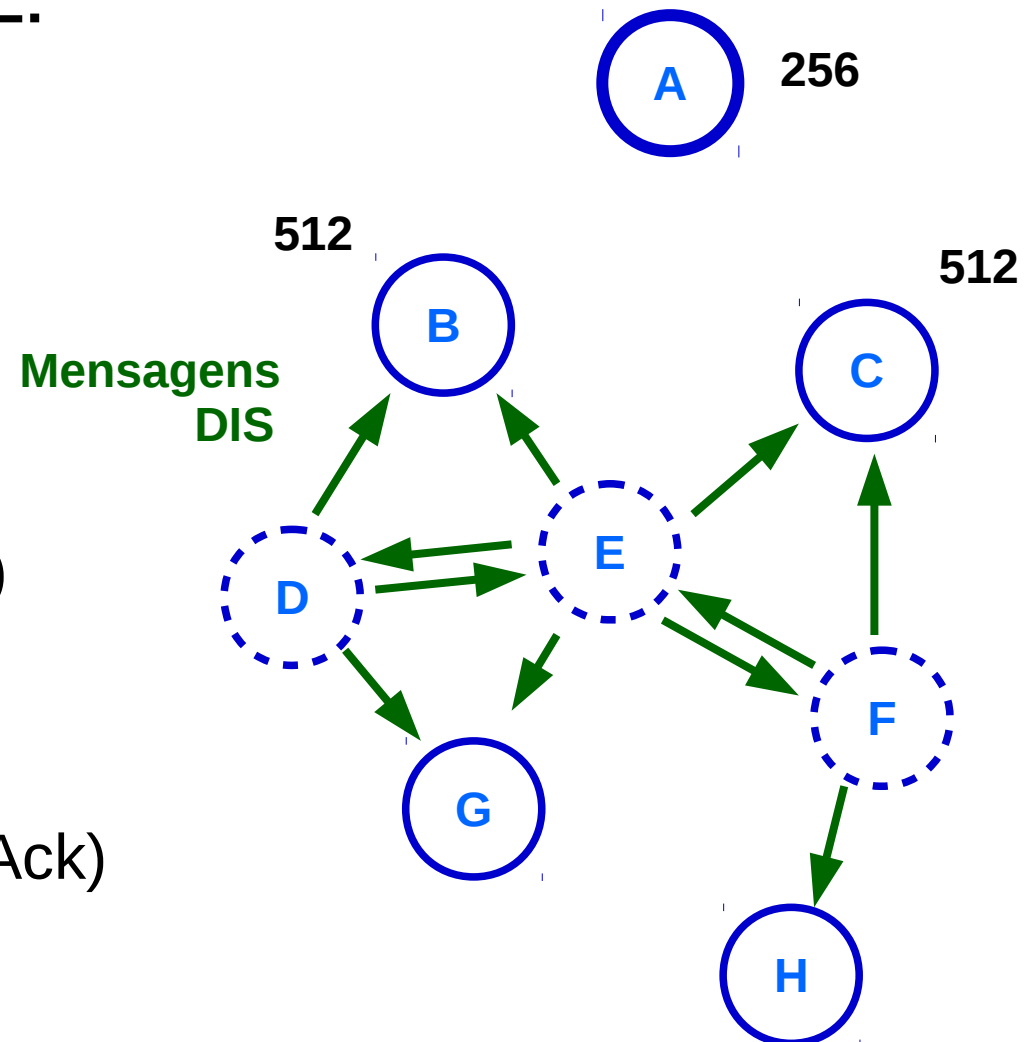
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



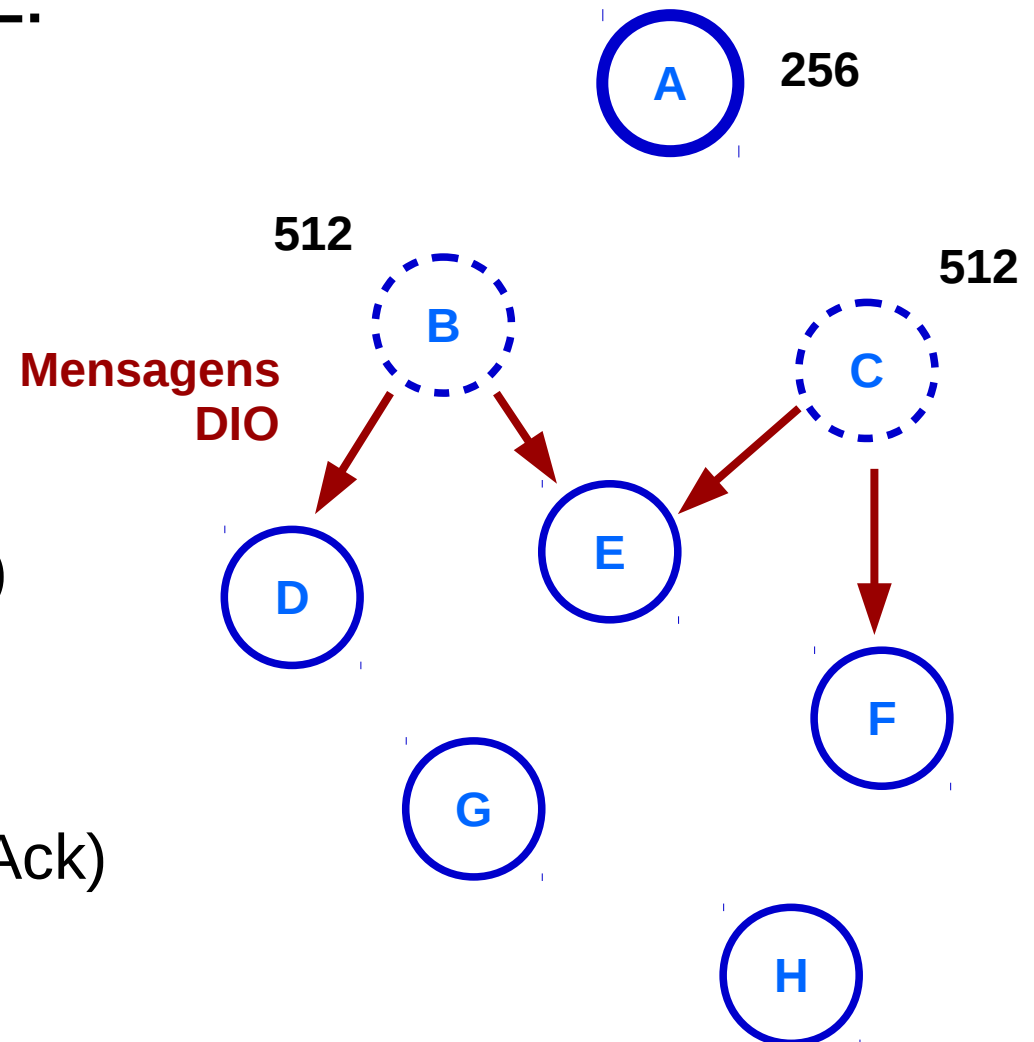
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



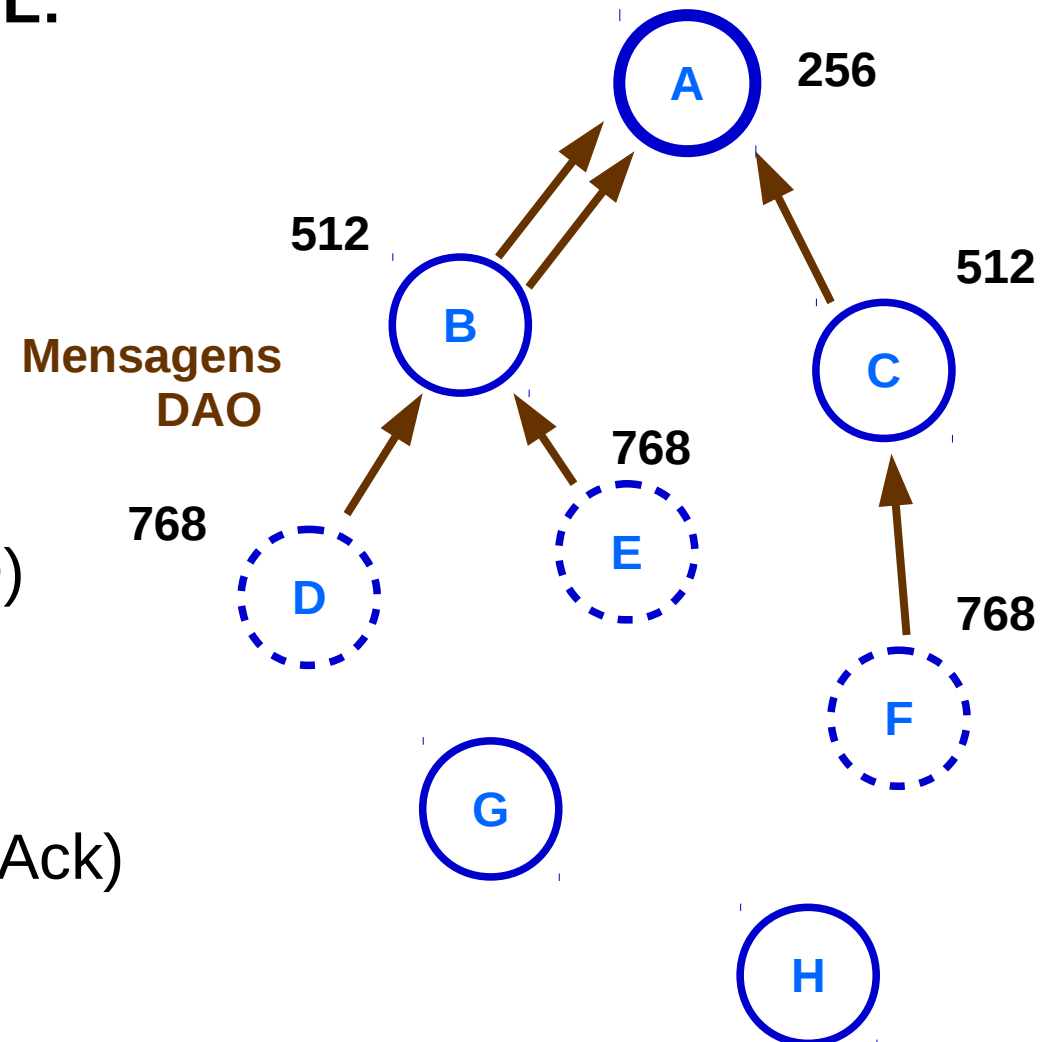
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



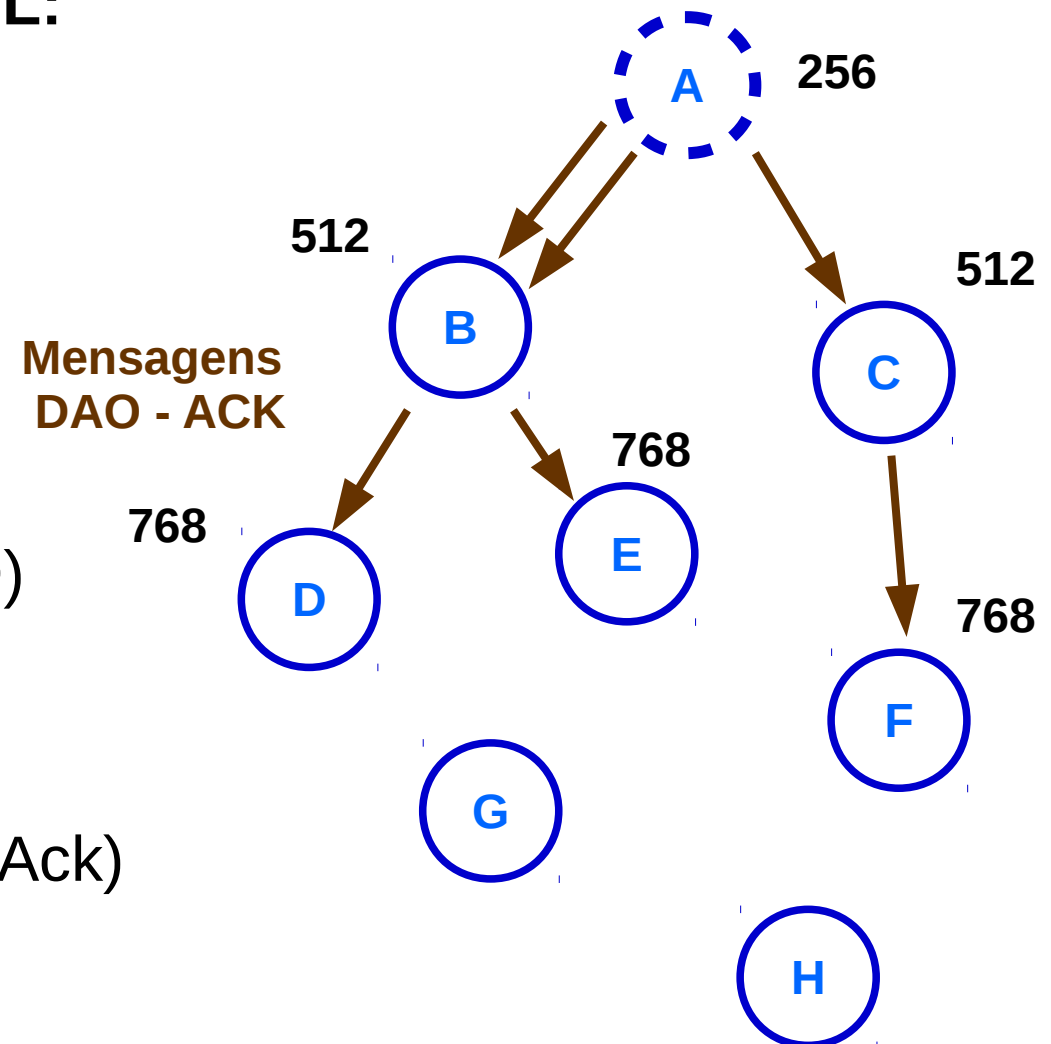
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



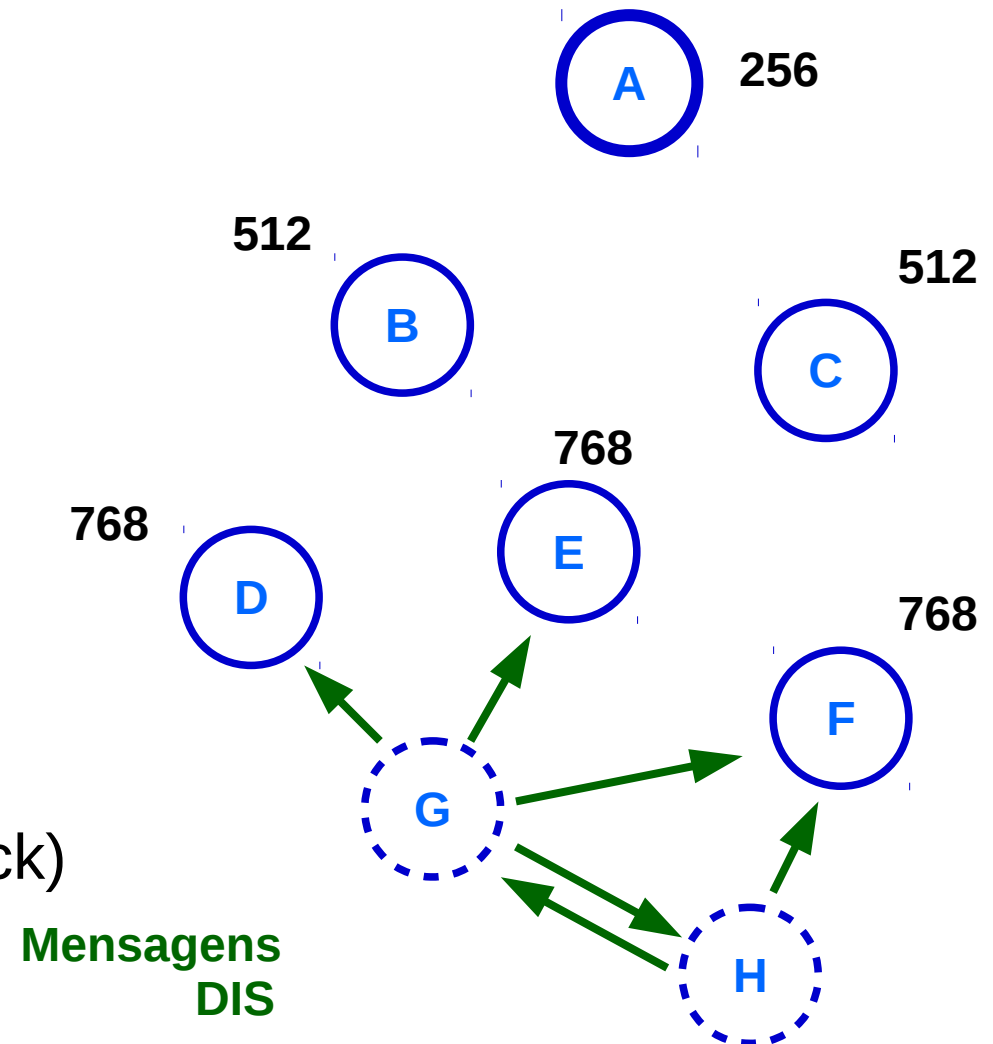
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



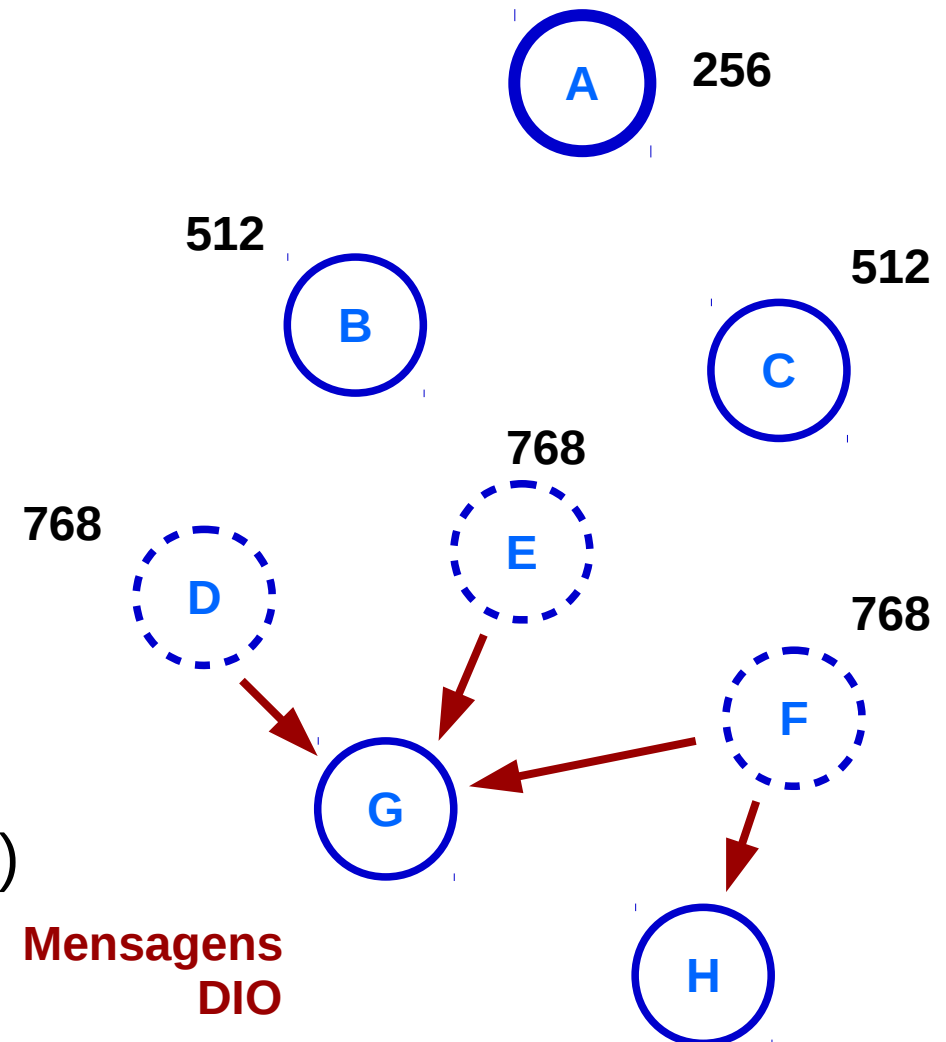
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



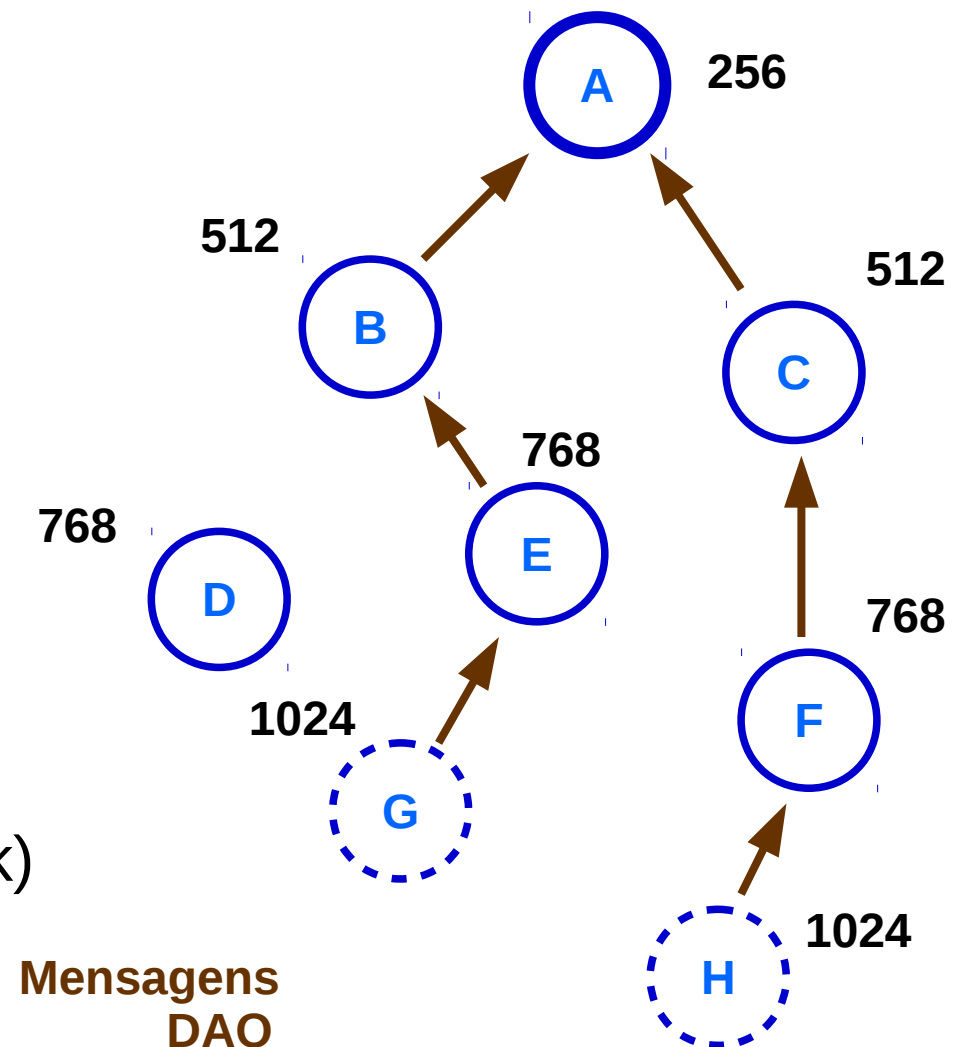
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



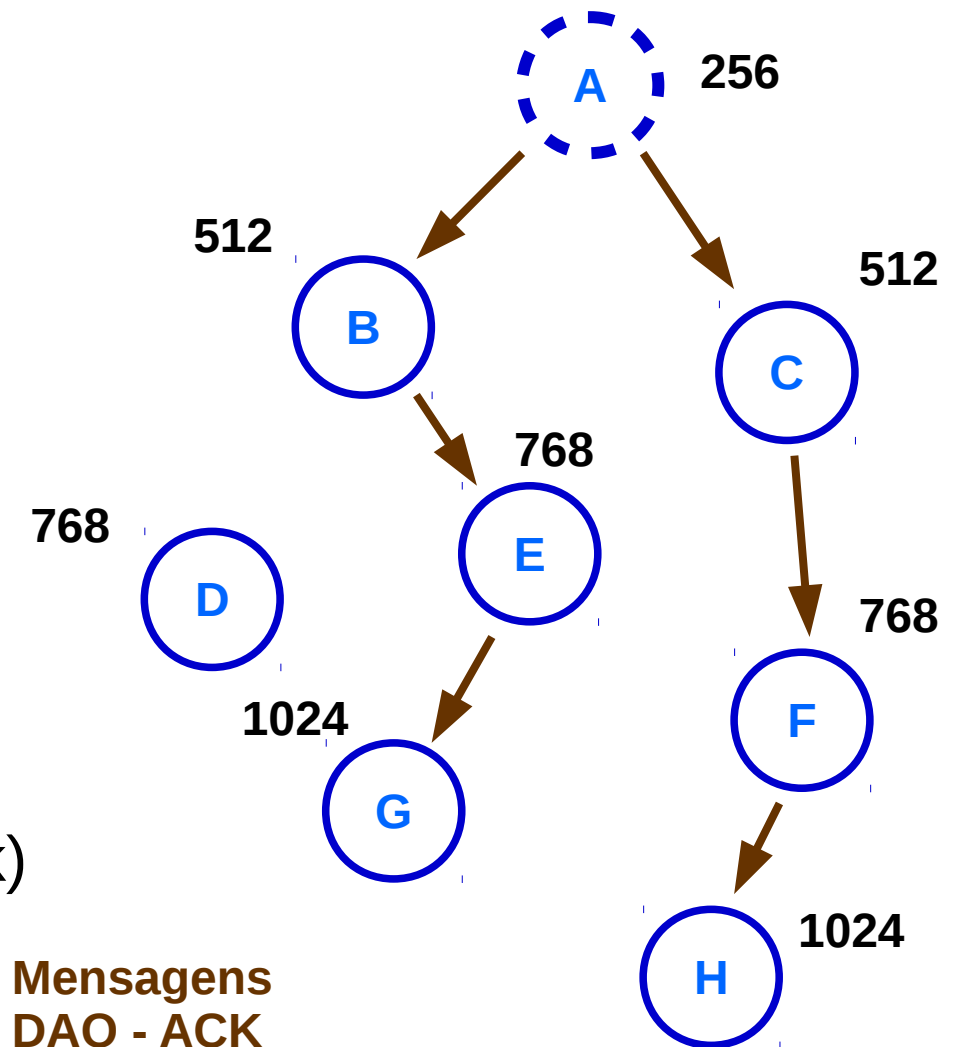
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



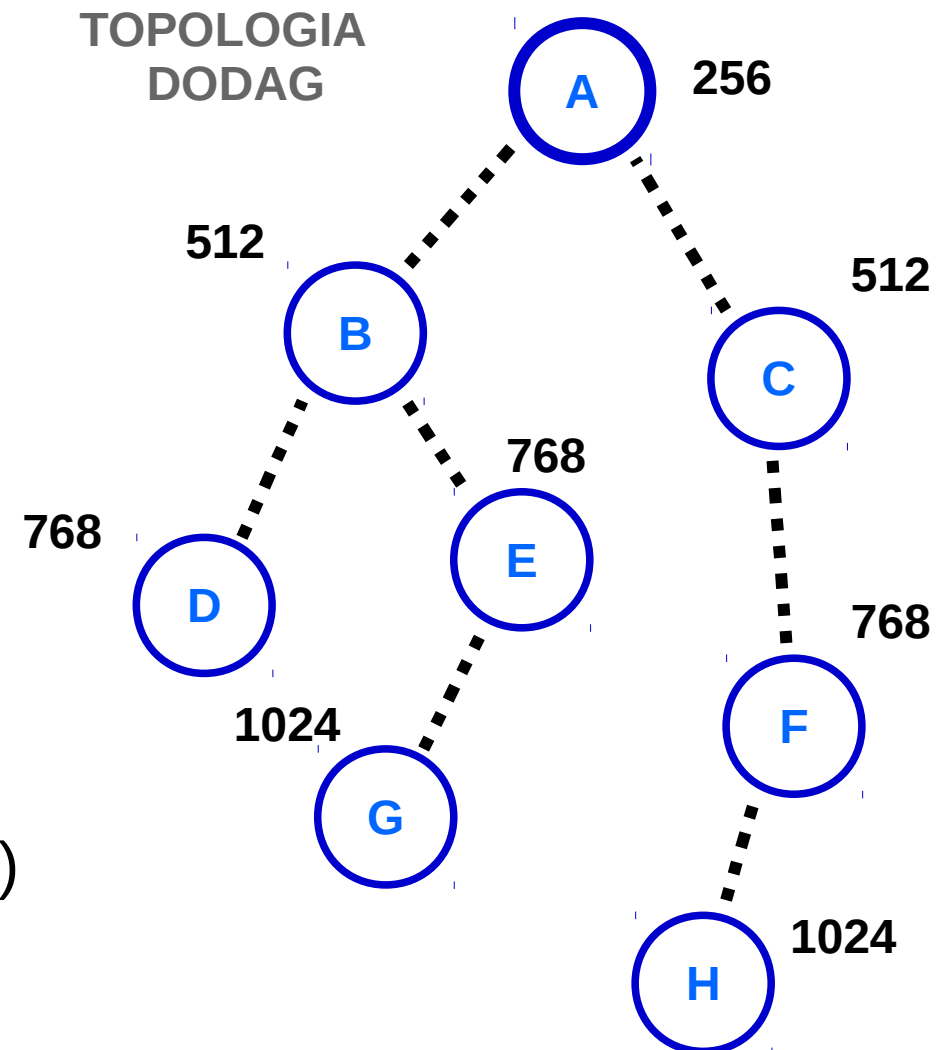
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



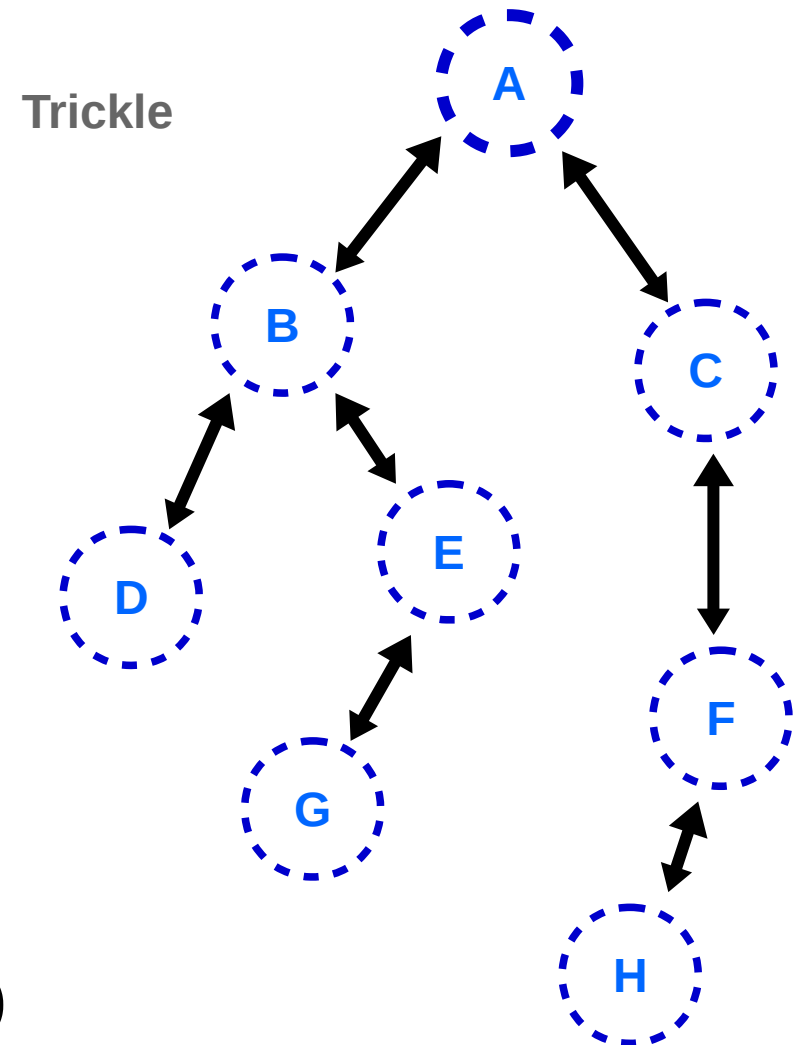
Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)



Convergência do Protocolo RPL:

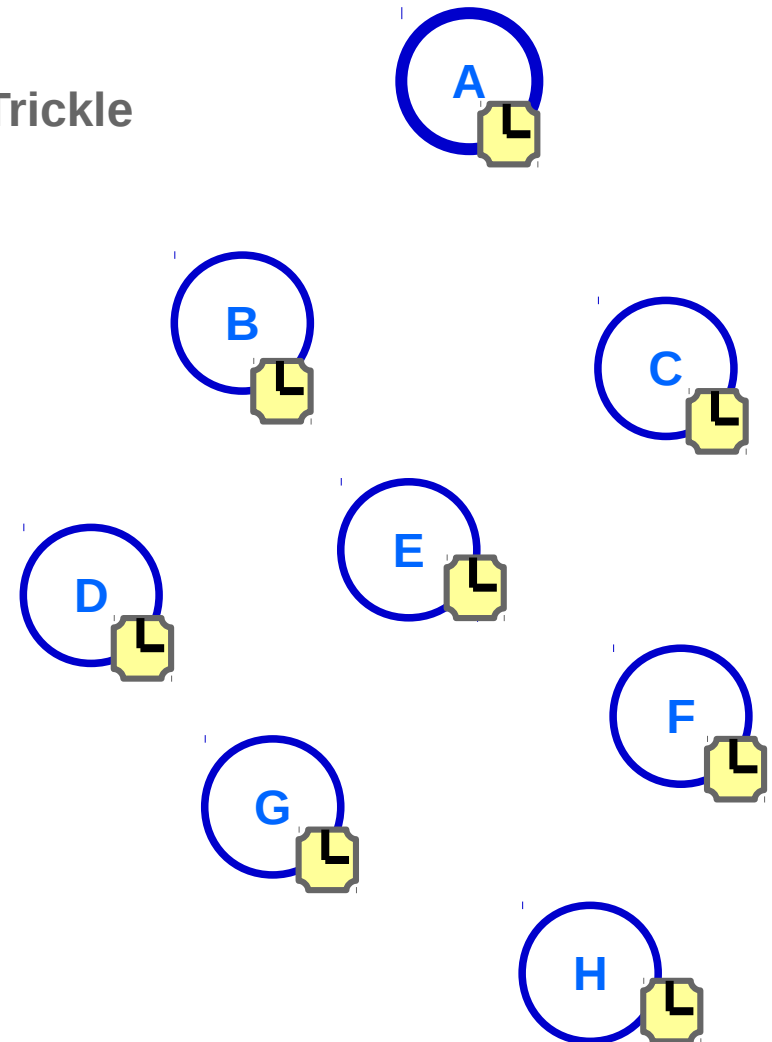
- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)
- Mensagens de Controle (Trickle timer)



Convergência do Protocolo RPL:

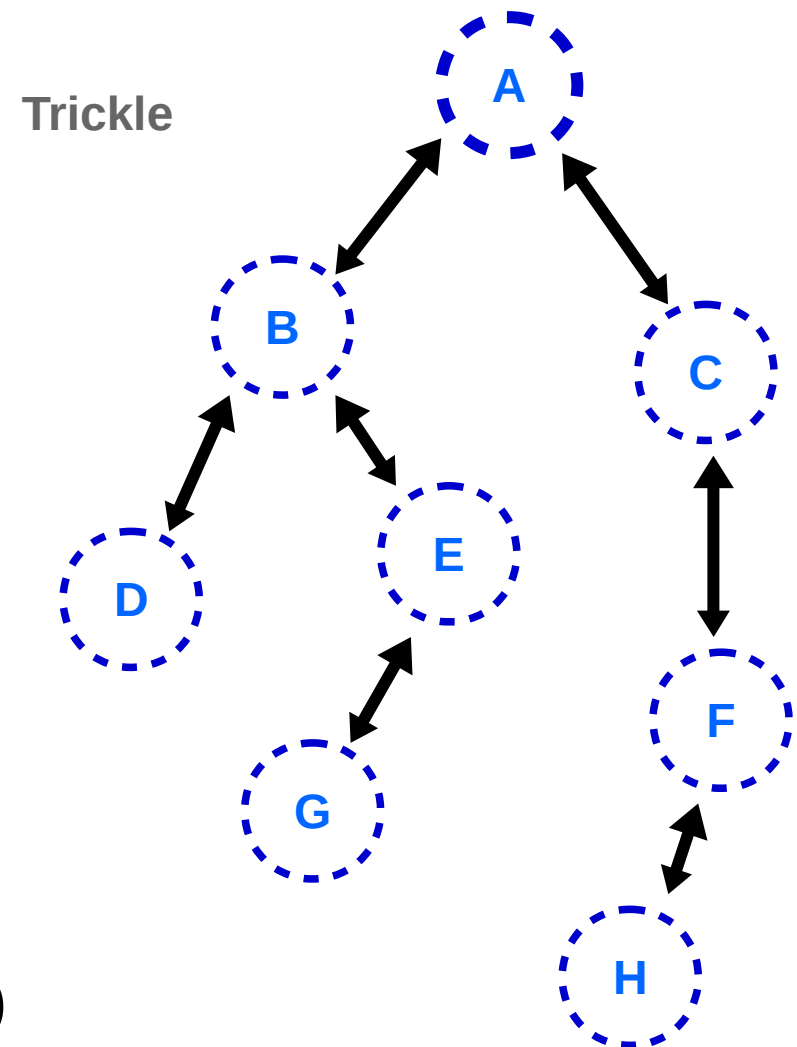
- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)
- Mensagens de Controle (Trickle timer)

Trickle



Convergência do Protocolo RPL:

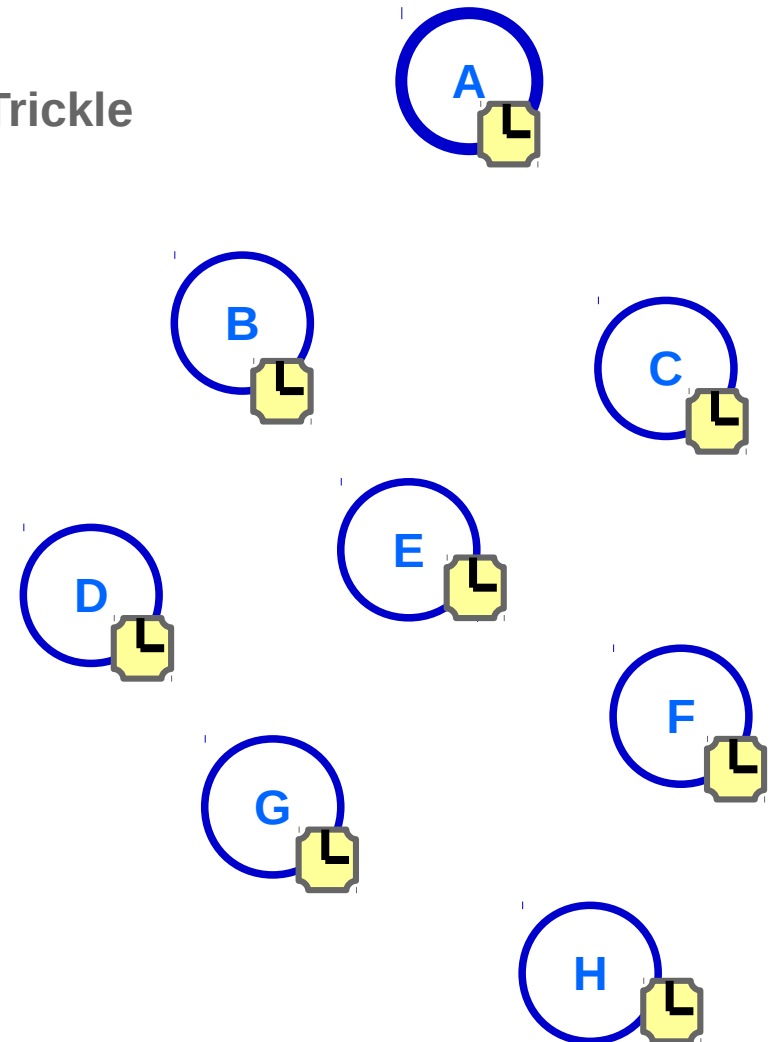
- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)
- Mensagens de Controle (Trickle timer)



Convergência do Protocolo RPL:

- Formar um DAG (grafo)
- Formar DODAG (um nó sink)
- Nó busca por topologia (DIS)
- Nó pai fornece informação (DIO)
- Nó confirma *upward* (DAO)
- Sink confirma *downward* (DAO-Ack)
- Mensagens de Controle (Trickle timer)

Trickle



- RFC 6551 - *Routing Metrics Used for Path Calculation in LLNs*
 - Métrica (melhor caminho)
 - Restrição (evitar caminho)
- DAG Metric Container
 - Mensagens DIO e DAO podem carregar métricas/restrições.
- Objetos de informação (8 objetos)
 - Estado do Nó, Energia do Nó, Contagem de Saltos, Taxa de Transferência, Latência, Qualidade do Enlace, Transmissão Esperada e Customizado.
- Cálculo do caminho:
 - com base em atributos do Nó ou do Enlace
 - quantitativas ou qualitativas
 - gravadas ou agregadas

a) Objeto de Atributo e Estado do Nó (*NSA – Node State and Attribute Object*)

- dados: um bit para informação
- exemplo: informar se o Nó está sobrecarregado

b) Objeto de Energia do Nó (*NE – Node Energy Object*)

- alimentação: principal, colheita ou bateria
- dados: 8 bits para estimar em %

$$E_E = \frac{E_bat}{E_0(T - t)/T}$$

E_E (estimar energia disponível %); E_bat (energia restante);
 E_0 (energia inicial); T (tempo de vida esperado) e
 t (tempo de vida em que a bateria foi utilizada).

c) Objeto de Contagem de Saltos (*HC – Hop Count Object*)

- dados: 8 bits para contagem de saltos
1 bit = 1 salto (hop)

b) Taxa de Transferência do Enlace (*Throughput*)

- dados: 32 bits para taxa de transferência
1 bit = 1 byte por segundo

e) Latência do Enlace (*Latency*)

- dados: 32 bits para representar um valor de atraso
1 bit = 1 microssegundo

f) Nível de Qualidade do Enlace (LQL – *Link Quality Level*)

- dados: 3 bits para representar níveis
Nível 0x0 = qualidade desconhecida
Nível próximo de 0x1 = excelente
Nível próximo de 0x7 = péssima

g) Transmissão Esperada do Enlace (*ETX – Expected Transmission*)

→ dados: 16 bits para a métrica ETX
ETX=0x80 equivale ETX=1

$$ETX = \frac{1}{Df \times Dr}$$

Df (delivered – forwarded): probabilidade de um pacote ser recebido com sucesso pelo nó vizinho.

Dr (delivered – received): probabilidade de um pacote ACK ser recebido com sucesso pelo próprio nó.

h) Enlace Colorido (*LC – Link Color*)

→ dados: 10 bits para representar cores

Pode ser customizado, exemplo:

- Enlace Vermelho: texto puro
(deve ser evitado)
- Enlace Verde: criptografado
(preferencial)

Funções Objetivas:

Responsáveis por tratar dos Objetos (métricas/restrições) que são recebidos por um um nó e tomar a decisão de qual o melhor roteamento até o nó raiz.

- Selecionar o nó pai preferido
- Calcular o próprio valor de rank

Função Objetiva Zero

(OF0 - *Objective Function Zero*)

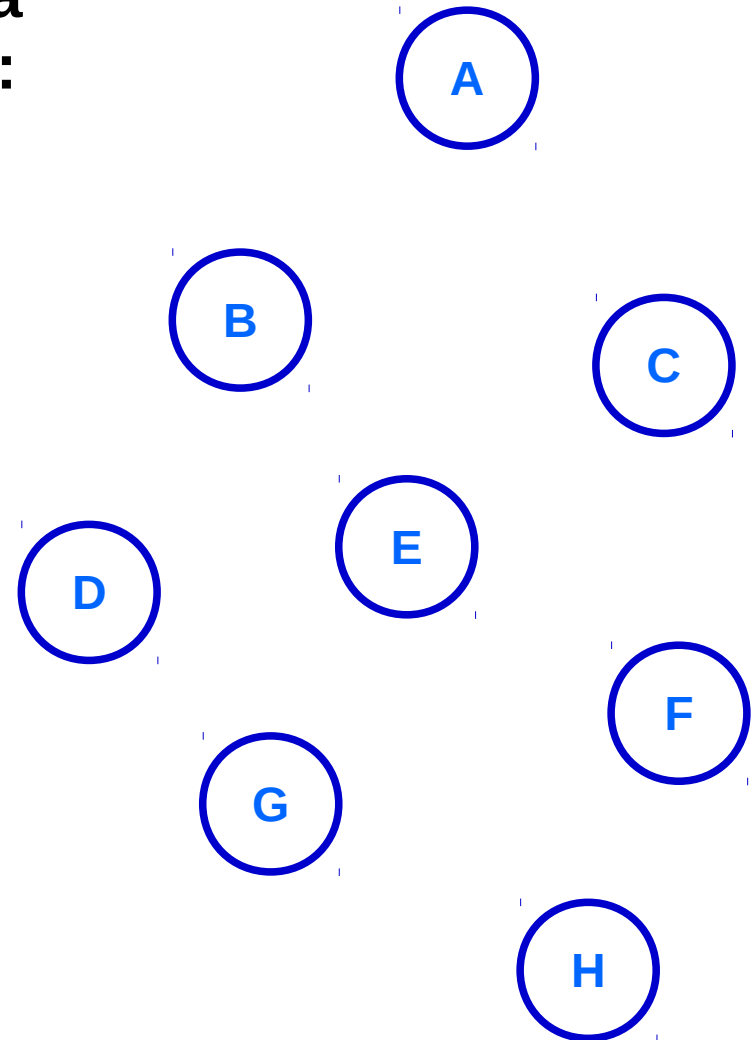
- RFC 6552
- Não faz uso dos objetos, ou seja, sem métricas
- Valor de *rank* é incrementado para decidir melhor caminho

Função Objetiva de Posicionamento Mínimo com Histerese (*MRHOF – Minimum Rank Hysteresis Objective Function*)

- RFC 6719
- Carregar uma das três métricas em mensagens DIO:
Transmissão esperada (ETX), Latência ou
Contagem de Saltos (HC).
- Opcionalmente a métrica ETX pode ser combinada com
o valor de rank. (soma simples)
- Histerese:
Possui um limiar (*threshold*) para evitar que os nós
façam trocas constantes de nós pais; mantendo,
assim, a estabilidade da topologia de roteamento.

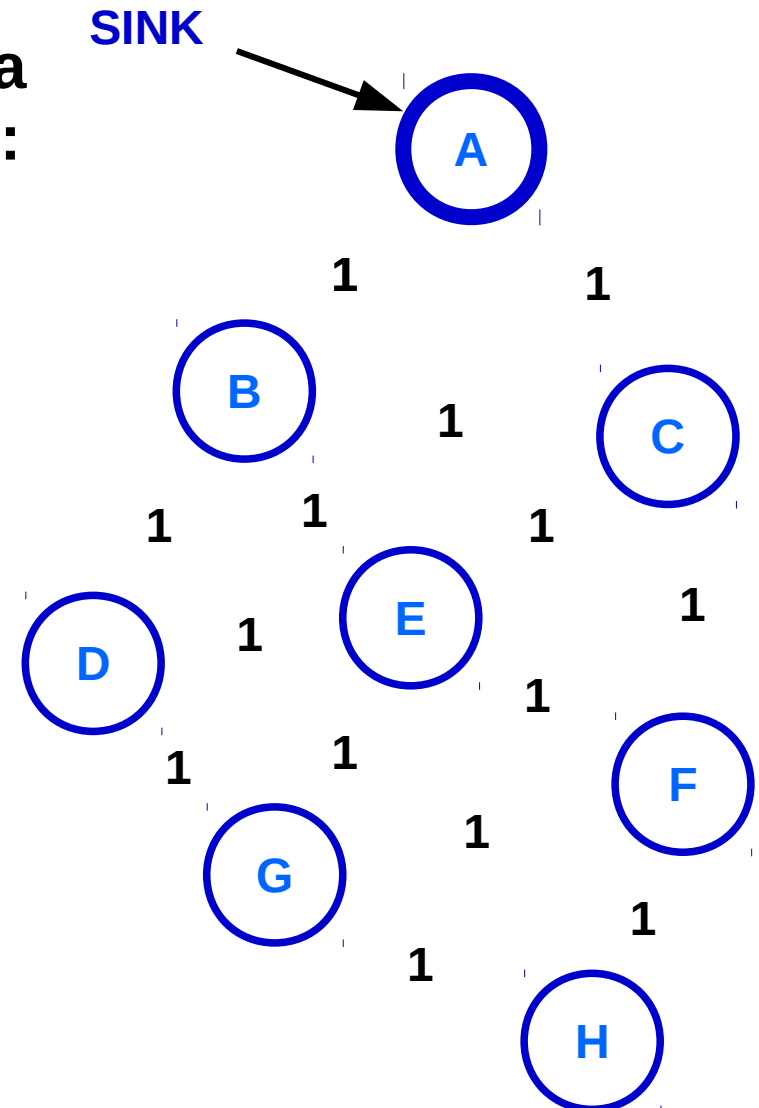
Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Padrão do SO Contiki



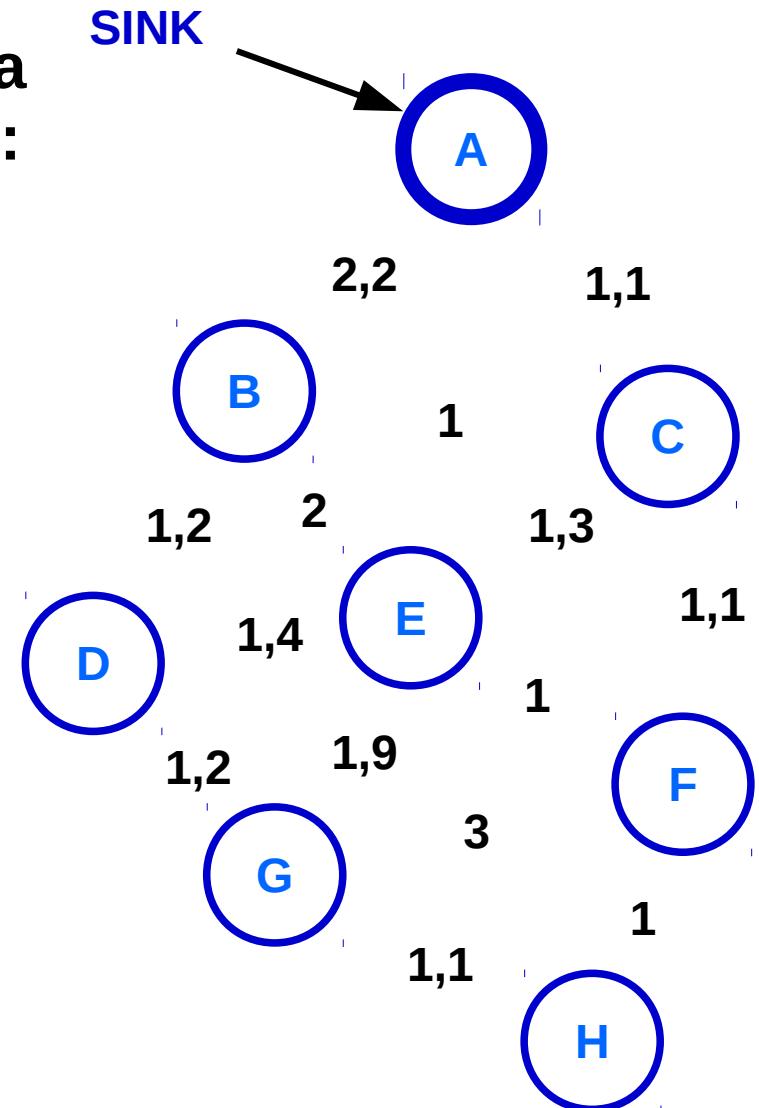
Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada



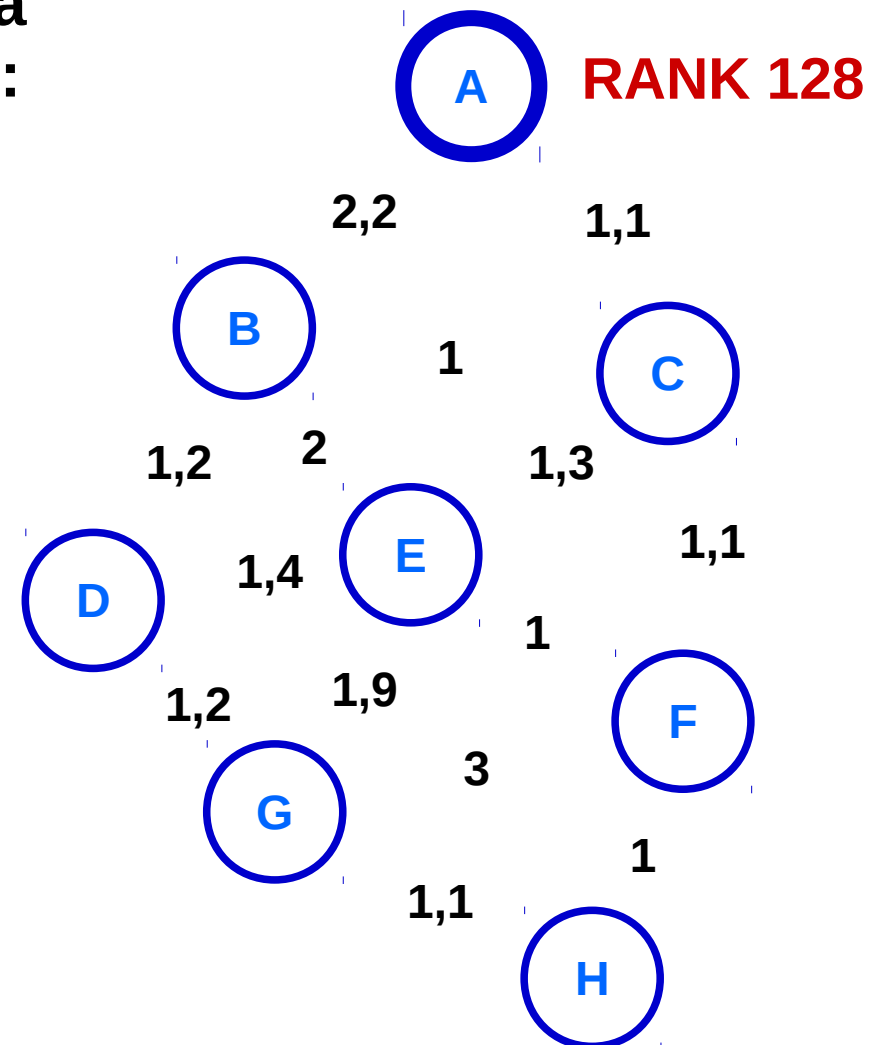
Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

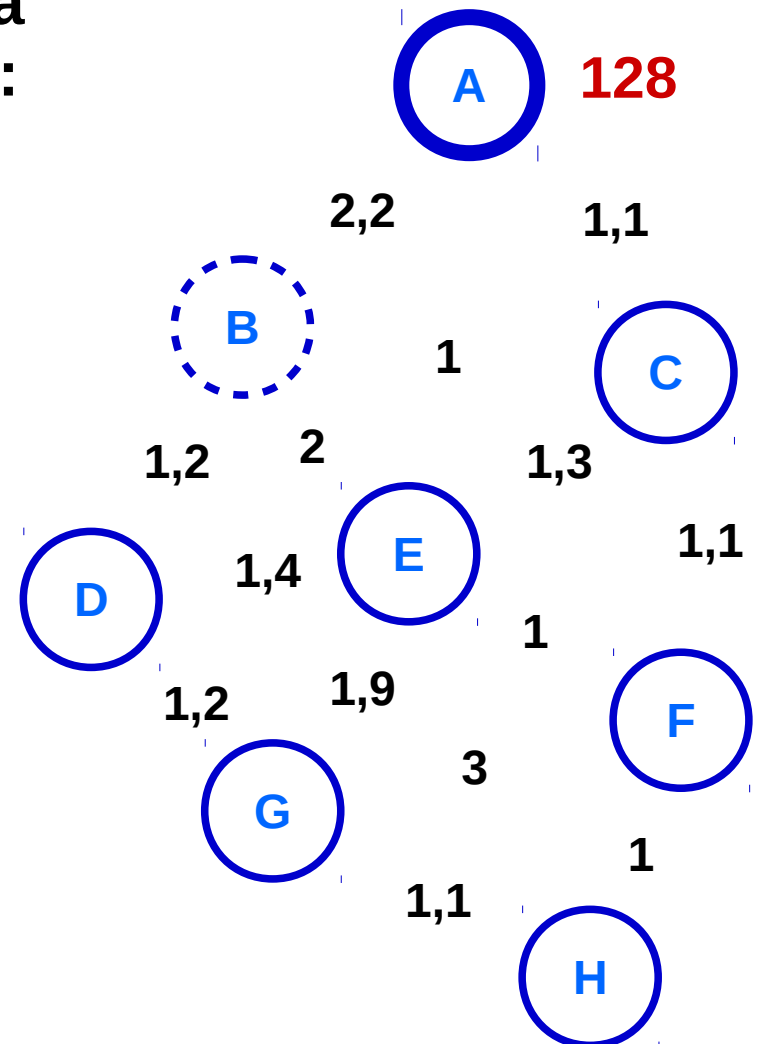
- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó B calcula Rank:

Nó pai A Rank 128

ETX = 2,2 → 282

Rank = 128+282 = **410**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

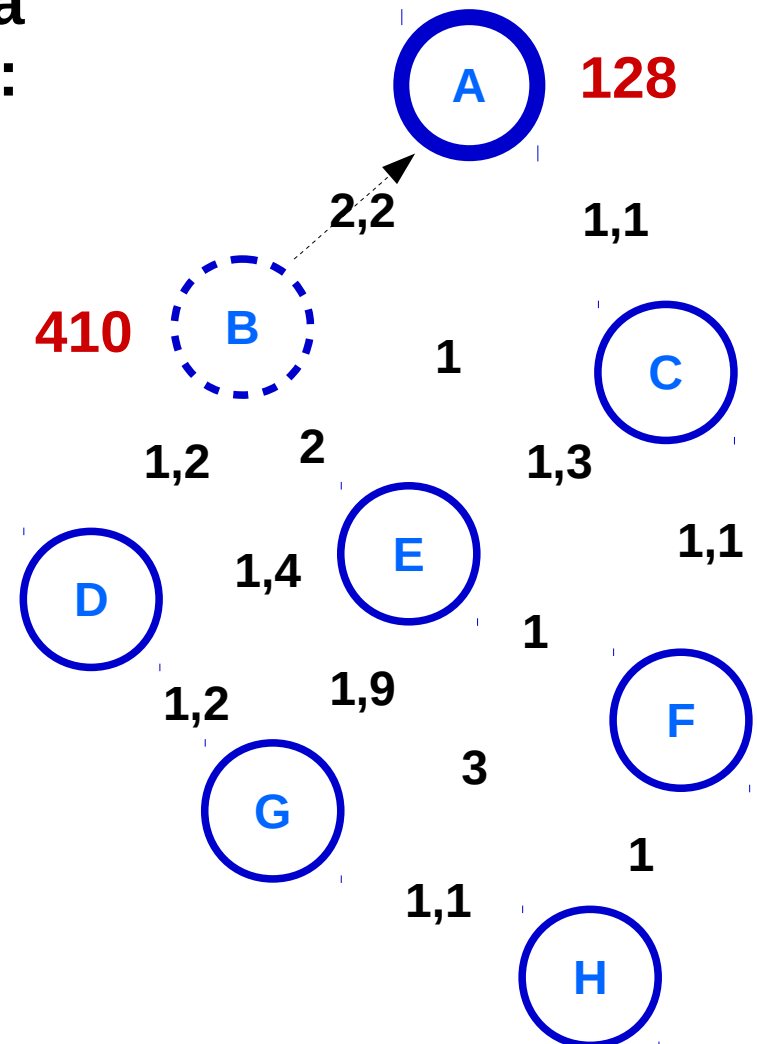
- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó B calcula Rank:

Nó pai A Rank 128

ETX = 2,2 → 282

Rank = 128+282 = **410**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

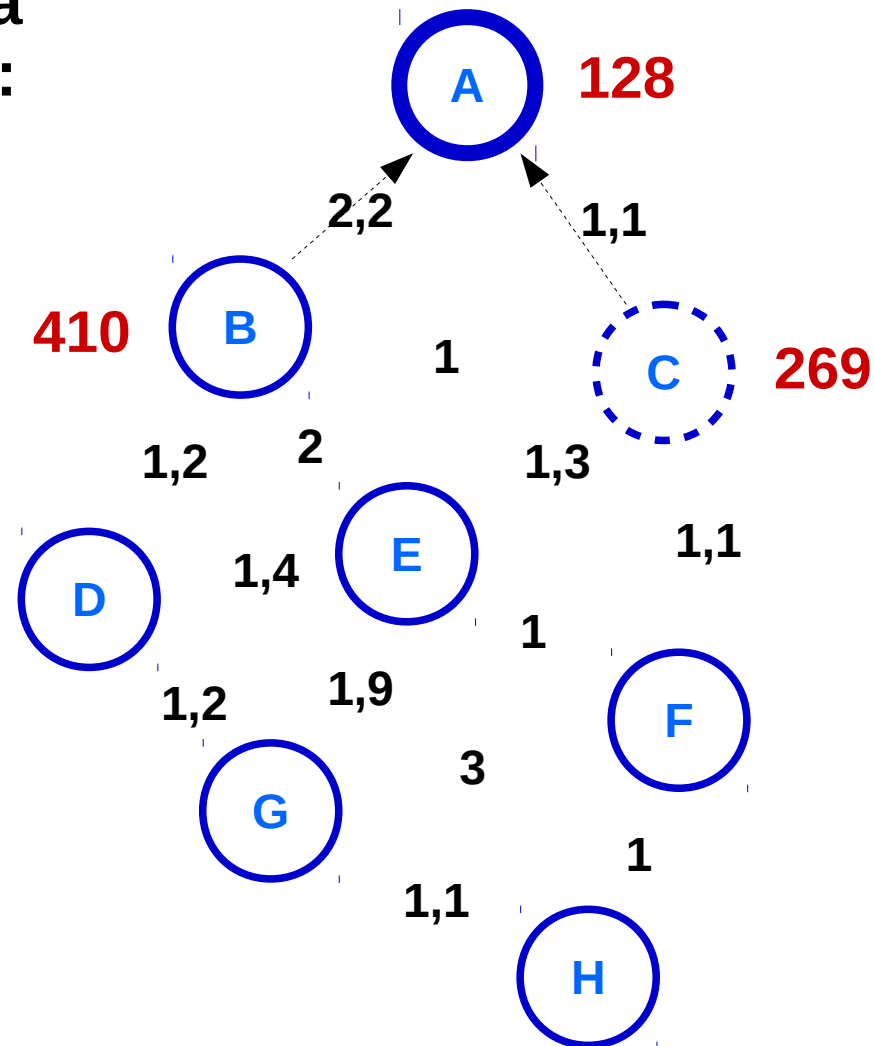
- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó C calcula Rank:

Nó pai A Rank 128

ETX = 1,1 → 141

Rank = 128+141 = **269**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

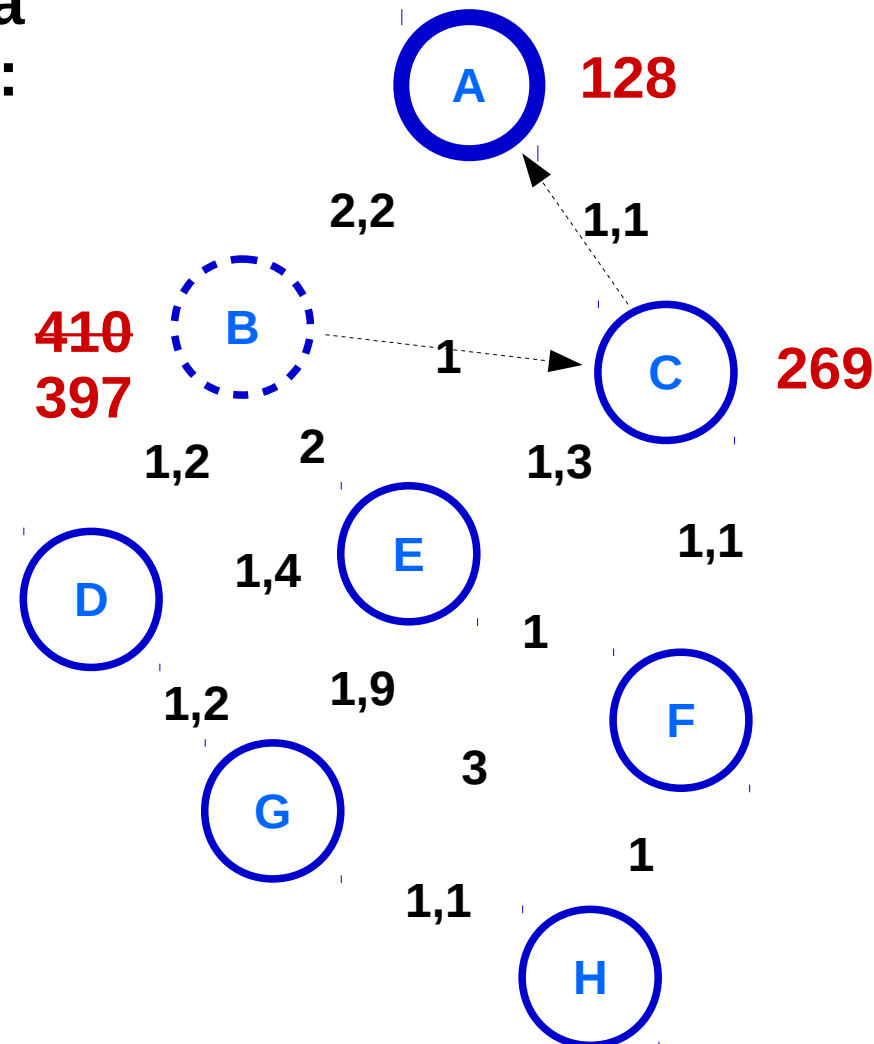
- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó B recalcula Rank:

Nó pai C Rank 269

ETX = 1 → 128

Rank = 269+128 = **397**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó E calcula Rank:

Nó pai B Rank 397

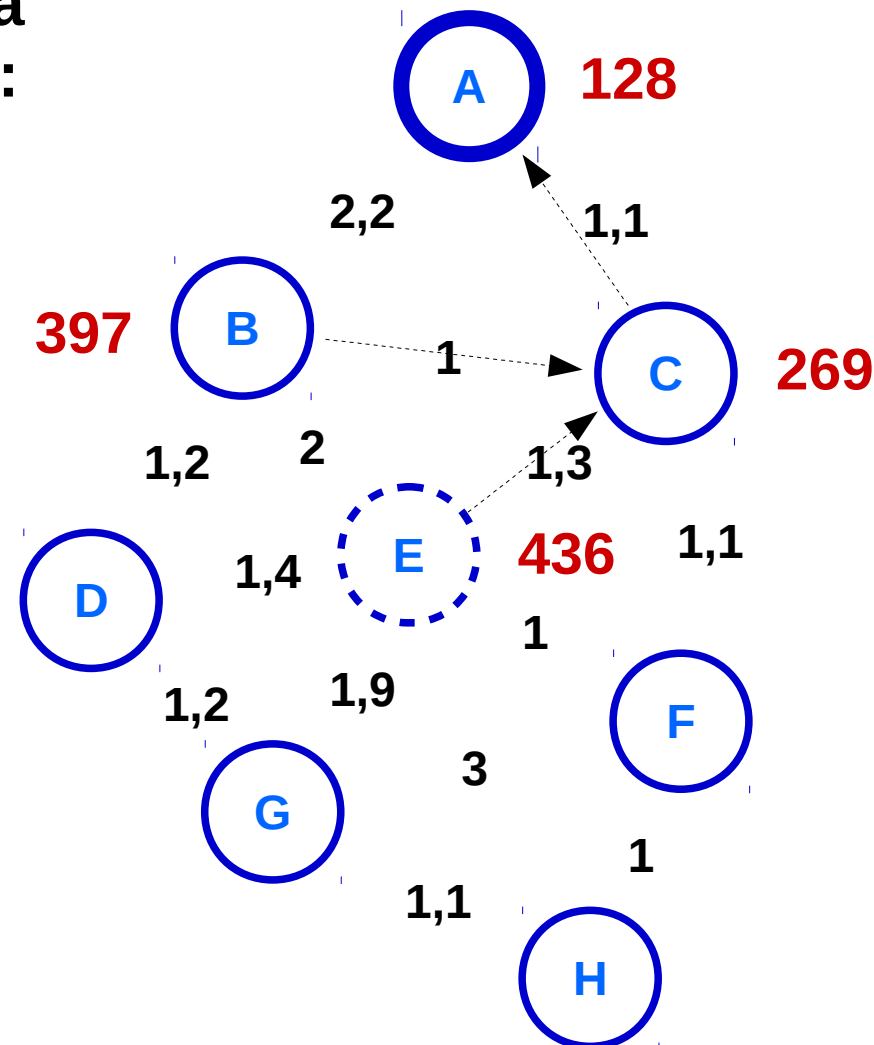
ETX = 2 → 256

Rank = 397+256 = **653 (via B)**

Nó pai C Rank 269

ETX = 1,3 → 167

Rank = 269+167 = **436 (via C)**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó D calcula Rank:

Nó pai B Rank 397

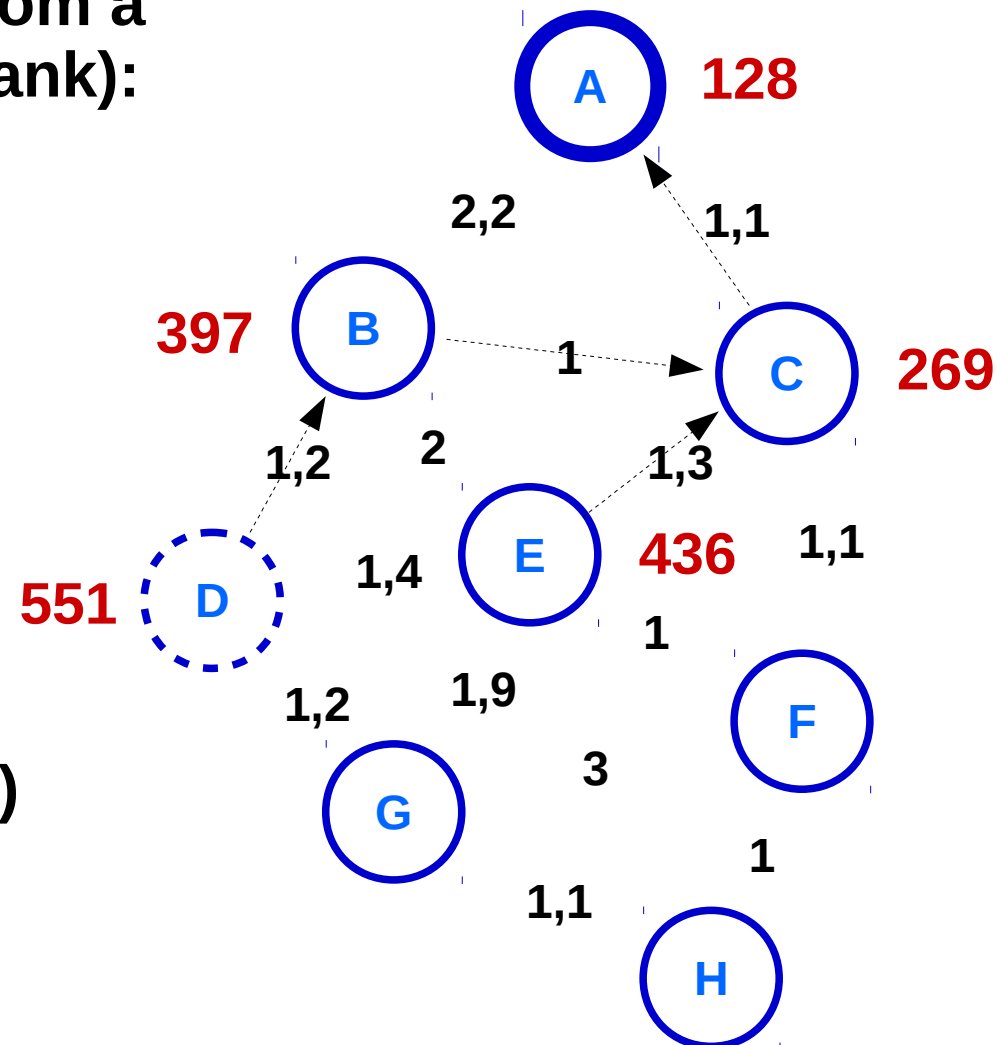
ETX = 1,2 → 154

Rank = 397+154 = **551 (via B)**

Nó pai E Rank 436

ETX = 1,4 → 180

Rank = 436+180 = **616 (via E)**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó F calcula Rank:

Nó pai C Rank 269

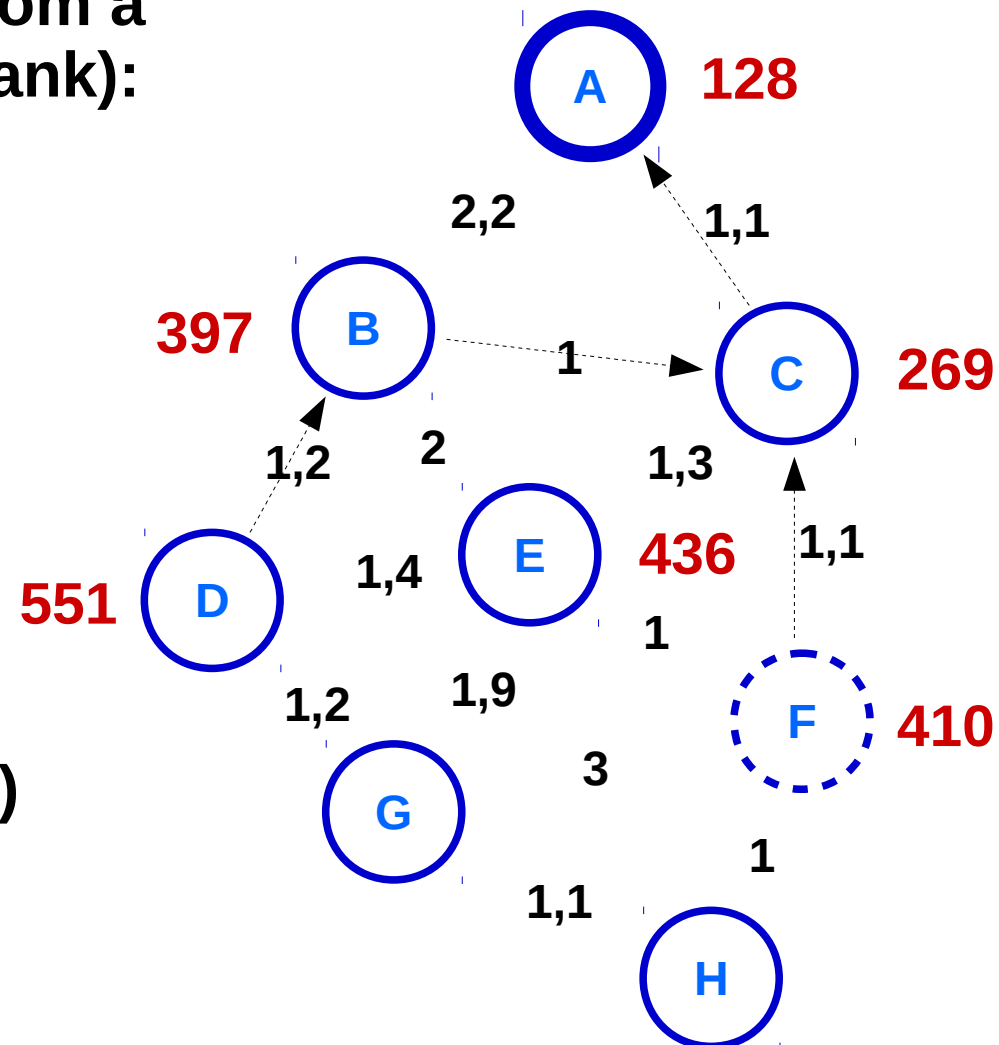
ETX = 1,1 → 141

Rank = 269 + 141 = **410 (via C)**

Nó pai E Rank 436

ETX = 1 → 128

Rank = 436 + 128 = **564 (via E)**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

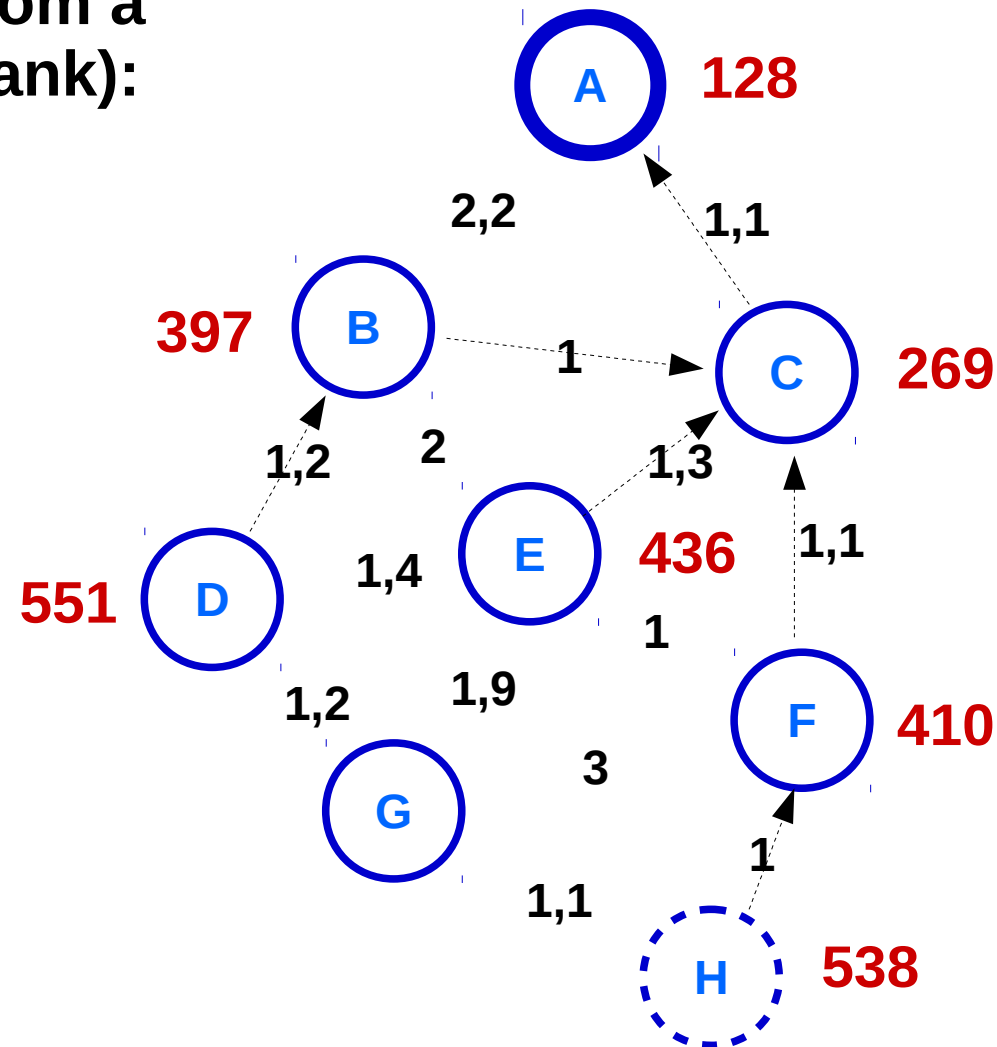
- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Nó H calcula Rank:

Nó pai F Rank 410

ETX = 1 → 128

Rank = 410 + 128 = **538**



Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

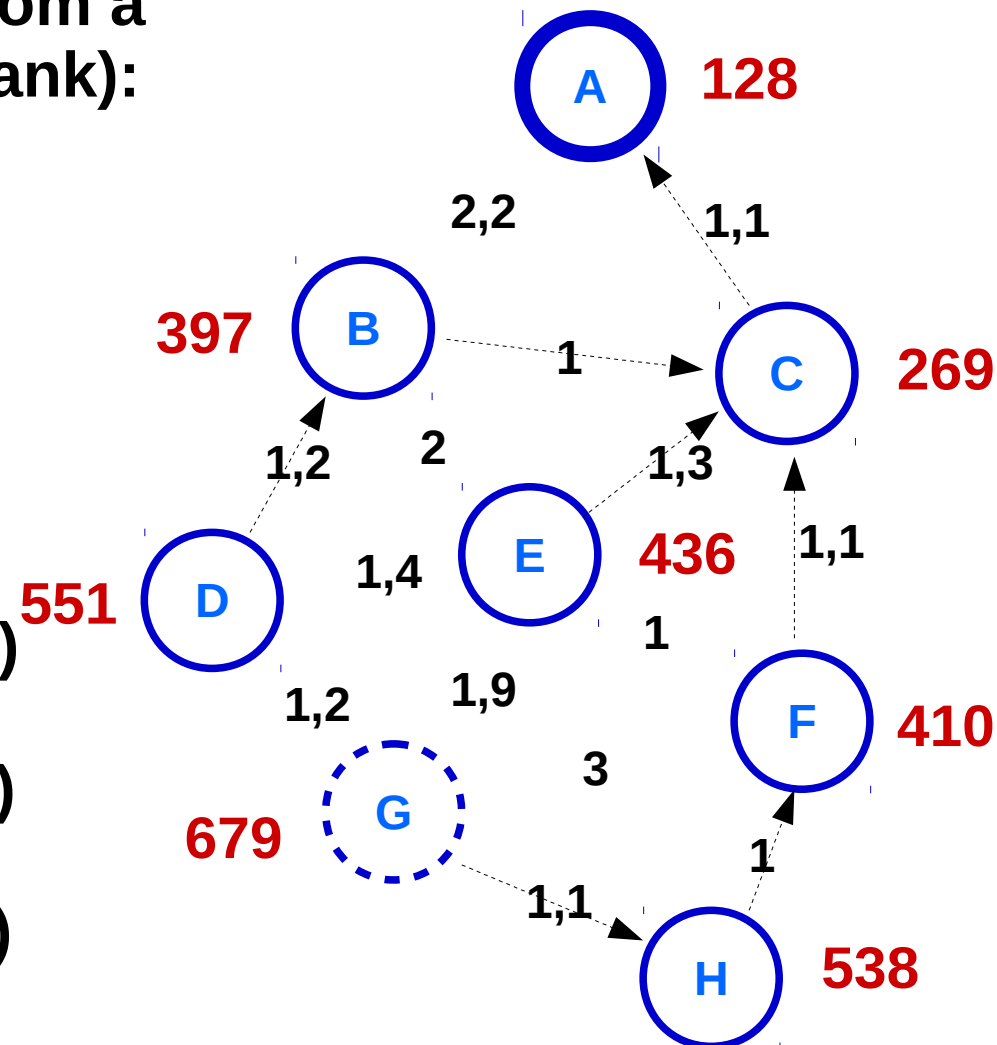
Nó G calcula Rank:

Rank = 551 + 154 = **705 (via D)**

Rank = 436 + 244 = **680 (via E)**

Rank = 410 + 244 = **794 (via F)**

Rank = 538 + 141 = **679 (via H)**

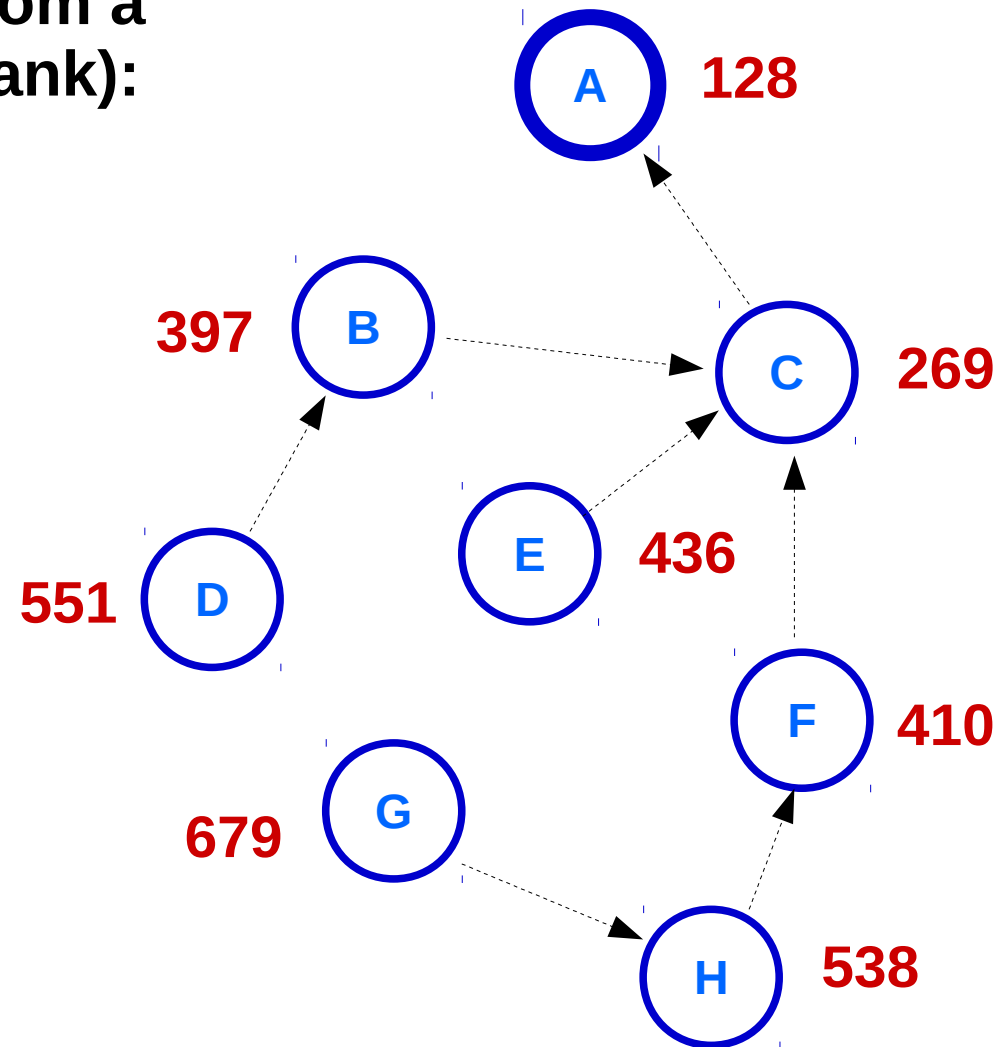


Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Topologia de
Roteamento
Dinâmica

Depende de ETX

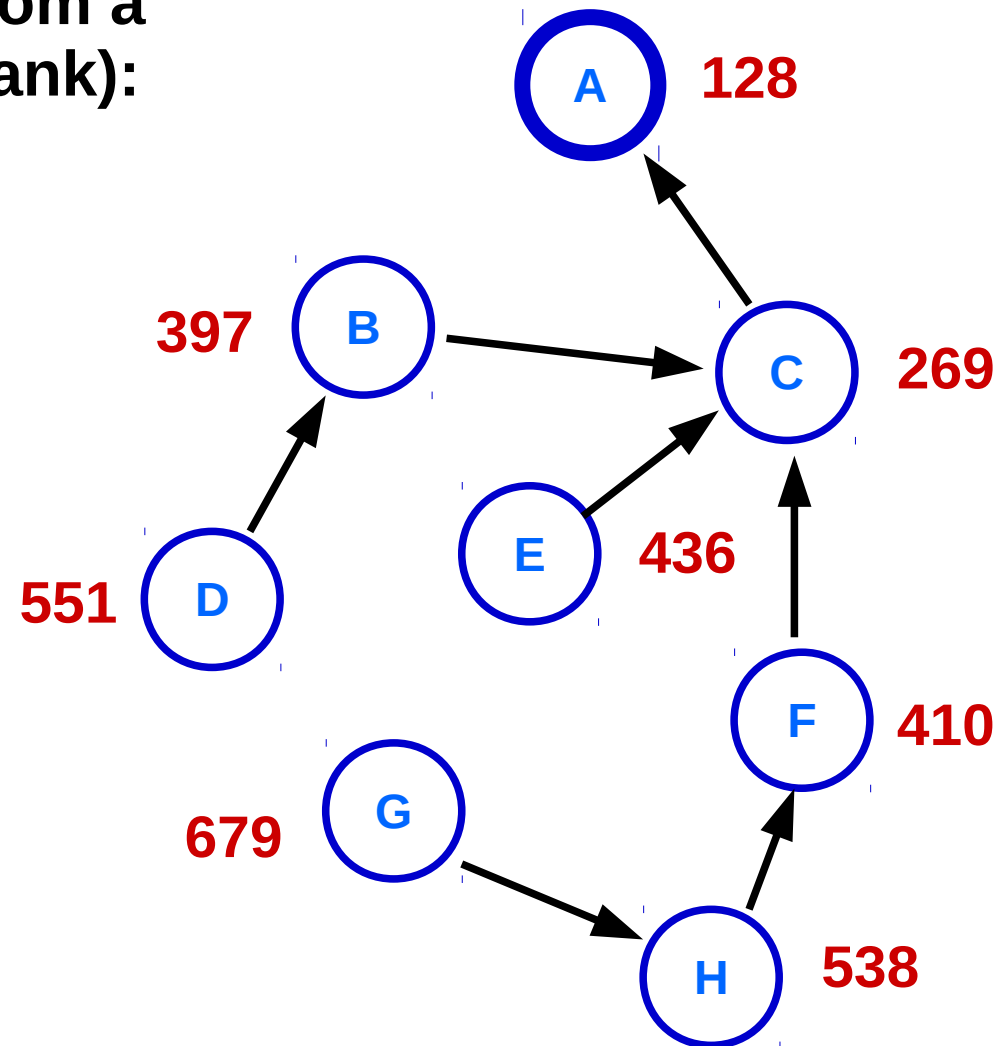


Convergência do Protocolo RPL com a MRHOF (ETX combinada com o Rank):

- Comunicação é estimada
- Nós se comunicam e ETX modifica
- MinHopRankIncrease = 128

Topologia de
Roteamento
Dinâmica

Depende de ETX



Considerações Finais

RFC 6550 - IPv6 Routing Protocol for LLNs

RFC 6551 – Routing Metrics Used for Path Calculation in LLNs

RFC 6552 – Objective Function Zero for the RPL

RFC 6719 - The Minimum Rank with Hysteresis Objective Function