

Università di Roma Tor Vergata  
Corso di Laurea triennale in Informatica  
**Sistemi operativi e reti**  
A.A. 2016-17

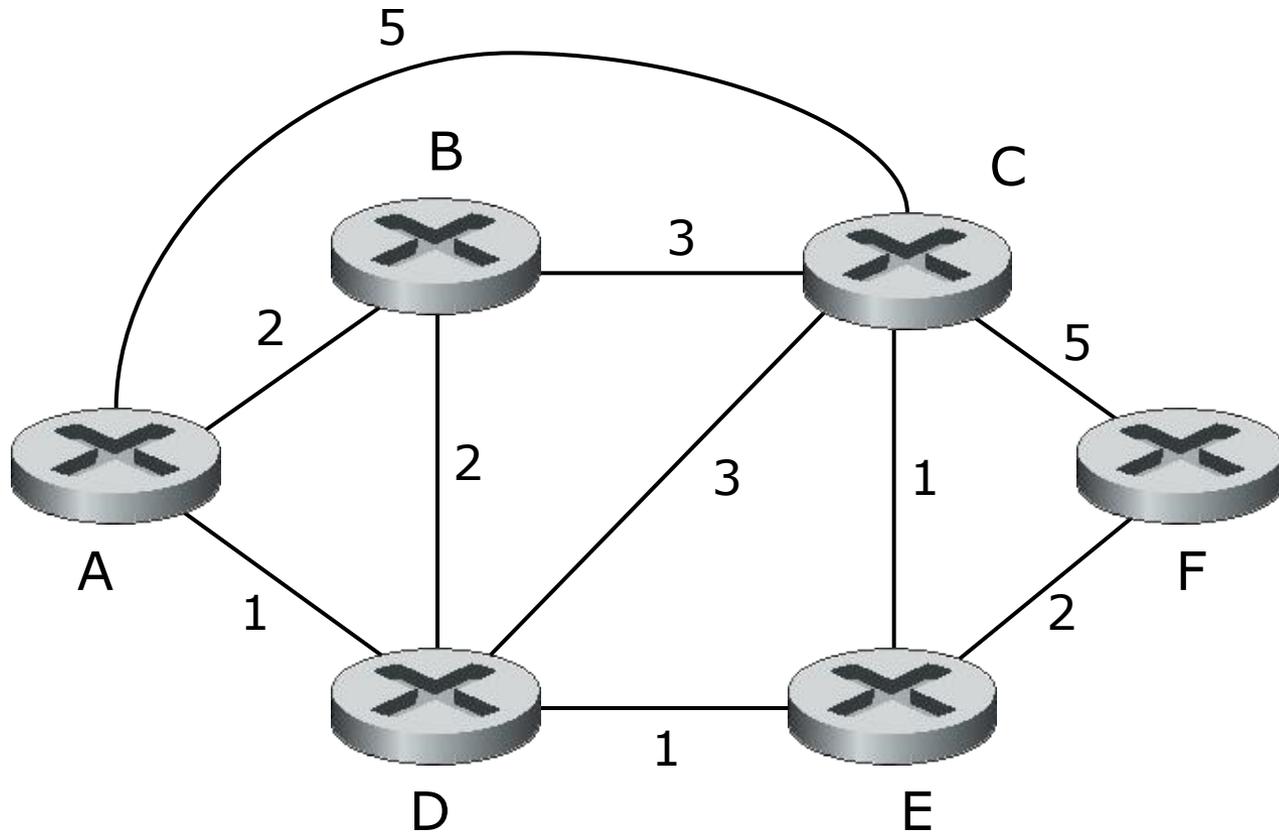
Pietro Frasca

Parte II: Reti di calcolatori  
Lezione 18 (42)

Venerdì 12-05-2017

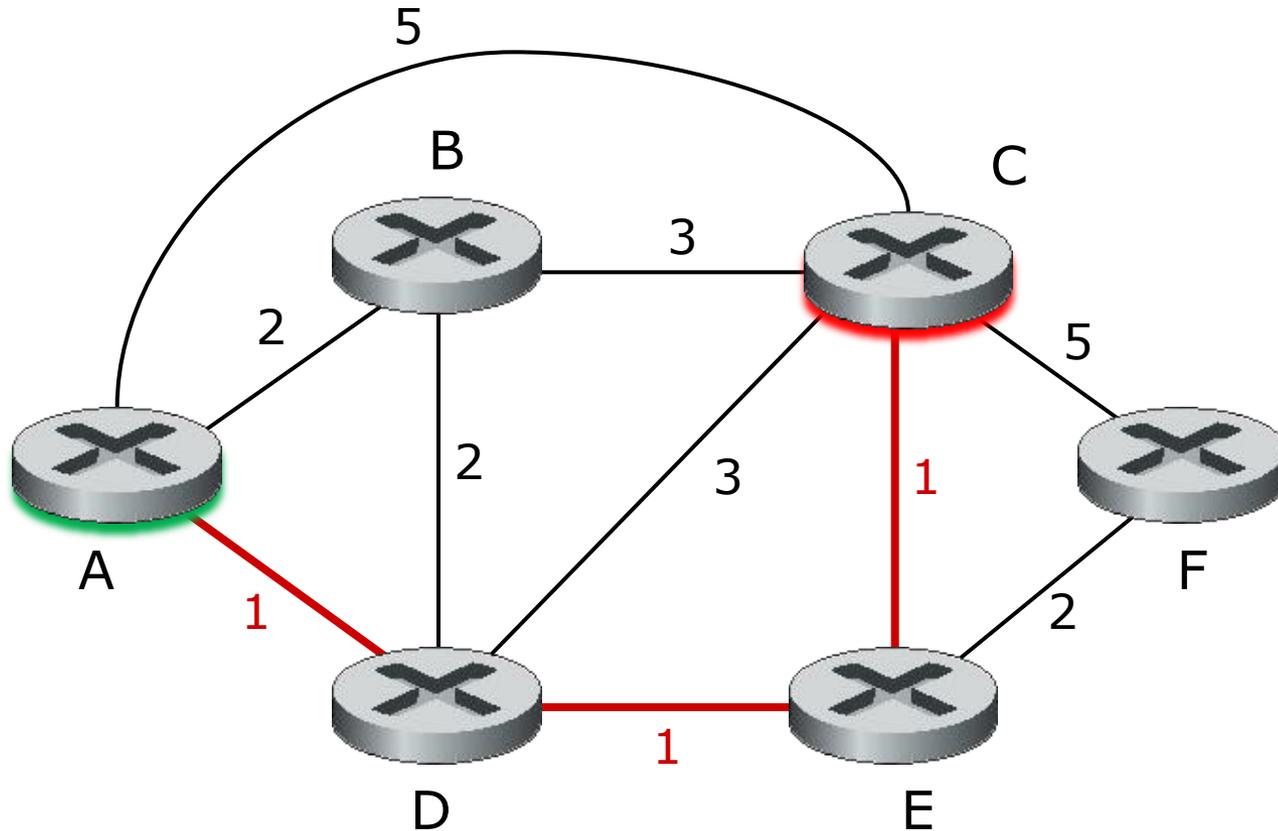
# Algoritmi di instradamento

- **I protocolli di instradamento** (*routing protocol*) dello strato di rete hanno il compito di **determinare un percorso**, dalla sorgente alla destinazione, che i pacchetti devono seguire che sia a "**minimo costo**".
- Poiché un host è collegato al **router di default**, il problema di instradare un datagram dalla sorgente alla destinazione si riduce ad instradare il datagram dal router sorgente al router destinazione.
- Un modello astratto per lo studio di algoritmi di instradamento è il grafo illustrato in figura. I nodi rappresentano i router e gli archi i collegamenti che connettono tra loro i router. Un collegamento può avere anche un peso associato per rappresentare varie grandezze, come ad esempio la distanza tra i nodi, la larghezza di banda, il livello di congestione, o anche un valore che dipende da una funzione delle varie grandezze.



Modello astratto di rete.

- Nella Figura, per esempio, il percorso di minor costo fra il nodo A (sorgente) e il nodo C (destinazione) è ADEC.



Percorso minimo tra A e C.

# Classificazione degli algoritmi

## Algoritmi globali e decentralizzati

- In genere, gli algoritmi di instradamento sono classificati in **globali** e **decentralizzati**.
- Un **algoritmo di instradamento globale** calcola il percorso di minor costo tra una sorgente e una destinazione usando **informazioni complete e globali della rete**.
- L'algoritmo, prima di essere eseguito, richiede di conoscere le connessioni tra tutti i nodi e tutti i pesi (costi) dei collegamenti prima di eseguire il calcolo del cammino minimo.
- Questi algoritmi, con informazioni di stato globali, sono chiamati algoritmi basati sullo **stato dei collegamenti** (***link state algorithm***).
- In un **algoritmo di instradamento decentralizzato** (***decentralized routing algorithm***), il calcolo del percorso di minor costo è eseguito in modo distribuito e iterativo.

- Non è necessario che i nodi abbiano informazioni complete sul costo di tutti i collegamenti della rete. Inizialmente ogni nodo ha la sola conoscenza del costo dei collegamenti che sono direttamente collegati ad esso.
- Successivamente, scambiando iterativamente informazioni con i nodi a esso vicini, ciascun nodo calcola, a mano a mano, il percorso di minor costo verso una destinazione o un gruppo di destinazioni.
- Una classe di algoritmi di instradamento decentralizzato molto diffusa è **distance vector, DV** (vettore delle distanze).

# Algoritmi statici e dinamici

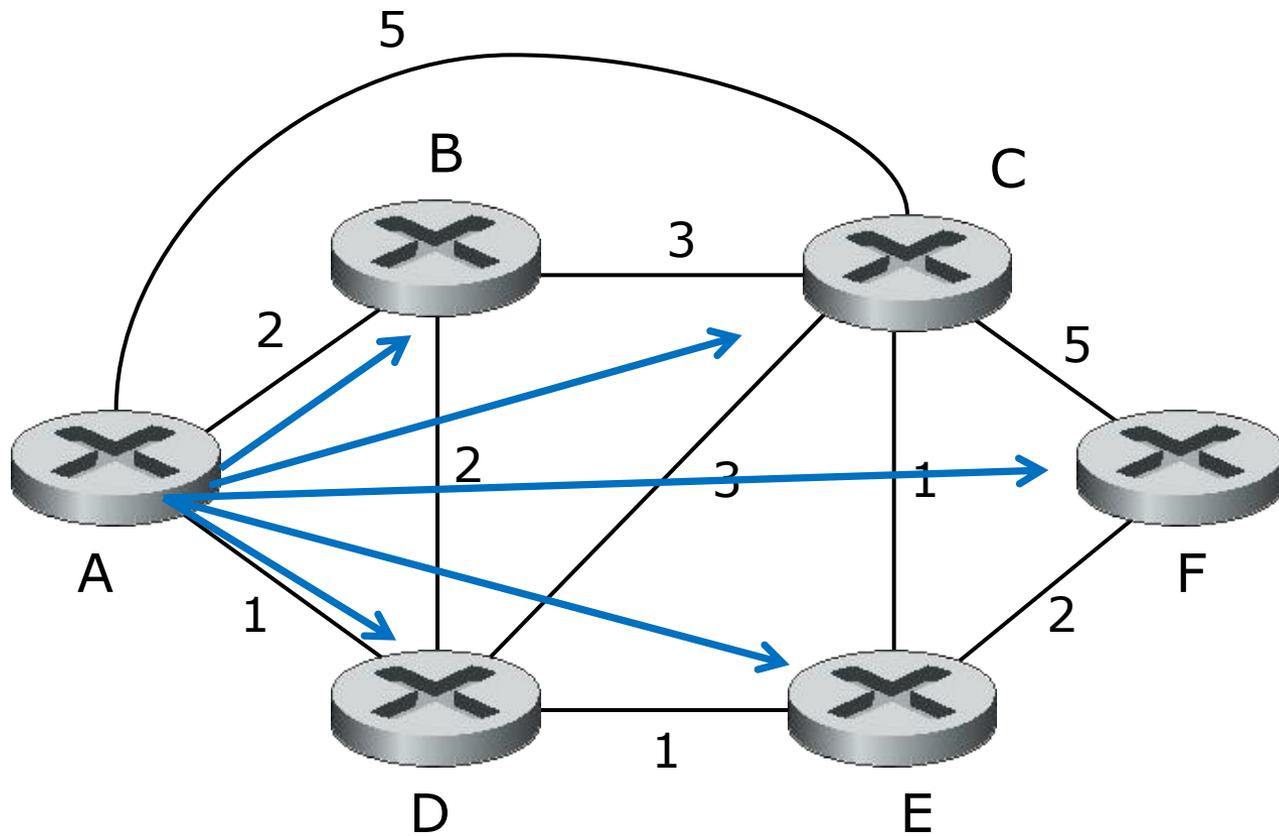
- Un secondo modo per classificare gli algoritmi di instradamento è in base al fatto che siano **statici** o **dinamici**.
- Gli **algoritmi di instradamento statici**, sono usati in reti in cui i percorsi cambiano molto raramente. In questo caso l'amministratore di rete modifica a mano le tabelle di inoltro dei router.
- Gli **algoritmi di instradamento dinamici** modificano i percorsi di instradamento quando varia la topologia della rete o la quantità di congestione del traffico. Gli algoritmi dinamici sono più reattivi alle variazioni nella rete, ma sono anche più suscettibili a problemi come ***routing loop*** (**percorsi ciclici**) e oscillazioni nei percorsi.

# Algoritmi sensibili e insensibili al carico

- Un terzo modo di classificare gli algoritmi di instradamento è in relazione al fatto che siano **sensibili al carico** (*load-sensitive*) o **insensibili al carico** (*load-insensitive*).
- Gli algoritmi sensibili al carico, variano i costi dei collegamenti dinamicamente in base allo stato attuale di congestione dei collegamenti. I primi algoritmi di instradamento di ARPAnet erano sensibili al carico e hanno manifestato molti problemi di funzionamento.
- Gli algoritmi di instradamento di Internet di oggi (come **RIP**, **OSPF** e **BGP**) sono **insensibili al carico**, dato che il costo di un link non dipende dal suo livello di congestione.
- Solo due classi di algoritmi di instradamento *sono* usati in Internet:
  - **algoritmo dinamico basato sullo stato globale dei link** (*dynamic global link state algorithm*) e
  - **algoritmo dinamico decentralizzato vettore delle distanze** (*dynamic decentralized distance vector algorithm*).

# Algoritmo di instradamento basato sullo stato dei link

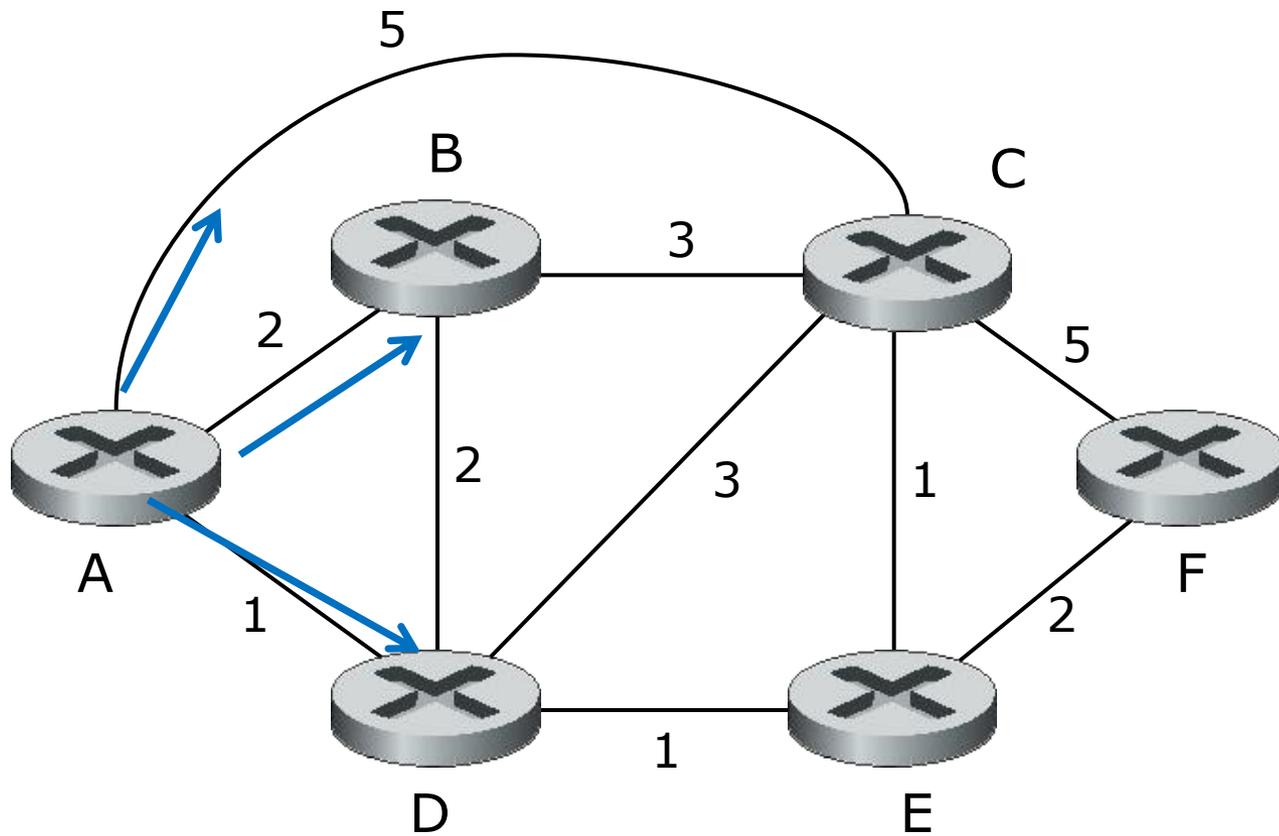
- In un algoritmo basato sullo stato dei collegamenti (*link state algorithm*) la topologia della rete e tutti i costi dei collegamenti sono informazioni note come input dell'algoritmo.
- Per conoscere la topologia completa della rete ciascun router trasmette gli indirizzi IP delle proprie interfacce e i costi dei link a esso collegati a tutti gli altri router della rete. Questa trasmissione dello stato dei link, detta ***link state broadcast***, da parte di ciascun nodo porterà **tutti i nodi a conoscere la completa topologia della rete**. Ciascun nodo può allora eseguire l'algoritmo per calcolare i percorsi di minor costo.
- L'algoritmo dello stato dei link molto usato è l'algoritmo di **Dijkstra**.
- L'algoritmo di Dijkstra calcola il percorso di minor costo da un nodo sorgente a tutti gli altri nodi nella rete.



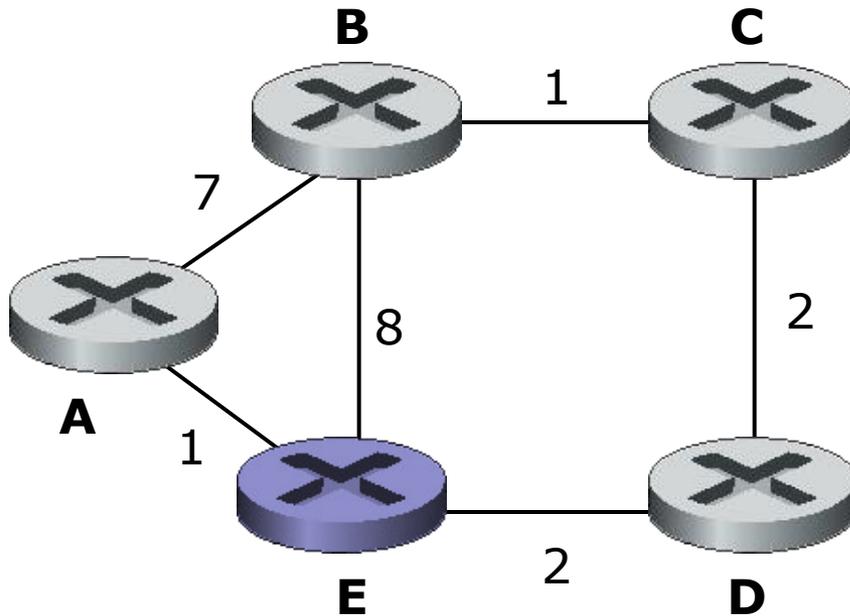
Algoritmo globale.

# Algoritmo di instradamento **Distance Vector**

- Mentre l'algoritmo **LS** è un algoritmo che usa l'informazione globale, l'algoritmo **distance vector (DV, vettore delle distanze)** è distribuito, iterativo e asincrono.
- L'algoritmo è distribuito in quanto ciascun nodo riceve informazioni solo dai "vicini" ai quali è direttamente collegato, esegue un calcolo sulle sue tabelle, e quindi distribuisce i risultati ai suoi vicini. E' asincrono perché tutti i nodi scambiano tra loro le informazioni in modo non sincronizzato. L'algoritmo è iterativo perché questo processo continua finché lo scambio di informazione tra i vicini termina.
- La principale struttura dati dell'algoritmo **DV** è la **tabella delle distanze** mantenuta **in ciascun nodo**. La tabella delle distanze ha una riga per ogni destinazione nella rete e una colonna per ciascuno dei vicini direttamente collegati al nodo.



Algoritmo decentralizzato.



D <sup>E</sup> ( )	vicini		
	A	B	D
A	1	14	5
B	7	8	5
C	6	9	4
D	4	11	2

$$D^X(Y,Z) = c(X,Z) + \min_w \{D^Z(Y,w)\}$$

x: sorgente

Y: destinazione

Z: via (router successivo)

**Esempio:**

$$D^E(A,B) = c(E,B) + \min_w \{D^B(A,w)\}$$

**Esempio tabella delle distanze per il nodo sorgente E**

# Confronto fra gli algoritmi di instradamento dello stato del link e distance vector

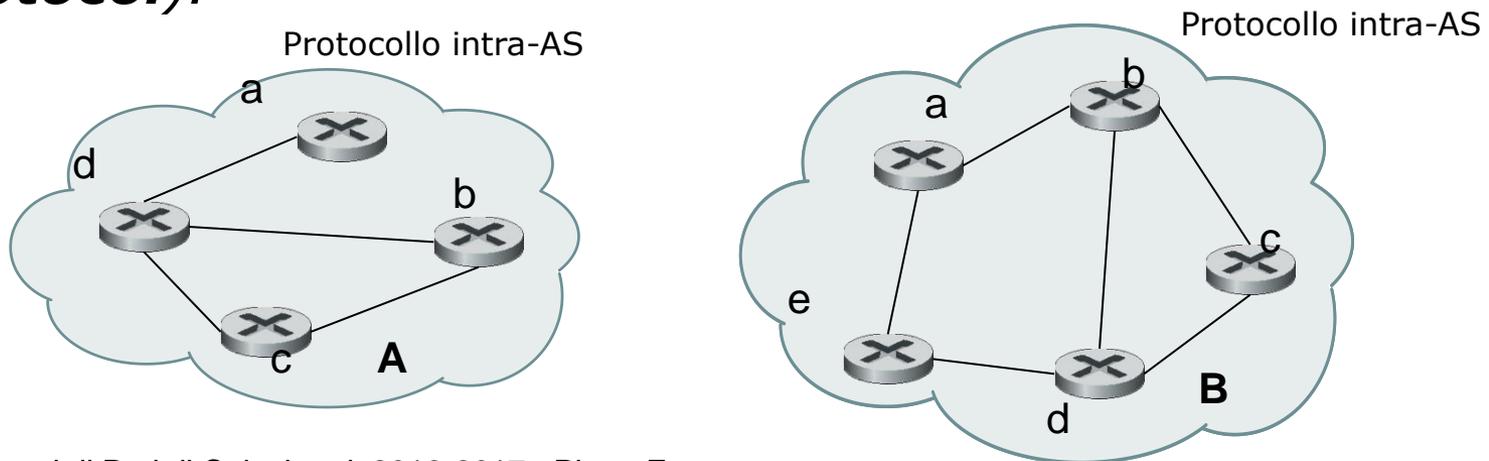
- Concludiamo il discorso sugli algoritmi basati sullo stato dei link e distance vector con un rapido confronto di alcune loro caratteristiche.
- **Complessità del messaggio.**
  - L'algoritmo **LS** richiede che ciascun nodo conosca il costo di ciascun link della rete. Questo richiede la spedizione di  **$O(N \cdot L)$**  messaggi, dove **N** è il numero di nodi nella rete ed **L** è il numero di link. Inoltre, ogni volta che il costo di un link cambia, il nuovo costo del link deve essere comunicato a *tutti* i nodi.
  - L'algoritmo DV richiede per ciascuna iterazione lo scambio dei messaggi fra vicini direttamente collegati. Il tempo richiesto dall'algoritmo per convergere può dipendere da diversi fattori. Quando cambiano i costi dei link, l'algoritmo DV propagherà i risultati della variazione del costo del link interessato *solo* se il nuovo costo del link produrrà una variazione del percorso di minor costo per uno dei nodi collegati a quel link.

- **Velocità di convergenza.**
  - **LS** è un algoritmo  $O(N^2)$  che richiede  $O(N \cdot L)$  messaggi.
  - L'algoritmo **DV** può convergere lentamente e può avere percorsi ciclici durante la convergenza.
- **Robustezza.** Cosa può succedere se un router si guasta?
  - Con LS, un router può trasmettere in broadcast un costo errato per uno dei suoi collegamenti oppure ricevere un pacchetto con qualche errore. Tuttavia, ciascun router LS calcola solo la propria tabella di instradamento. Questo significa che i calcoli dei percorsi in LS sono separati, e questo fornisce un certo grado di robustezza.
  - Con DV, un router può comunicare percorsi di minor costo errati a qualsiasi o tutte le destinazioni. Infatti, ad ogni iterazione, il calcolo della tabella in un nodo è trasmesso ai suoi vicini e quindi, indirettamente, ai vicini dei suoi vicini all'iterazione successiva. Per questo motivo, con DV un calcolo sbagliato di un nodo può essere diffuso attraverso l'intera rete.
- Molti altri algoritmi sono stati proposti, oltre a LS e DV i quali però sono gli unici utilizzati in pratica in Internet.

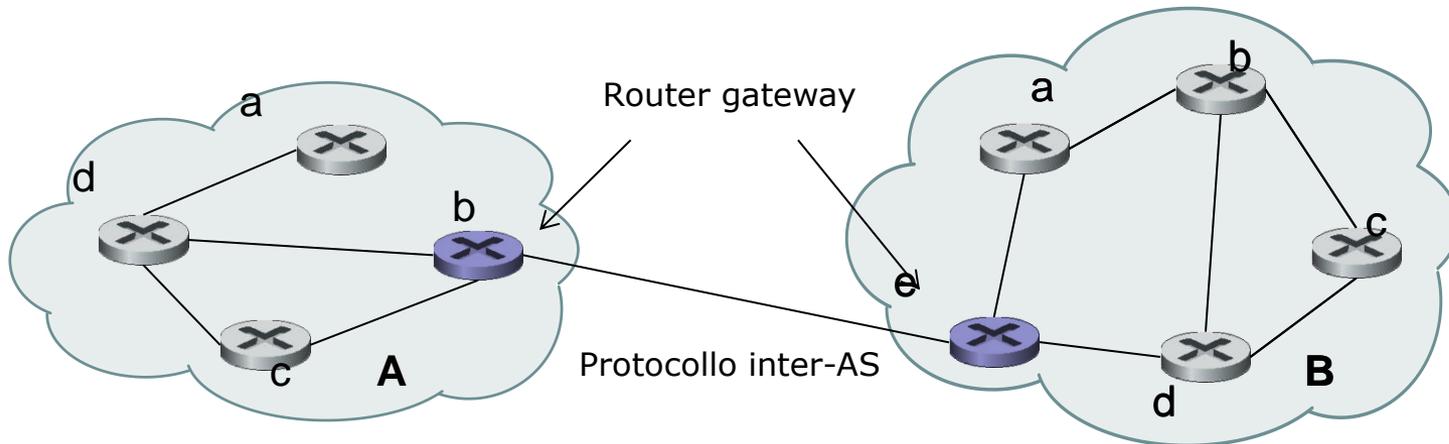
# Instradamento gerarchico

- Parlando degli algoritmi LS e DV, abbiamo considerato la rete come un insieme di router interconnessi che eseguono lo stesso algoritmo di instradamento. Internet oggi è costituita da miliardi di host e pertanto, in pratica, questo modello basato su router che sono tutti dello stesso tipo e che eseguono tutti lo stesso algoritmo, è impossibile da realizzare per almeno due problemi: scalabilità e gestione tecnico-amministrativa.
- **Scalabilità.** Con un enorme numero dei router, il tempo di esecuzione dei calcoli sarebbe elevatissima, la memorizzazione e la comunicazione delle informazioni delle tabelle di instradamento diventa impossibile. La memorizzazione delle tabelle di instradamento richiederebbe un'enorme quantità di memoria. Un algoritmo DV che itera un così grande numero di router certamente non convergerebbe mai.

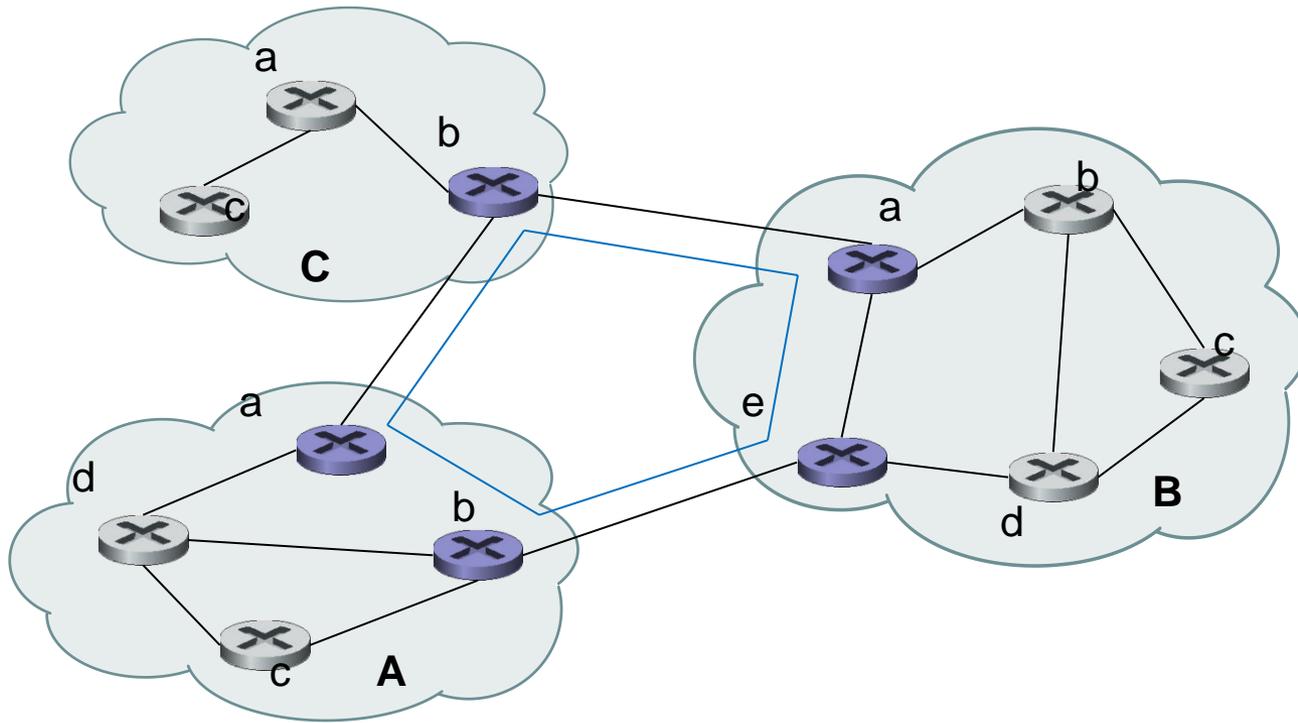
- **Autonomia amministrativa.** Internet è una "rete di reti" e pertanto, ogni organizzazione, in pratica, gestisce e amministra la sua rete in modo autonomo, ma nello stesso tempo deve anche collegare la sua rete ad altre reti "esterne".
- Entrambi questi problemi si risolvono aggregando i router in **sistemi autonomi (AS, Autonomous Systems)** che sono costituiti quindi da un insieme di reti e un insieme di router che sono sotto lo stessa gestione tecnica e amministrativa. Tutti i router all'interno dello stesso AS useranno lo stesso algoritmo di instradamento, per esempio, un algoritmo LS o DV.
- Il protocollo di instradamento che funziona all'interno di un sistema autonomo è detto protocollo di instradamento **intra-sistema autonomo (intra-autonomous system routing protocol)**.



- Ovviamente, è necessario collegare gli AS tra loro, e quindi uno o più dei router in un AS dovrà avere il compito di instradare i pacchetti verso destinazioni esterne all'AS: questi router sono detti **router gateway**.
- Il protocollo di instradamento che i gateway usano per l'indirizzamento fra i diversi AS prende il nome di protocollo di instradamento **inter-sistema autonomo** (*inter-autonomous system routing protocol*).

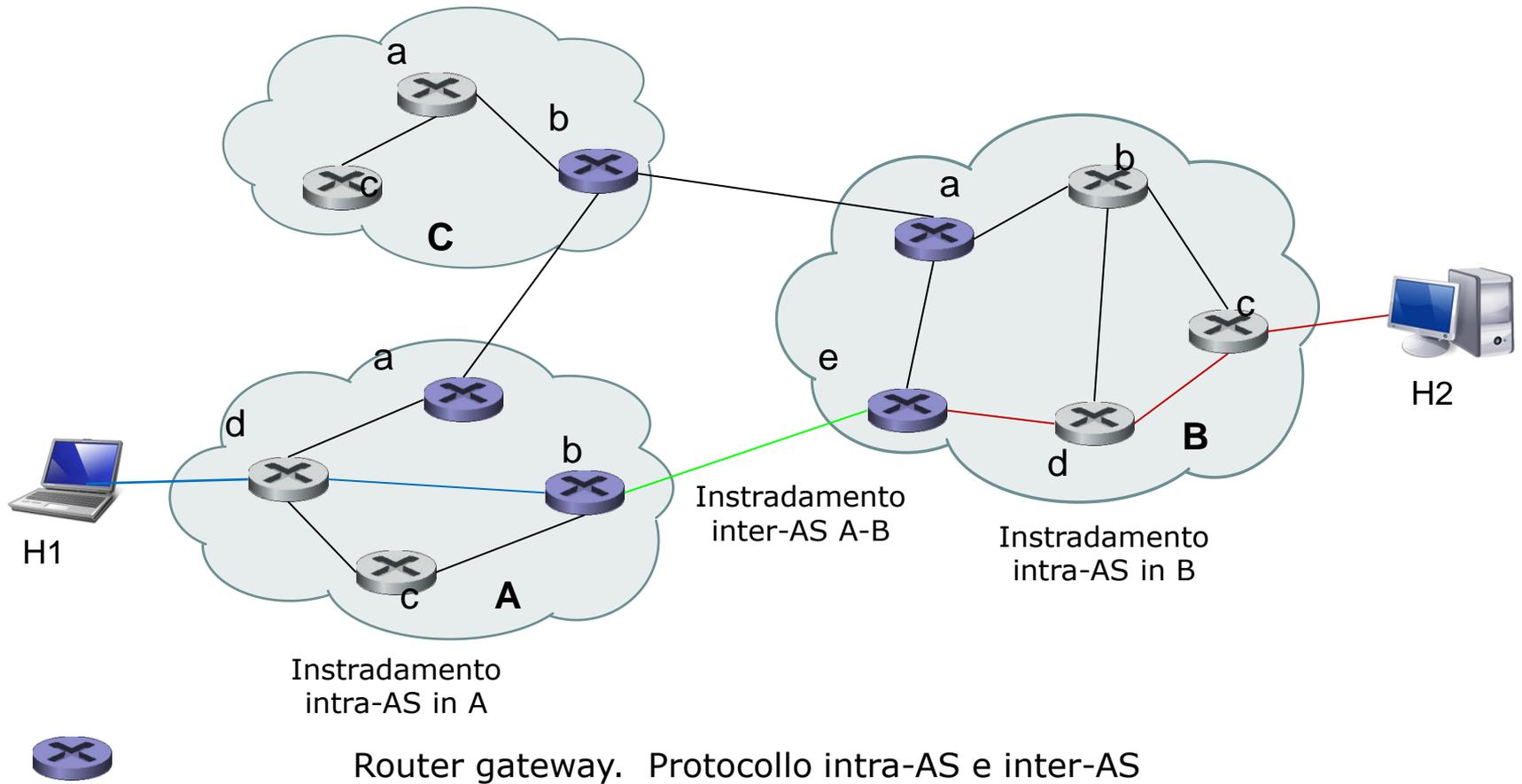


- Nella figura seguente ci sono tre AS, **A**, **B** e **C**. Il sistema autonomo **A** possiede quattro router, **A.a**, **A.b**, **A.c** e **A.d**, in cui funziona il protocollo di instradamento intra-AS adottato all'interno del sistema autonomo A. Questi quattro router hanno informazioni complete sui percorsi di instradamento all'interno del sistema autonomo A. In modo analogo, i sistemi autonomi B e C hanno cinque e tre router, rispettivamente.
- **I protocolli di instradamento intra-AS che funzionano all'interno di A, B e C non necessariamente sono gli stessi.**
- I router gateway sono A.a, A.b, B.a, B.e e C.b. Oltre a far funzionare i protocolli di instradamento intra-AS insieme agli altri router dei loro AS, questi router gateway fanno funzionare tra loro un protocollo di instradamento inter-AS.
- La topologia che essi usano per i loro instradamenti inter-AS è costituita da **"link" che potrebbero essere link fisici reali, come ad esempio il link che collega A.b e B.e, o da link logici, come nel caso del link tra A.a e A.b.**



Router gateway. Protocollo intra-AS e inter-AS

- La figura mostra anche che nel router gateway **A.b** deve funzionare sia un protocollo di instradamento intra-AS con i suoi vicini **A.c** e **A.d**, sia un protocollo inter-AS con il router gateway **B.e**. Notate che le voci nella tabella di inoltro del router **A.b** sono derivate da entrambi i protocolli intra-AS e inter-AS.
- Supponiamo che un host **H1** collegato al router **A.d** invii un pacchetto alla destinazione **H2** nel sistema autonomo **B**, come mostrato nella figura seguente. Assumendo che la tabella di inoltro di **A.d** indichi che il router **A.b** è responsabile per l'instradamento di questo pacchetto all'esterno dell'AS, il pacchetto è prima instradato da **A.d** ad **A.b** usando il protocollo intra-AS di **A**.
- È importante notare che **il router A.d non conosce la struttura interna dei sistemi autonomi B e C**. Il router **A.b** riceverà il pacchetto e vedrà che è destinato a un sistema autonomo esterno ad A. La tabella di inoltro di **A.b** per il protocollo inter-AS indicherà che un pacchetto destinato al sistema autonomo B dovrà essere instradato lungo il link da **A.b** a **B.e**. Quando il pacchetto arriva a **B.e**, l'instradamento inter-AS di **B.e** vede che il pacchetto è destinato al sistema autonomo **B**. In pratica, ciò si verifica perché il protocollo intra-AS all'interno dell'AS **B** ha creato le voci nella tabella di inoltro di **B.e** per indicare il router del prossimo inoltro lungo il percorso verso H2.



# Instradamento in Internet

- I protocolli di instradamento (*routing*) determinano il percorso che un datagram seguirà dalla sorgente alla destinazione.
- I protocolli di instradamento di Internet utilizzano protocolli di tipo **stato dei link** e **vettore delle distanze** e si basano sul concetto di **sistema autonomo (AS)**. Ricordiamo che un **sistema autonomo (AS)** è costituito da un insieme di reti che sono sotto lo stesso controllo tecnico e amministrativo, i quali utilizzano lo stesso protocollo di instradamento.
- I protocolli di instradamento si distinguono in due classi:
  - **protocolli intra-sistema**, usati per instradare i datagram **all'interno** di un singolo AS;
  - **protocolli inter-sistema**, usati per instradare i datagram tra **AS multipli**.

# Instradamento intra-sistema autonomo in Internet: RIP e OSPF

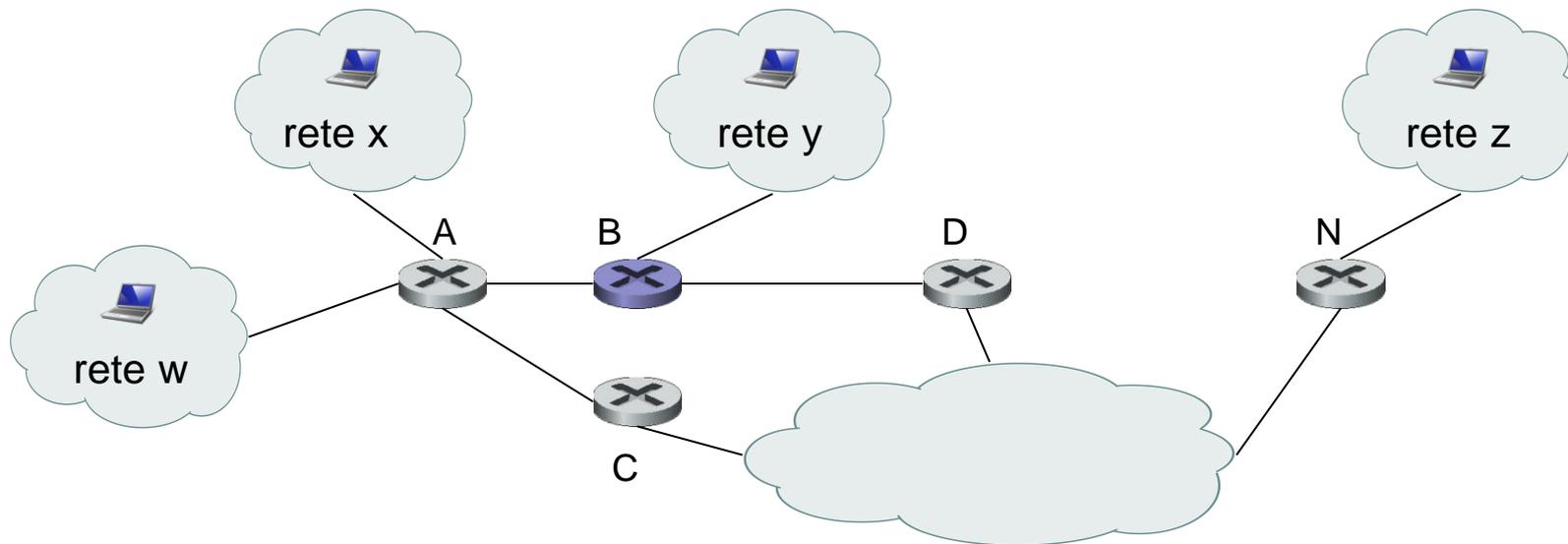
- Un protocollo di instradamento **intra-AS** è usato per configurare e mantenere le tabelle di instradamento all'interno di un sistema autonomo.
- Due protocolli molto usati per l'instradamento all'interno di un sistema autonomo sono il **RIP (*Routing Information Protocol*)** e l'**OSPF (*Open Shortest Path First*)**.

## RIP

- Il RIP è stato uno dei primi protocolli di Internet per l'instradamento intra-AS ed è ancora oggi molto usato.
- La grande diffusione del RIP fu dovuta alla sua inclusione, nel 1982, nella versione UNIX BSD (Berkeley Software Distribution).
- Il RIP è un protocollo di tipo **distance vector**. Ogni link ha **costo 1** e quindi il costo del percorso equivale al numero di hop.

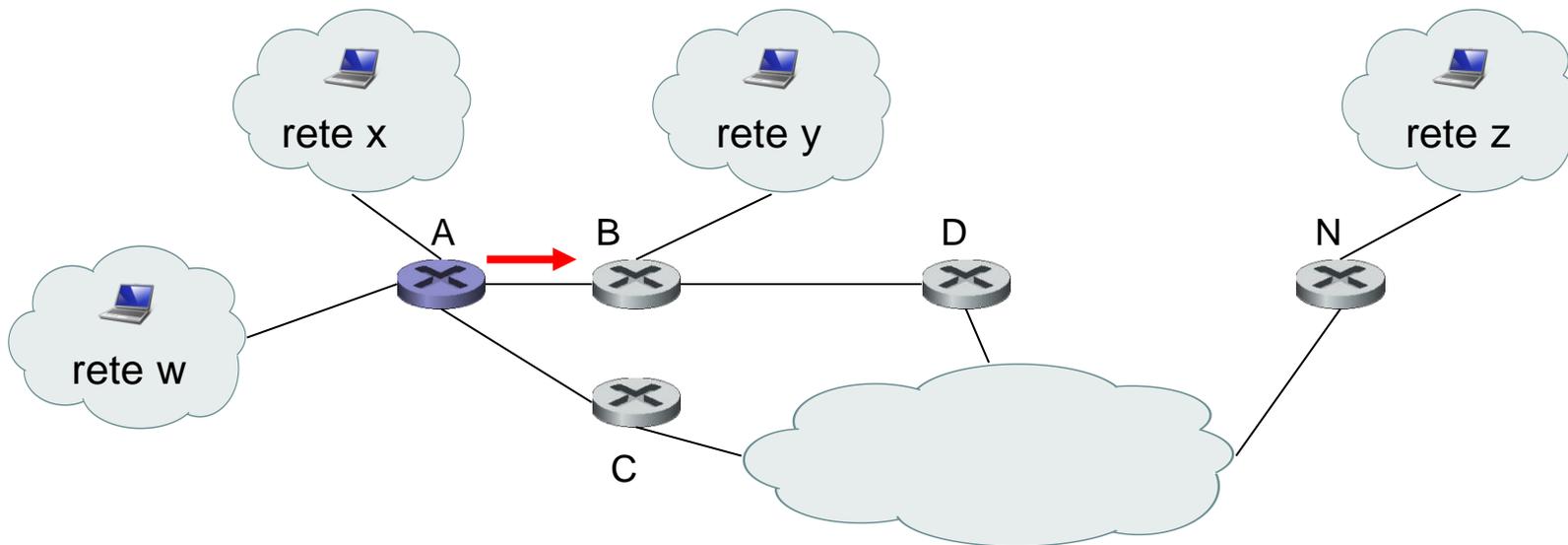
- Il massimo costo di un percorso è limitato a 15, limitando così l'uso del RIP ai sistemi autonomi che hanno un **diametro** (*massima distanza tra due coppie di nodi*) inferiore a **15 hop**.
- Ricordiamo che nei protocolli distance vector, i router vicini si scambiano informazioni tra loro.
- Col RIP, i vicini si scambiano messaggi contenenti le tabelle di instradamento ogni 30 secondi circa. Questi messaggi sono detti **annunci rip (RIP advertisement)** oppure **messaggi di risposta RIP (RIP response message)**.
- Un annuncio RIP contiene la tabella di instradamento del mittente per un **massimo di 25 reti di destinazione** entro l'AS.
- Per inviare i messaggi, il RIP utilizza **UDP** e la porta **520**.
- I router RIP si scambiano avvisi ogni 30 secondi. Se un router non riceve alcun avviso da un suo vicino entro un intervallo di **180 secondi**, quel vicino è considerato non più raggiungibile. In tal caso, il RIP modifica la sua tabella di instradamento e la invia ai router suoi vicini. Per indicare che un vicino è irraggiungibile pone il corrispondente valore di hop pari a **16**.

- Un router può anche richiedere informazioni ai suoi vicini sul costo verso una data destinazione usando il ***messaggio di richiesta RIP***.
- Vediamo un esempio di funzionamento del RIP. Consideriamo alcune reti di un AS e supponiamo che la tabella di instradamento per il router B sia come in figura.
- La tabella di instradamento ha tre colonne. La prima colonna indica la **rete di destinazione**, la seconda specifica il **router successivo** a cui rinviare i pacchetti per giungere alla rete di destinazione, la terza colonna indica il **numero di hop**, cioè il numero di subnet che devono essere attraversate per raggiungere la rete di destinazione seguendo il percorso più breve.
- La tabella indica che per spedire un datagram dal router **B** alla rete di destinazione **w**, il datagram deve essere prima inviato al vicino router **A**; la tabella indica anche che la rete di destinazione **w** è lontana **2 hop** lungo il percorso più breve. In modo analogo, la tabella indica che la rete **z** è distante **7 hop** passando dal router **D**.



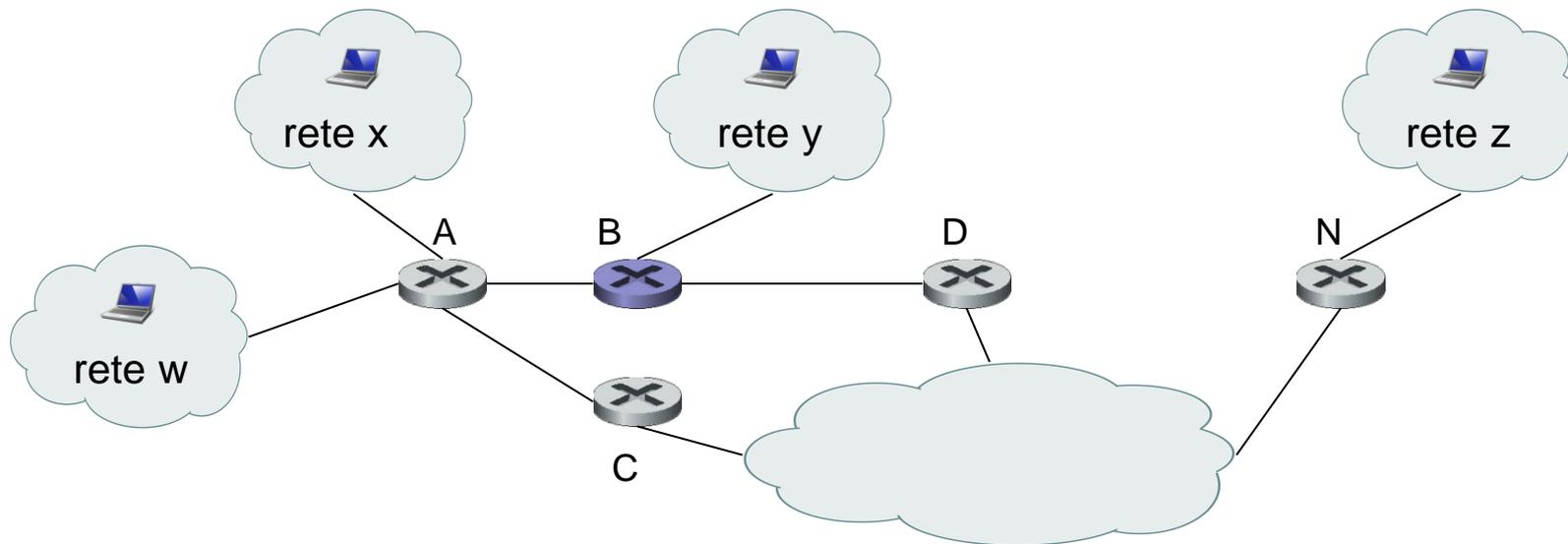
Rete di destinazione	Router successivo	Numero di hop
x	A	2
y	-	1
w	A	2
z	D	7

**Tabella di instradamento nel router B prima di ricevere avvisi dal router A**



Rete di destinazione	Router successivo	Numero di hop
x	-	1
y	B	2
w	-	1
z	C	4

**Avviso inviato dal router A al router B**



Rete di destinazione	Router successivo	Numero di hop
x	A	2
y	-	1
w	A	2
<b>z</b>	<b>A</b>	<b>5</b>

$$5 = 4 + 1$$

**Tabella di instradamento nel router B dopo la ricezione dell'avviso dal router A**

Una tabella di instradamento avrà una riga per ciascuna rete dell'AS e almeno **una riga** per l'instradamento a **reti che sono esterne all'AS**. Le tabelle nelle figure, sono quindi incomplete.

- Ora supponiamo che 30 secondi dopo, il router B riceva da A l'avviso presente nella figura successiva. Questo avviso contiene la tabella di instradamento nel router A. Questa tabella di inoltre dice, in particolare, che la rete **z** è lontana solo **4 hop** dal router **A**. Il router B, dopo aver ricevuto questo avviso, modifica la sua tabella di instradamento dato che passando per il router A arriva alla rete z con un percorso più breve del percorso che passa per il router D.
- L'aggiornamento del percorso più corto verso la rete z è dovuto al fatto che il RIP era o in fase di convergenza, o che nuovi link e/o router sono stati aggiunti all'AS.