Facoltà di Ingegneria - Università di Bologna

Anno Accademico: 2010/11

TECNICA ED ECONOMIA DEI TRASPORTI

Docente: Marino Lupi

SISTEMI DI TRASPORTO E LORO SCHEMATIZZAZIONE

(Capitolo 1)

Definizione di sistema di trasporto

Un sistema di trasporto è un *insieme di componenti*, e di loro interazioni, che determinano la *domanda* di spostamenti fra punti diversi del *territorio* e determinano *l'offerta* di servizi di trasporto per il soddisfacimento di tale domanda.

- Sottosistema della *domanda*: utenti (viaggiatori o merci), insieme di spostamenti nell'area.

- Sottosistema della *offerta*: componenti *fisiche*, componenti *organizzative*, componenti *normative.*

Esempio: Sistema di trasporto *individuale* in una area *urbana*

Sottosistema della *domanda*: Spostamenti di persone, che in un determinato intervallo temporale, avvengono fra zone origine e zone destinazione della area urbana.

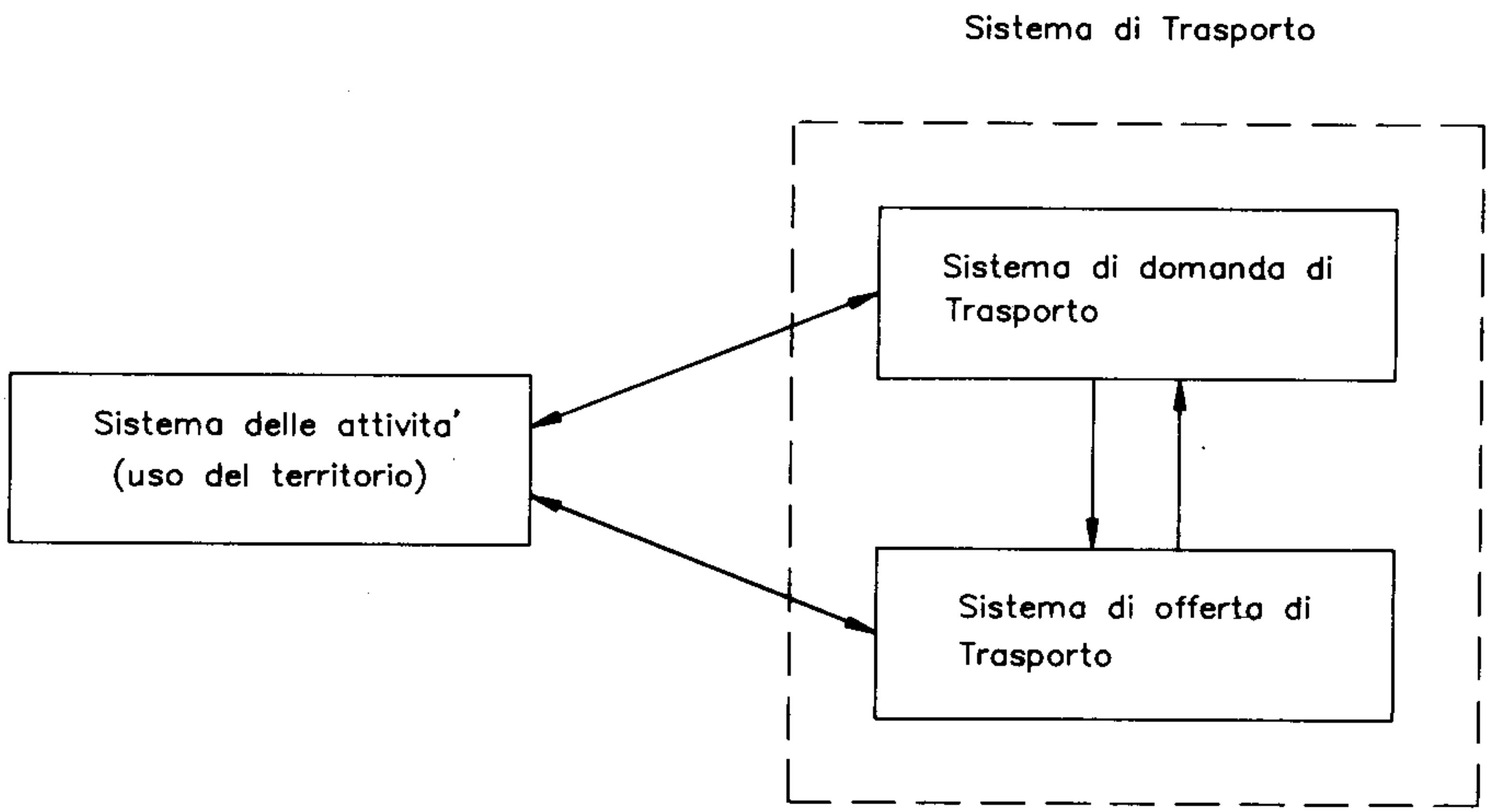
Sottosistema della *offerta:*

- Componenti *fisiche*: insieme delle strade, veicoli, apparecchiature per il controllo semaforico.

- Componenti *organizzative*: cicli semaforici, tempi di verde, di rosso di giallo per le correnti veicolari; strade che hanno la precedenza, strade che devono dare la precedenza.

- Componenti *normative*: aree a traffico limitato; aree a “road pricing” .

Interazione: sistema di *trasporto* – sistema *socioeconomico* del territorio



Interazione: sistema di *trasporto* – sistema *socioeconomico* del territorio

La domanda di trasporto è una domanda *derivata*: uno spostamento *non produce "utilità" in sé*, ma viene compiuto per svolgere un'*attività alla destinazione* del viaggio.

- *In passato*: si considerava principalmente l'influenza del sistema *socioeconomico sulla domanda di trasporto.*

Attualmente si dà molta importanza *anche alla relazione inversa*.

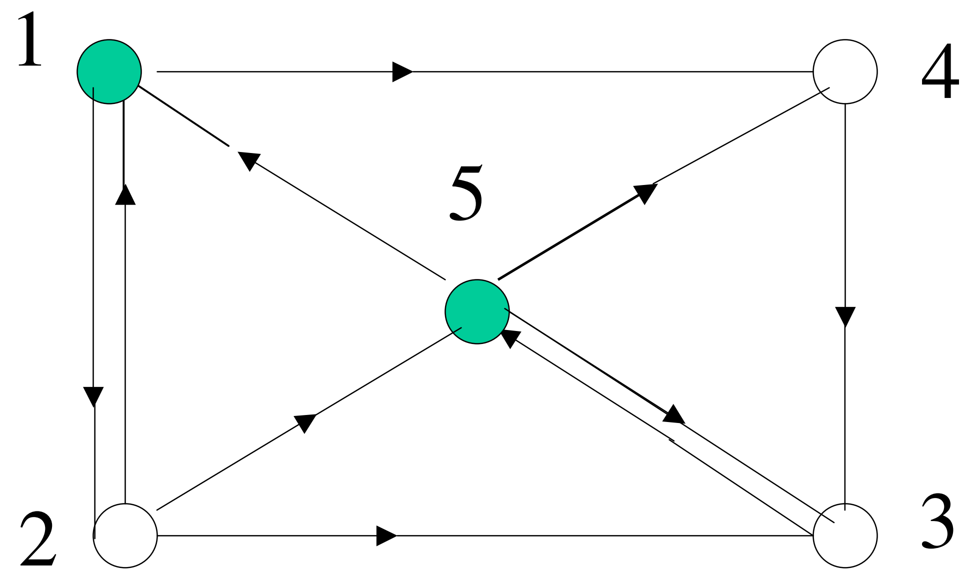
Un piano dei trasporti comprende:

- studio *dell'impatto ambientale* sul territorio;
- analisi dei *vantaggi*, in termini *economici e sociali*, conseguenti al miglioramento del sistema di trasporto.

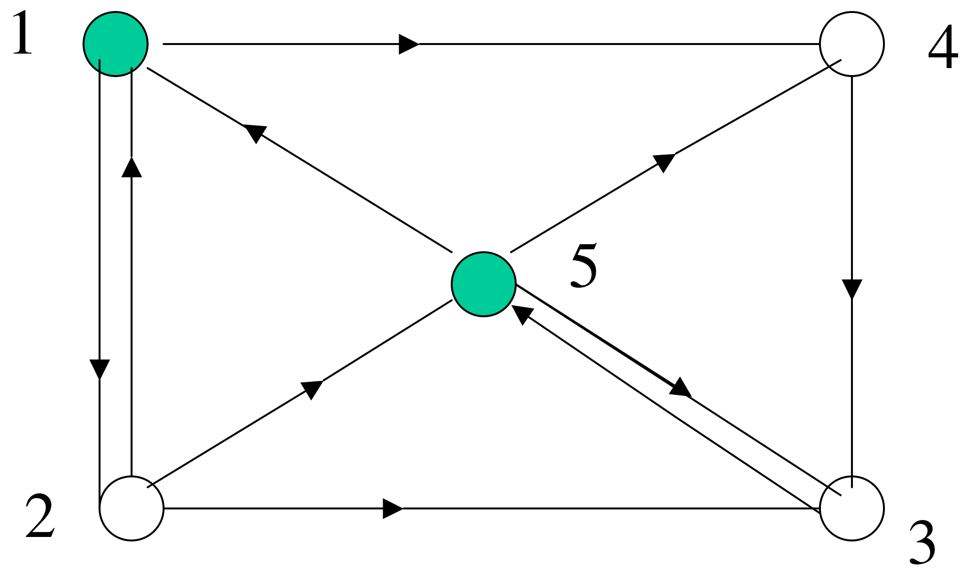
Modellizzazione dell'offerta di trasporto: Grafi

Sia dato un insieme N di elementi i che chiamiamo *nodi* ed un insieme L di *coppie* (i, j) con $i \in N$ e $j \in N$ che chiamiamo archi.
L'*insieme* G costituito dall'unione di L e di N :
$G = (N, L)$ costituisce un grafo.

Rappresentazione grafica (è la più intuitiva)



Rappresentazione di un grafo tramite due vettori



FSTAR

1	2	
	4	← 2
2	1	
	3	
	5	← 5
3	5	← 6
4	3	← 7
5	1	
	3	
	4	← 10

OSTAR

1	2
2	5
3	6
4	7
5	10

FSTAR **: nodi estremità delle varie stelle**

OSTAR **: posto occupato in *FSTAR* dagli ultimi nodi dei successivi blocchi**

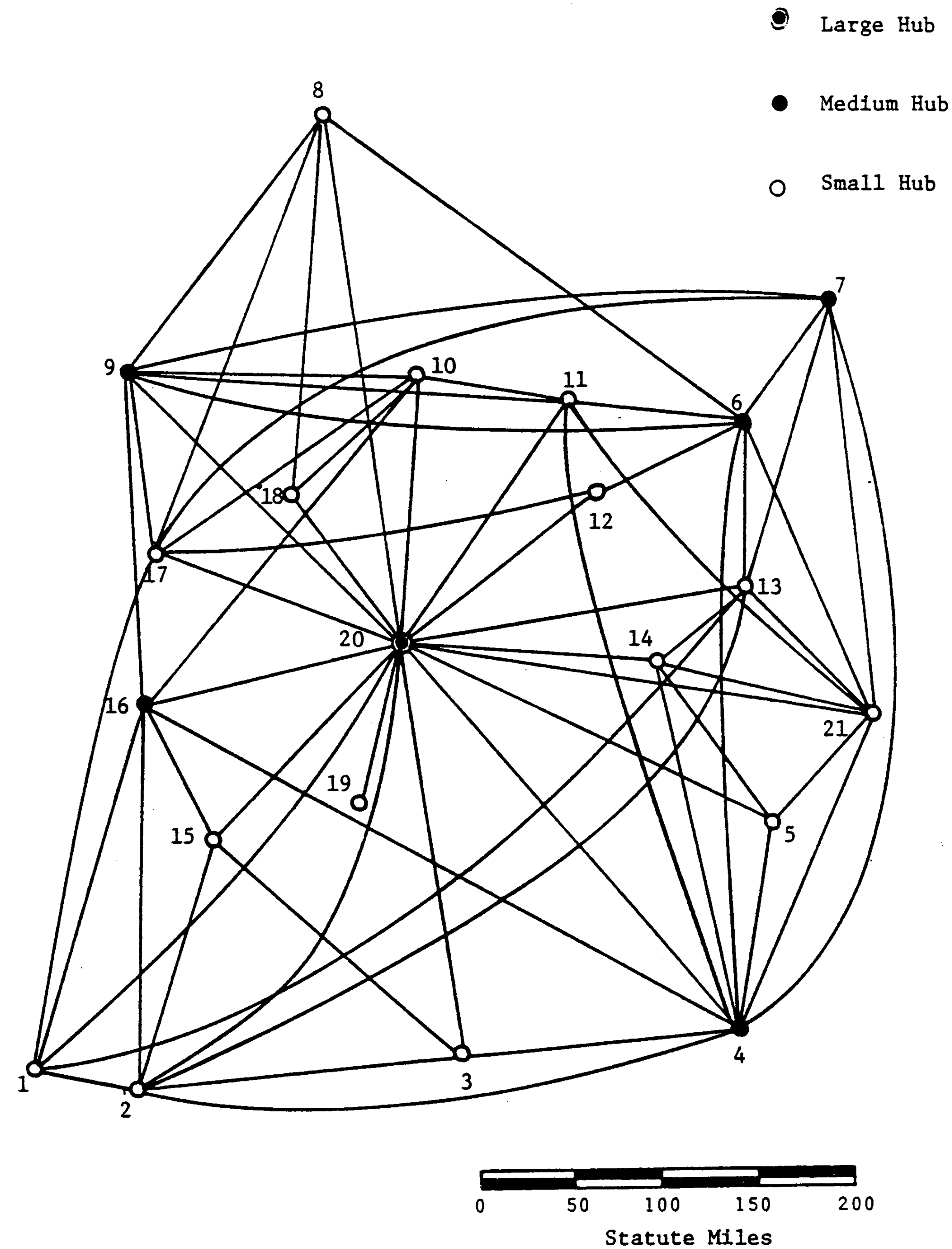
Grafo utilizzato per rappresentare un sistema di trasporto

Cosa rappresentano i nodi del grafo? Individuano le posizioni significative nello spazio e nel tempo assunte dagli utenti del sistema di trasporto.

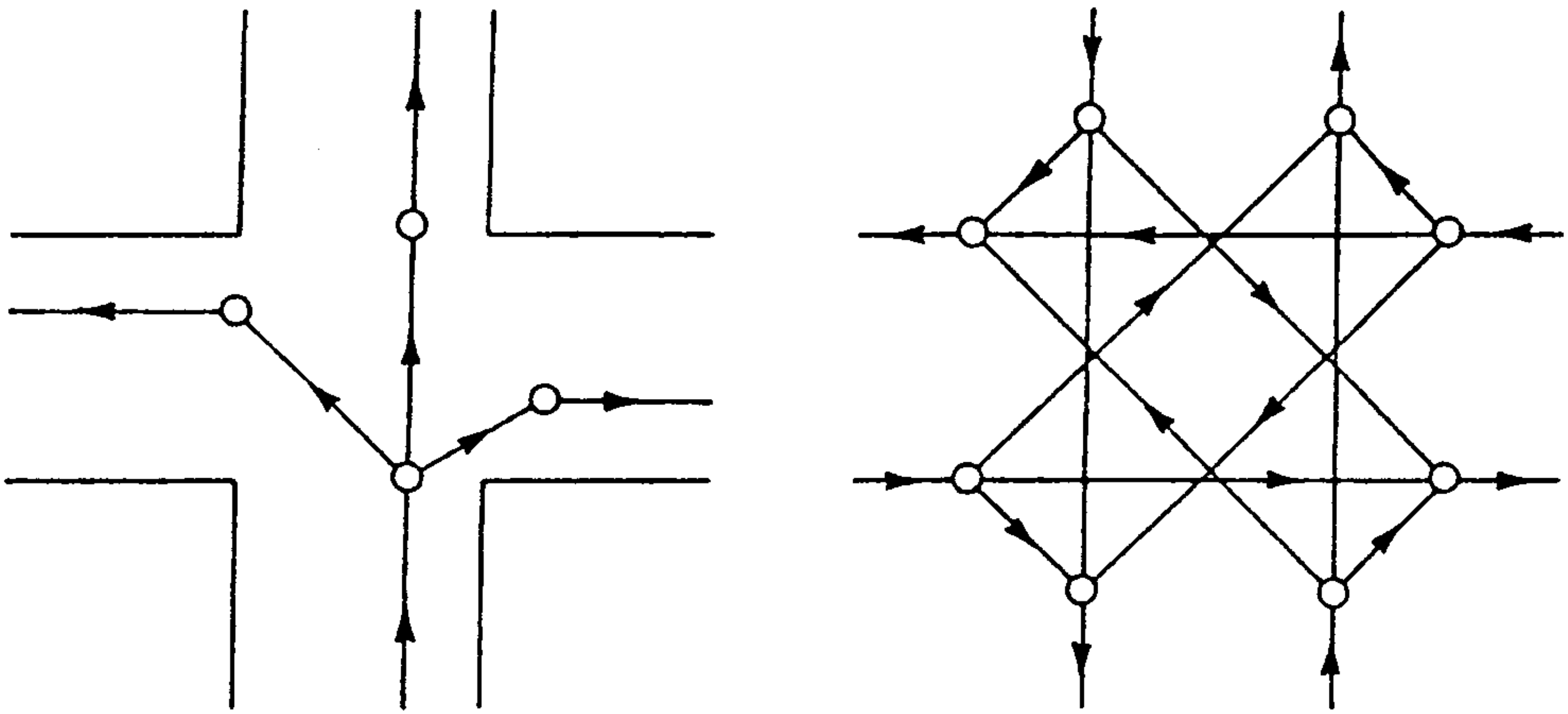
Cosa rappresentano gli archi del grafo? Rappresentano realtà fisiche diverse per esempio: una infrastruttura, il servizio di trasporto offerto fra due punti del territorio, la possibilità di eseguire una manovra.

Arco come infrastruttura, esempio: linea ferroviaria fra due stazioni (nodi)

Arco rappresentante un servizio di trasporto, esempio: servizio di trasporto aereo fra due aeroporti (nodi).



Arco rappresentante una manovra (tempo di trasferimento), esempio: attraversamento, svolta a destra, svolta a sinistra ad una intersezione semaforizzata.

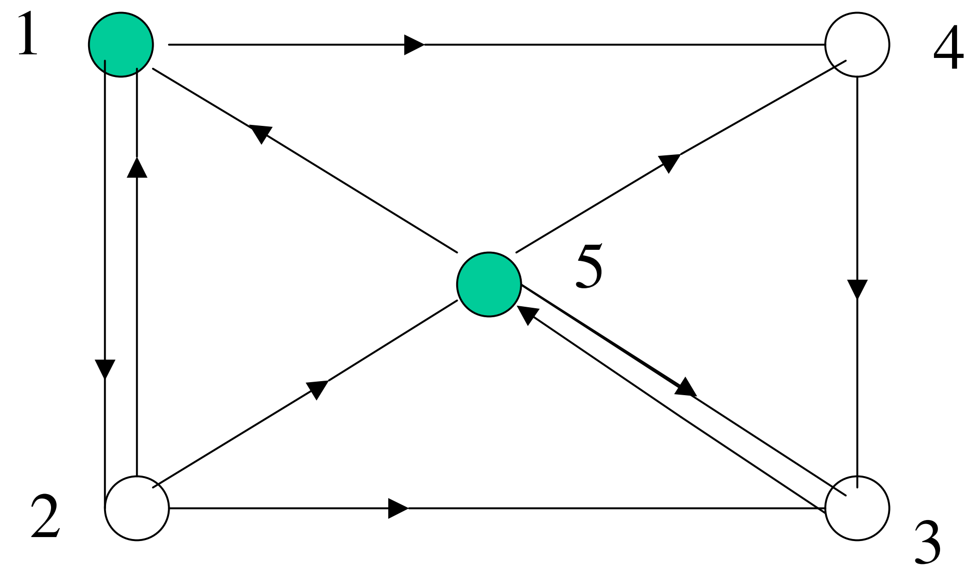


Elementi di Teoria dei grafi utili per le reti di trasporto

Itinerario (o *cammino* o *percorso*): *sequenza di archi* nella quale il nodo *finale* di ciascun arco coincide con il nodo *iniziale* del successivo arco della sequenza.

1-4, 4-3, 3-5

1-2, 2-3, 3-5

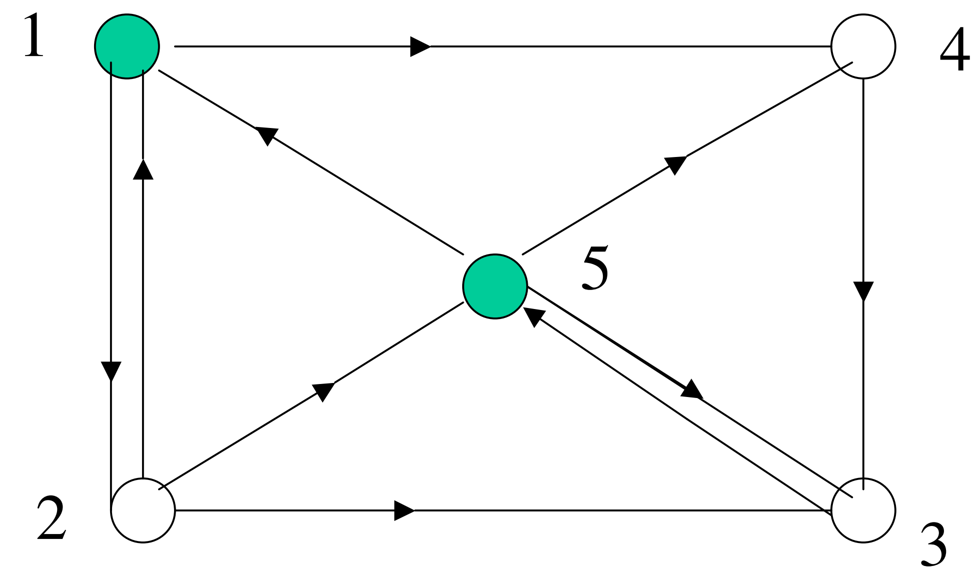


Un itinerario connette due nodi s e t: in cui s è il nodo iniziale del primo arco della sequenza e t è il nodo finale dell'ultimo arco della sequenza

Circuito (o *loop*): *itinerario* nel quale il nodo *iniziale* dell'itinerario *coincide* con il nodo finale dell'*itinerario.*

1-4, 4-3, 3-5, 5-1

1-2, 2-3, 3-5, 5-1



Itinerario *privo di circuiti*: nessuna *parte* di esso costituisce un *circuito,* ossia in esso un nodo non compare *più di una volta* come nodo iniziale o finale di un arco. Esempi di itinerari con circuiti: 1-*4*, 4-3, 3-5,5-*4*, *oppure* 2-*5*, 5-1, 1-2,2-3.

Reti di trasporto: si considerano sempre *itinerari privi di circuiti.*

Altre definizioni sui grafi

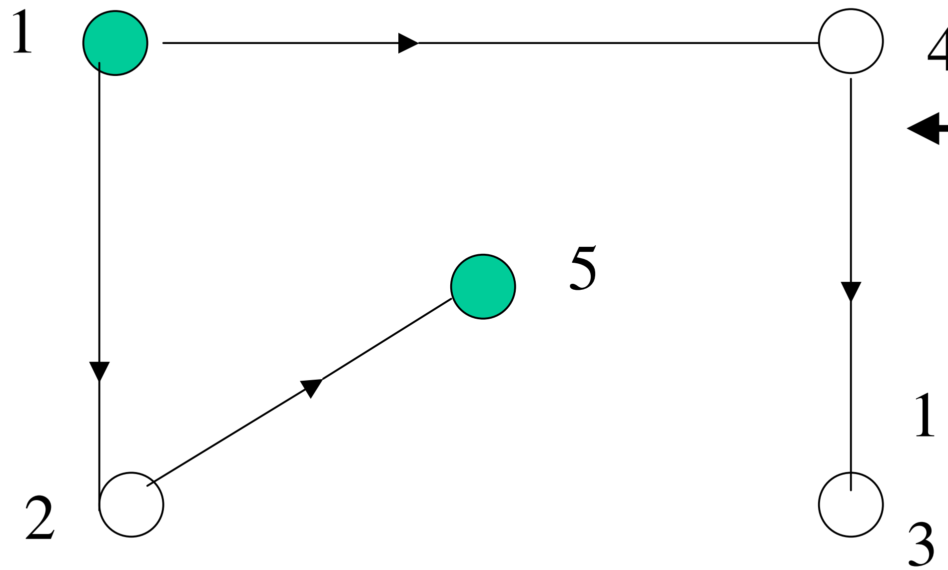
Grafo *completo* (o *completamente connesso*): un grafo in cui *ciascun nodo* è collegato mediante *un arco* a *ciascun altro nodo* del grafo.

I grafi che rappresentano sistemi di trasporto (sottosistema della offerta) *non sono generalmente* completamente connessi.

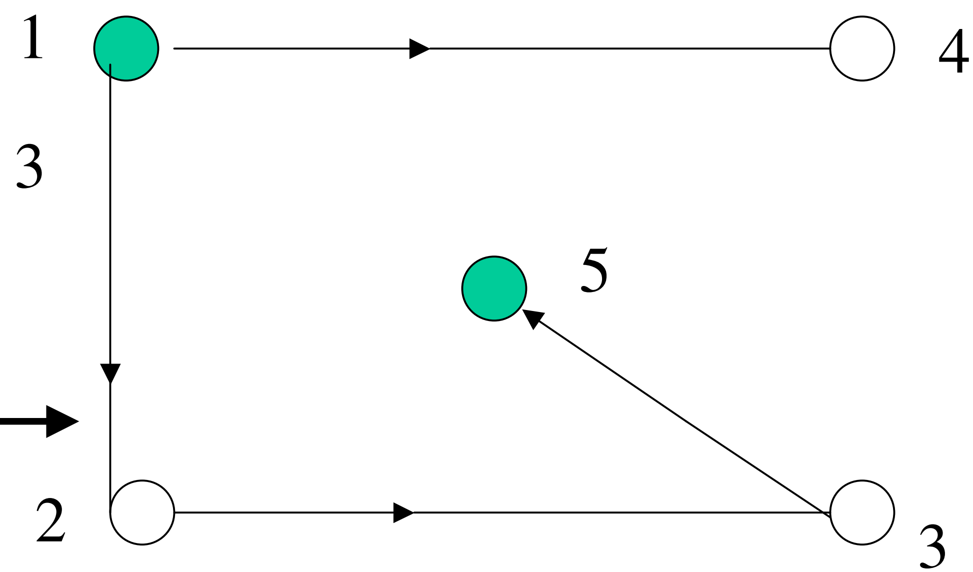
Grafo *connesso*: *ciascun nodo* è origine di almeno *un itinerario* che ha come *nodo finale* un qualsiasi altro nodo del grafo.

I grafi che rappresentano sistemi di trasporto *sono generalmente* connessi.

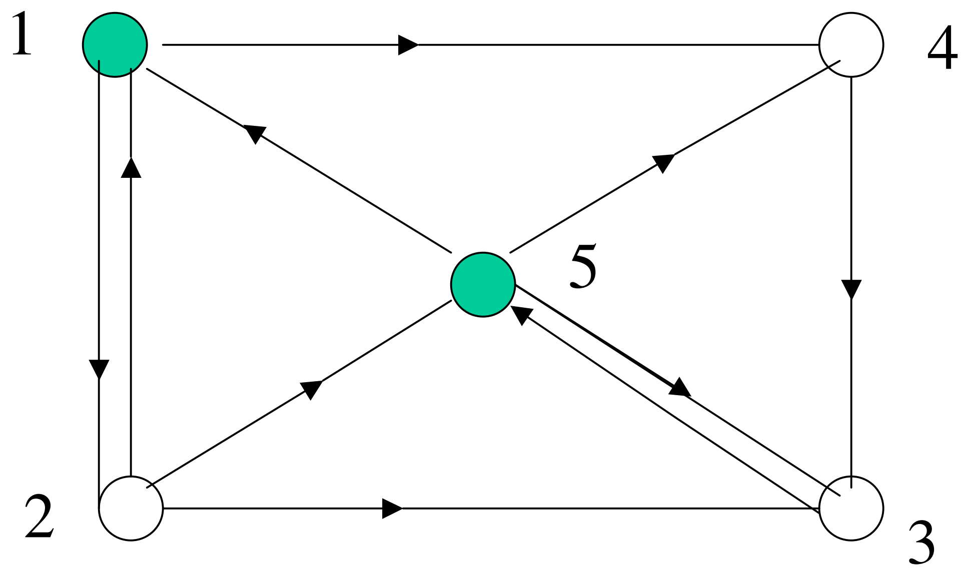
Si dice *albero,* di radice nel nodo s, un *grafo*, *privo* di *circuiti*, per il quale esiste un *solo itinerario* che collega il nodo radice s con *ciascun* altro nodo del grafo.



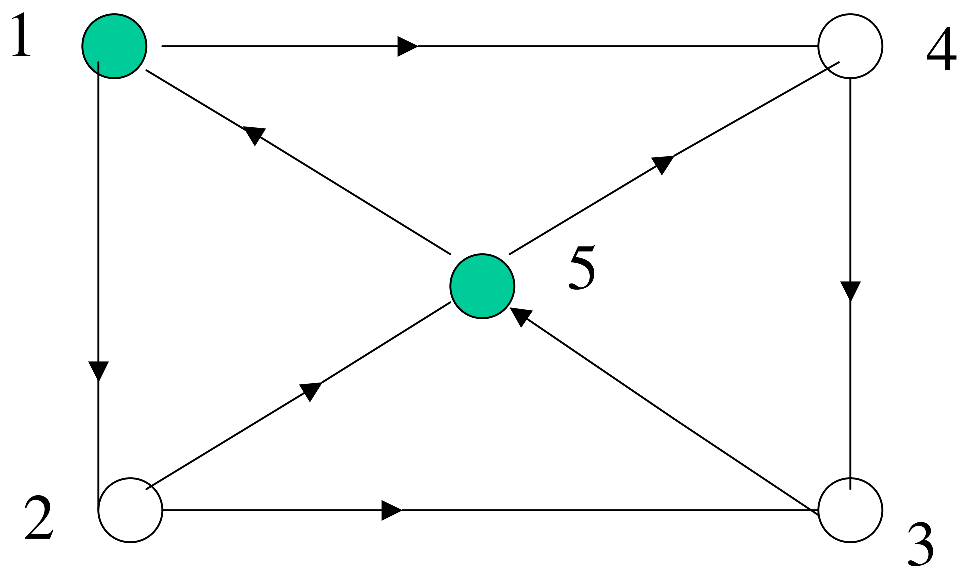
Esempio: *albero* di radice 1

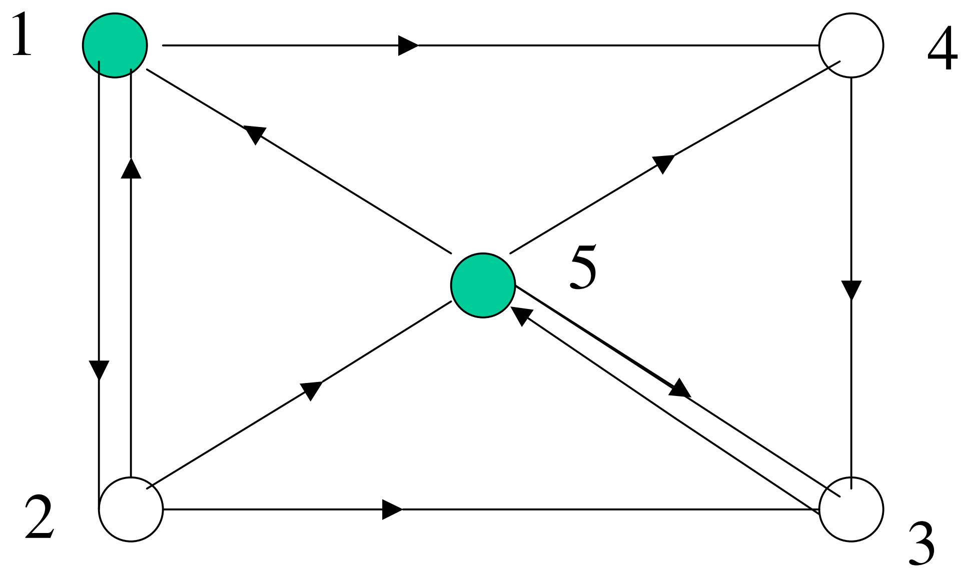


Esempio: un altro *albero* di radice 1

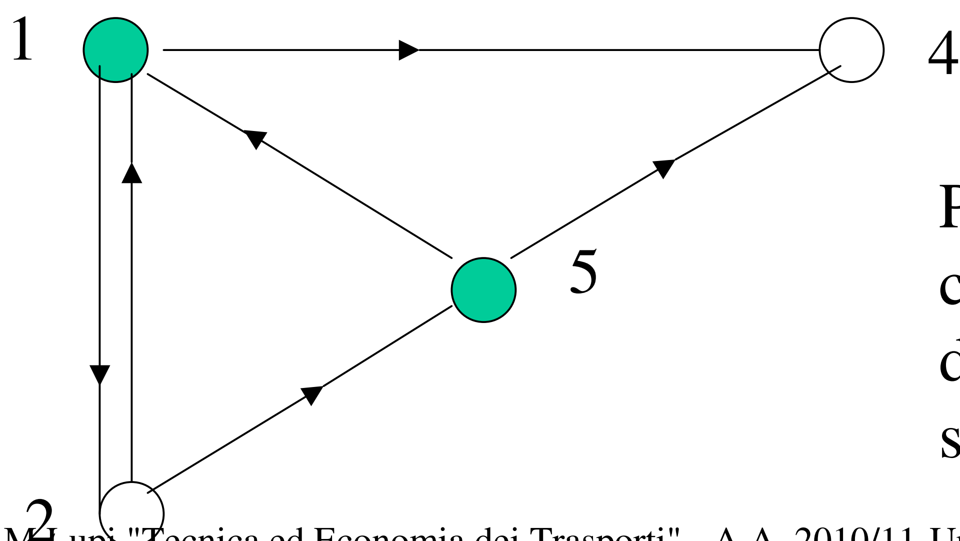


Grafo *parziale* (di un dato grafo): è un grafo che si ottiene dal grafo dato *eliminando* alcuni *archi* (i nodi rimangono gli stessi).

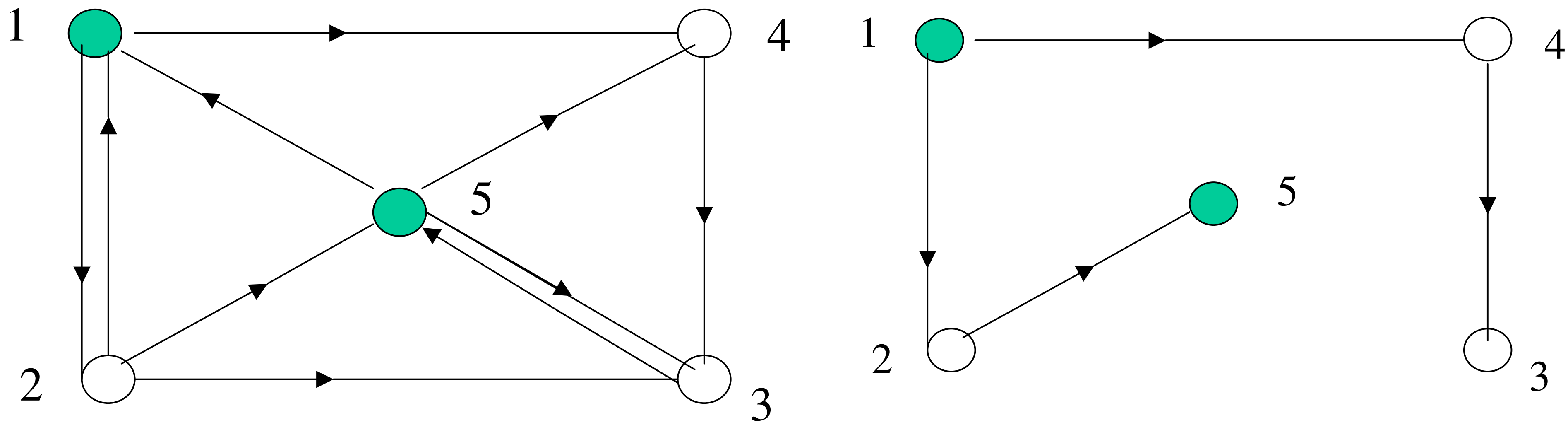




Sottografo (di un dato grafo): è un grafo che si ottiene dal grafo dato *eliminando* alcuni *nodi* ed alcuni *archi* del grafo dato.

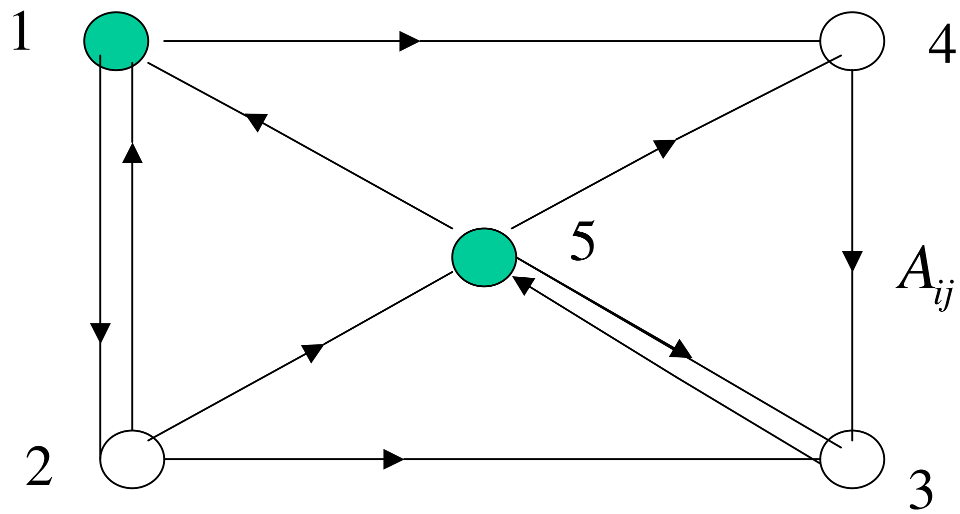


Per esempio un itinerario che connette due nodi, s e t, di un dato grafo è un esempio di sottografo.



Un albero, avente come nodo radice un nodo di un grafo, è un grafo *parziale* del grafo dato. Inoltre è un esempio di grafo *non connesso*.

In particolare posso definire un *albero di radice in un nodo s* di un grafo come un *grafo parziale* del grafo dato (privo di circuiti) nel quale esiste un solo itinerario che collega il nodo s con ciascun altro nodo del grafo dato.



Matrice A : *incidenza archi-itinerari*

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ se l'itinerario } j \text{ contiene l'arco } i \\ 0 \text{ altrimenti} \end{cases}$$

	1°	2°	3°	4°
1 – 2	0	1	1	0
1 – 4	1	0	0	0
2 – 1	0	0	0	0
2 – 3	0	0	1	0
2 – 5	0	1	0	0
3 – 5	1	0	1	0
4 – 3	1	0	0	0
5 – 1	0	0	0	1
5 – 3	0	0	0	0
5 – 4	0	0	0	0

Itinerari fra la *coppia O-D 1-5*

$1 \longrightarrow 5$: 1-4; 4-3; 3-5 1° itin

$1 \longrightarrow 5$: 1-2; 2-5 2° itin.

$1 \longrightarrow 5$: 1-2; 2-3; 3-5 3° itin.

Itinerari fra la *coppia O-D 5-1*

$5 \longrightarrow 1$: 5-1 4° itin.

$$\mathbf{d}\begin{cases}1000\ (1\rightarrow 5)\\ 500\ \ (5\rightarrow 1)\end{cases}\qquad\qquad \mathbf{h}\begin{cases}300\ (1°\ \mathit{Itin.})\\ 400\ (2°\ \mathit{Itin.})\\ 300\ (3°\ \mathit{Itin.})\\ 500\ (4°\ \mathit{Itin.})\end{cases}$$

Flusso su un arco: somma dei flussi sugli itinerari che contengono l'arco. Esempio arco 3-5.

$$\begin{pmatrix}1 & 0 & 1 & 0\end{pmatrix} \times \begin{bmatrix}300\\400\\300\\500\end{bmatrix} = 300 + 300 = 600\ \mathit{autoveicoli}$$

$$\underset{a\times 1}{\mathbf{f}} = \underset{a\times M}{\mathbf{A}}\ \underset{M\times 1}{\mathbf{h}}$$

a : numero di archi nella rete; M : numero di itinerari nella rete

B : Matrice di incidenza coppie O/D - itinerari

$$\begin{array}{cc} & \begin{array}{cccc} 1° & 2° & 3° & 4° \end{array} \\ \begin{array}{c} 1 \to 5 \\ 5 \to 1 \end{array} & \begin{array}{cccc} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \end{array}$$

$$B_{ij} \begin{cases} 1 \text{ se l'itinerario } j \text{ collega la coppia } i \\ 0 \text{ altrimenti} \end{cases}$$

$$\underset{(m \times 1)}{\mathbf{d}} = \underset{(m \times M)}{\mathbf{B}} \; \underset{(M \times 1)}{\mathbf{h}} \qquad \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 300 \\ 400 \\ 300 \\ 500 \end{bmatrix} \to \begin{bmatrix} 1000 \\ 500 \end{bmatrix}$$

m : numero di coppie O/D nella rete

M : numero di itinerari nella rete

Se voglio trovare h dato d?

$$0{,}3 = \frac{300}{300+400+300}$$

$$\mathbf{B}'(\underset{M}{n.\,itinerari} \times \underset{m}{n.\,coppie}\, O/D) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \qquad \mathbf{B}^{*\prime} = \begin{bmatrix} 0{,}3 & 0 \\ 0{,}4 & 0 \\ 0{,}3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$0{,}4 = \frac{400}{1000}$$

$$1 = \frac{500}{500}$$

$$\underset{(M\times 1)}{\mathbf{h}} = \underset{(M\times m)}{\mathbf{B}^{*\prime}} \; \underset{(m\times 1)}{\mathbf{d}}$$

Aliquota di domanda, fra la coppia O-D j, che utilizza l'itinerario i

$$\begin{bmatrix} 0{,}3 & 0 \\ 0{,}4 & 0 \\ 0{,}3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1000 \\ 500 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} 300 \\ 400 \\ 300 \\ 500 \end{bmatrix}$$

Siamo interessati alla *determinazione* di *f* (vettore dei flussi sugli archi) *dato* il vettore di *domanda* d – *Problema dell'**assegnazione***

$$\left.\begin{aligned}\mathbf{f} &= \mathbf{A}\,\mathbf{h}\\ \mathbf{h} &= \mathbf{B}^{*\prime}\mathbf{d}\end{aligned}\right\} \longrightarrow \mathbf{f} = \mathbf{A}\mathbf{B}^{*\prime}\mathbf{d} = \mathbf{Z}\mathbf{d}$$

$$\underset{(a\times 1)}{\mathbf{f}} = \underset{(a\times M)}{\mathrm{A}}\ \underset{(M\times 1)}{\mathbf{h}} \qquad \underset{(M\times 1)}{\mathbf{h}} = \underset{(M\times m)}{\mathbf{B}^{*\prime}}\ \underset{(m\times 1)}{\mathbf{d}}$$

$$\underset{(a\times 1)}{\mathbf{f}} = \underset{(a\times M)}{\mathbf{A}}\ \underset{(M\times m)}{\mathbf{B}^{*\prime}}\ \underset{(m\times 1)}{\mathbf{d}} = \underset{(a\times m)}{\mathbf{Z}}\ \underset{(m\times 1)}{\mathbf{d}}$$

$$Z_{ij} = \text{aliquota di domanda della coppia O/D } j \text{ passante per l'arco } i$$

$$\underset{(a\times M)}{\mathbf{A}} \qquad \underset{(M\times m)}{\mathbf{B}^{*'}} \qquad \underset{(a\times m)}{\mathbf{Z}}$$

$$\begin{array}{c|cccc}
 & 1° & 2° & 3° & 4° \\
\hline
1-2 & 0 & 1 & 1 & 0 \\
1-4 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
2-1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
2-3 & 0 & 0 & 1 & 0 \\
2-5 & 0 & 1 & 0 & 0 \\
3-5 & 1 & 0 & 1 & 0 \\
4-3 & 1 & 0 & 0 & 0 \\
5-1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\
5-3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
5-4 & 0 & 0 & 0 & 0
\end{array}
\quad
\begin{array}{cc}
0,3 & 0 \\
0,4 & 0 \\
0,3 & 0 \\
0 & 1
\end{array}
\quad \longrightarrow \quad
\begin{array}{c|cc}
 & 1-5 & 5-1 \\
\hline
1-2 & 0,7 & 0 \\
1-4 & 0,3 & 0 \\
2-1 & 0 & 0 \\
2-3 & 0,3 & 0 \\
2-5 & 0,4 & 0 \\
3-5 & 0,6 & 0 \\
4-3 & 0,3 & 0 \\
5-1 & 0 & 1 \\
5-3 & 0 & 0 \\
5-4 & 0 & 0
\end{array}$$

$$\underset{(a\times m)}{\mathbf{Z}} = \underset{(a\times M)}{\mathbf{A}} \; \underset{(M\times m)}{\mathbf{B}^{*'}}$$

$$\underset{(a\times m)}{\mathbf{Z}}$$

	1–5	5–1
1–2	0,7	0
1–4	0,3	0
2–1	0	0
2–3	0,3	0
2–5	0,4	0
3–5	0,6	0
4–3	0,3	0
5–1	0	1
5–3	0	0
5–4	0	0

$$\underset{(m\times 1)}{\mathbf{d}}$$

1000
500

$$\longrightarrow$$

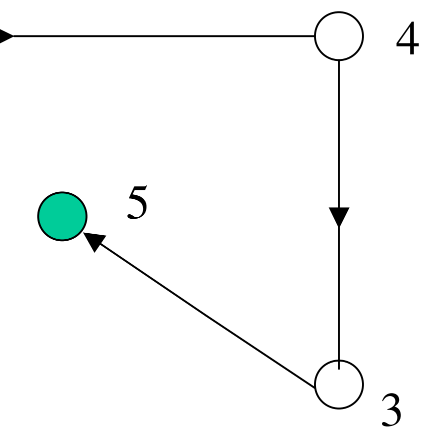
$$\underset{(a\times 1)}{\mathbf{f}}$$

1–2	700
1–4	300
2–1	0
2–3	300
2–5	400
3–5	600
4–3	300
5–1	500
5–3	0
5–4	0

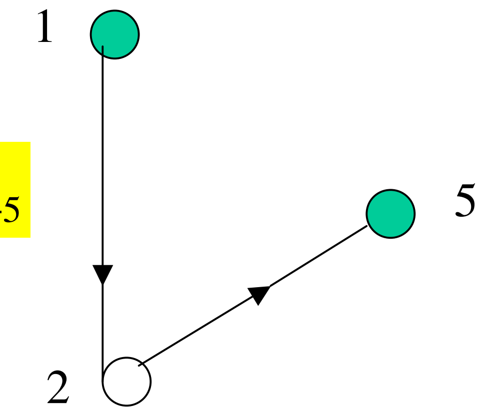
$$\underset{(a\times 1)}{\mathbf{f}} = \underset{(a\times m)}{\mathbf{Z}}\ \underset{(m\times 1)}{\mathbf{d}}$$

Ho ipotizzato una certa matrice $\mathbf{B}^{*\prime}$

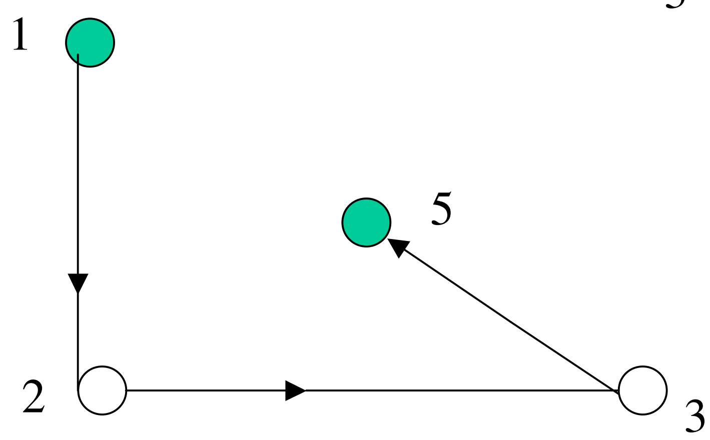
$$\mathbf{B}^{*\prime}=\begin{bmatrix} 0{,}3 & 0 \\ 0{,}4 & 0 \\ 0{,}3 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$



30% d_{1-5}



40% d_{1-5}



30% d_{1-5}

Nelle applicazioni pratiche devo risolvere il *problema* dell'*assegnazione* per reti di *grandi dimensioni*

Nel corso vedremo due metodi:

Assegnazione *tutto o niente*: *tutta la domanda*, fra una certa coppia O-D, viene assegnata all'*itinerario di minimo costo.*

Assegnazione *probabilistica*: la domanda si *divide* fra i *vari itinerari* che congiungono una certa coppia O/D (la distribuzione della domanda dell'esempio precedente potrebbe essere il risultato di un' assegnazione probabilistica).

Costi sugli archi

I nodi del grafo indicano le diverse *posizioni significative* nello *spazio e nel tempo* dell'utente del sistema di trasporto.

Ogni arco è caratterizzato dal tempo di trasferimento o da altri *oneri sopportati dall'utente* per *spostarsi* dal nodo iniziale a quello finale.

Il costo è un *vettore*: tempo di percorrenza, costo monetario, stress….., ma nella schematizzazione di un sistema di trasporto tramite una rete si considera uno *scalare:*

- considerando la componente più *rilevante*: per es. tempo del viaggio per le reti di trasporto urbane;

- *omogeneizzando tutte* le componenti in un costo *generalizzato* attraverso opportuni coefficienti:

$$c_g = \beta t + c_m$$

costo monetario

Valore monetario del tempo

Il costo del trasporto riflette l' *avversione* degli *utenti* a percorrere l'arco. La domanda di trasporto è una *domanda derivata:* uno spostamento *non produce "utilità" in sé*, ma viene compiuto per *svolgere delle attività* alla *destinazione del viaggio*.

Costi sugli archi e costi sugli itinerari di una rete

Costo su un itinerario p, $\mathbf{C}_p$, è dato dalla somma dei costi sugli archi che lo compongono.

$\mathbf{C} \equiv (C_1, C_2, \ldots\ldots, C_p, \ldots\ldots\ldots C_M)$ **Vettore dei costi sugli itinerari**

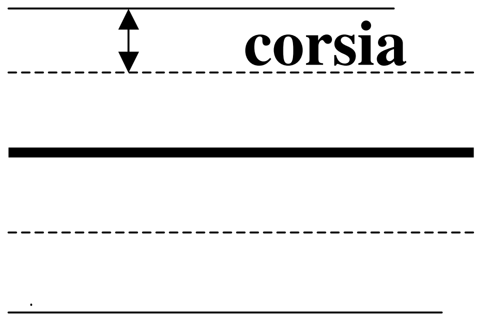
$\mathbf{c} \equiv (c_1, c_2, \ldots\ldots, c_i, \ldots\ldots\ldots c_a)$ **Vettore dei costi sugli archi**

Matrice A : ***incidenza archi-itinerari***

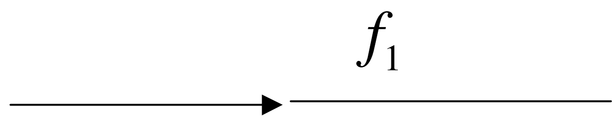
$$A_{ij} = \begin{cases} 1 \text{ se l'itinerario } j \text{ contiene l'arco } i \\ 0 \text{ altrimenti} \end{cases}$$

$$\underset{M\times 1}{\mathbf{C}} = \underset{M\times a}{\mathbf{A'}} \ \underset{a\times 1}{\mathbf{c}}$$

Funzioni di costo su un arco



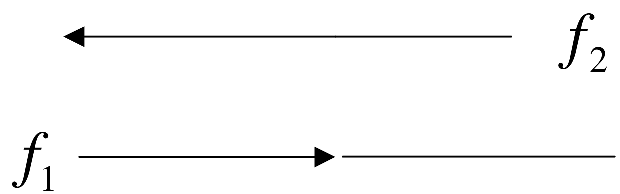
Strada a carreggiate *separate* (autostrada)



$c_1 = c_1(f_1)$

Funzione di costo *separabile*: il costo dipende *solo* dal flusso sull'arco a cui la funzione si riferisce: $c_i = c_i(f_i)$.

Strada a carreggiata *unica* (due corsie totali)



$c_1 = c_1(f_1, f_2)$

Funzione di costo *non separabile*: il costo dipende *anche* dal flusso su altri archi della rete. In generale: $c_i = c_i(\mathbf{f})$

Rete di Trasporto

Si dice *rete* un grafo ai cui archi è associata una *caratteristica quantitativa.*

La *funzione di costo* è la *caratteristica quantitativa* che trasforma un grafo in una *rete di trasporto.*

Rete di trasporto: $R(N, L, F)$

N **:** Insieme dei nodi

L **:** Insieme degli archi (coppie di nodi)

F **:** Insieme delle funzioni di costo

Estrazione di una rete di trasporto da una realtà territoriale

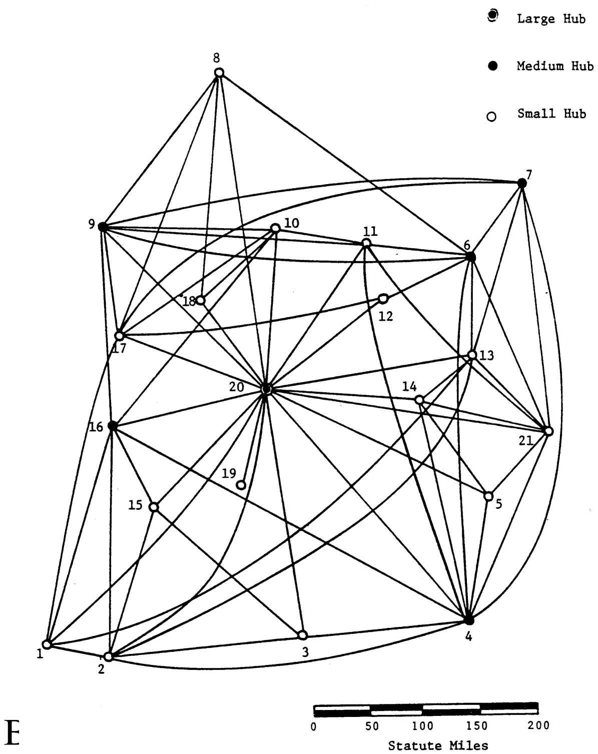
Problema dell'*estrazione*: individuazione delle *posizioni spazio-temporali* degli utenti *significative per l'analisi del sistema di trasporto*, degli *archi* che le collegano con le rispettive *funzioni di costo.*

Rete di *trasporto aereo*:

Nodi: aeroporti

Archi: esistenza di un *servizio* di trasporto aereo fra i nodi.

(Discorso analogo per una rete di trasporto marittimo)



Rete di *trasporto ferroviario*:

Nodi: stazioni

Archi: linee ferroviarie (*infrastruttura fisica*)

(Discorso analogo per una rete di trasporto autostradale)

Estrazione della rete da una realtà territoriale: rete dei trasporto di una *area urbana* : *caso complesso*

Più sistemi di trasporto:

trasporto individuale $\begin{cases} \text{autovettura} \\ \text{motociclo} \\ \text{bicicletta} \\ \text{piedi} \end{cases}$ trasporto collettivo $\begin{cases} \text{autobus} \\ \text{tram} \\ \text{metropolitana} \end{cases}$

Altro problema*:* le strade sono molto *differenti* fra loro per caratteristiche *geometriche* e di *traffico.*

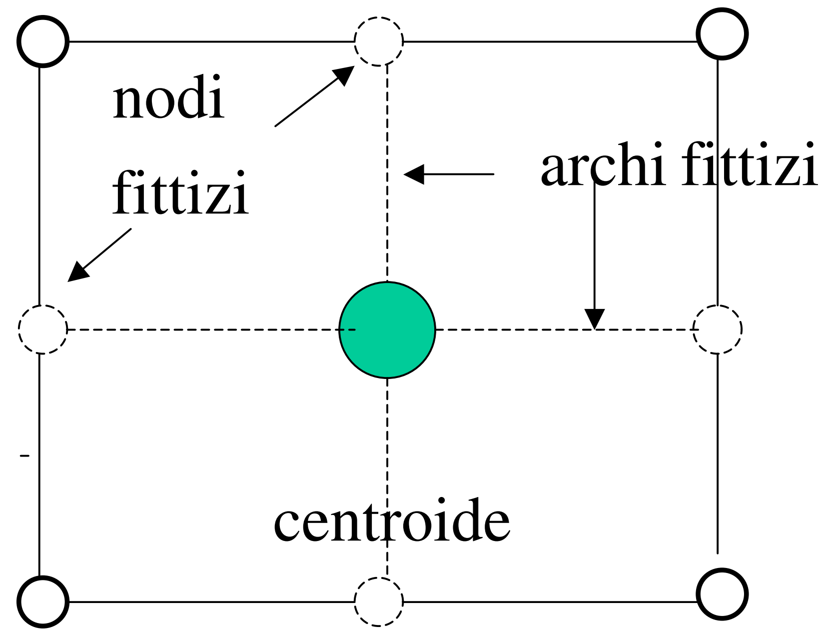
Tipologie di strade: *locali, interquartiere, scorrimento, primarie*

I nodi centroidi

La rete di trasporto serve per *modellizzare* fondamentalmente l'*offerta* di trasporto. Ma si tiene conto anche della *domanda:* attraverso la determinazione del numero dei *centroidi* e della loro posizione.

I punti di partenza e di fine degli spostamenti in area urbana sono estremamente diffusi nel territorio.

Semplificazione per trattare il problema: penso concentrate, in un unico punto, *centroide*, gli spostamenti che arrivano o partono dai diversi punti della zona a cui è associato il centroide.



Quanti centroidi devo mettere in una rete che rappresenta un sistema urbano?

Problema del *dettaglio* nell'estrazione di una rete di trasporto urbana

Fasi della simulazione di un sistema di trasporto:

- *Estrazione della rete* (modellizzazione dell'offerta)
- *Stima della domanda* di trasporto
- Interazione domanda- offerta: *assegnazione della domanda alla rete*

→ Calcolo dei *flussi sugli archi*

Sono interessato ad avere una discordanza fra *flussi calcolati* con il modello e *rilevati* nella realtà (*conteggi di traffico*) minore possibile.

Quattro *fonti principali* di errore (discordanza fra flussi calcolati e rilevati):

a) Errori dovuti alla modellizzazione del *comportamento dell'utente* nella scelta dell'itinerario fra una coppia O-D.

b) Errori riguardanti la *stima della domanda* di trasporto.

c) Errori relativi alle *funzioni di costo* sugli archi.

d) Scarsa idoneità dello *schema di rete* a rappresentare il sistema di offerta reale.

Scarsa idoneità dello *schema di rete* a rappresentare il sistema di offerta reale (d): sono spinto ad estrarre una *rete dettagliata*

b) Errori riguardanti la *stima* della *domanda* di trasporto

c) Errori relativi alle *funzioni di costo* sugli archi

↓

Mi conviene adottare uno schema *meno dettagliato*

Per ridurre le fonti di "discordanza" b) e c) mi conviene:

- *Limitare* il numero di *centroidi* e quindi di coppie O-D nella rete: limitando il numero di informazioni ottenute da indagini campionarie, a parità di tasso di campionamento, ottengo stime più *affidabili*.

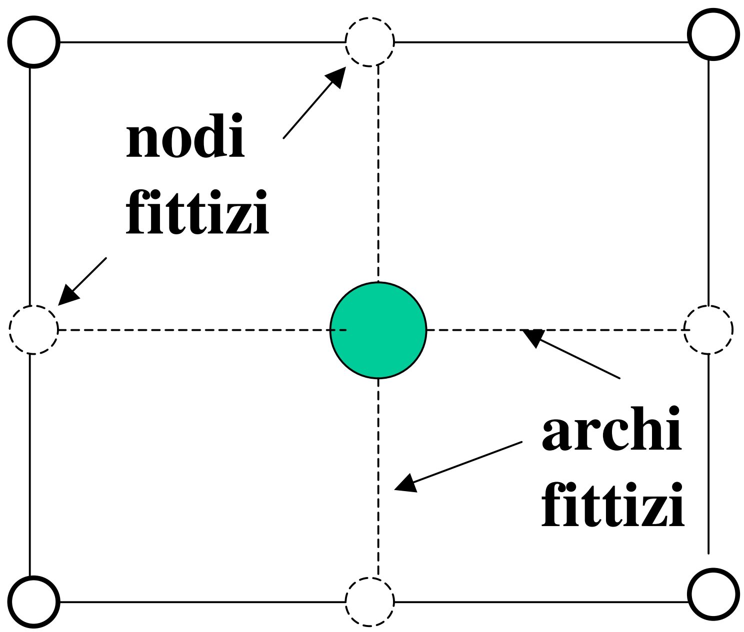
- *Non rappresentare le strade locali* : funzioni di costo difficili da individuare perché non riconducibili ad una tipologia standard.

Nella *pratica dell'estrazione* delle reti da una realtà urbana si tende a *non rappresentare* le *strade locali* (strade a servizio dei comparti ambientali):

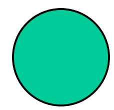
- ottengo zone di riferimento dei centroidi di *grandezza adeguata* ad una *buona stima* della *domanda* (numero limitato di coppie O-D della rete);

- evito di introdurre nel modello funzioni di costo i cui valori sono lontani da quelli reali (funzioni di costo *poco affidabili*).

Comparti ambientali



Porzioni di area urbana in cui il traffico *arriva o parte*, ma *non li attraversa*

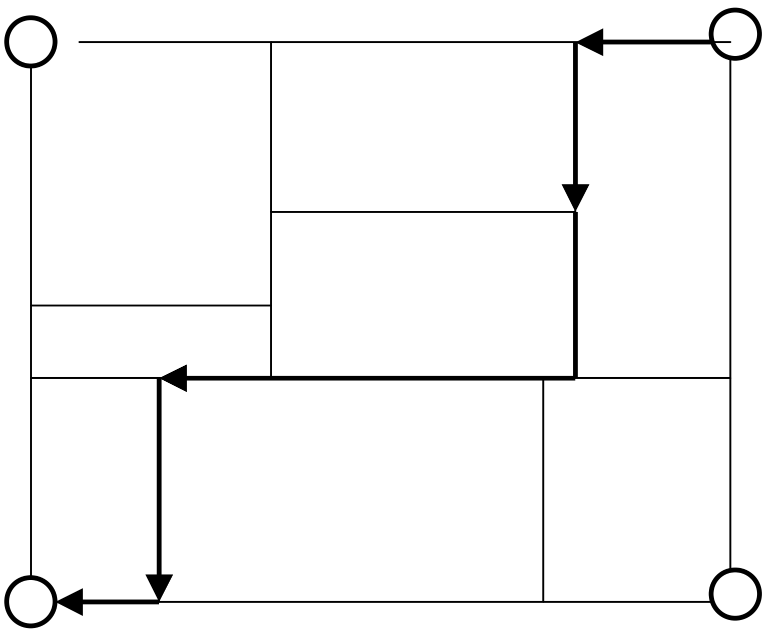


Centroide non attraversabile : in esso si pensano *concentrati* gli spostamenti in arrivo e partenza dal comparto.

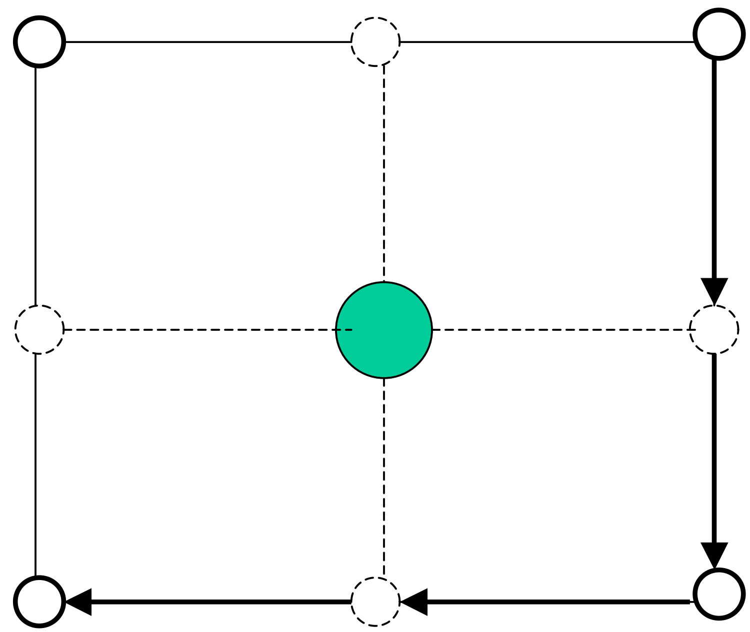
--------------------------- *archi "fittizi"*

Rappresentano in modo fittizio (funzioni di costo non reali) l'insieme delle strade locali (rappresentano anche semplici relazioni di traffico a servizio del comparto).

Affinchè lo schema di rete sia adeguato *devo progettare la rete* stradale reale in modo che gli utenti non attraversino il comparto: altrimenti forzo i flussi su un numero minor di infrastrutture stradali



Itinerario *reale*



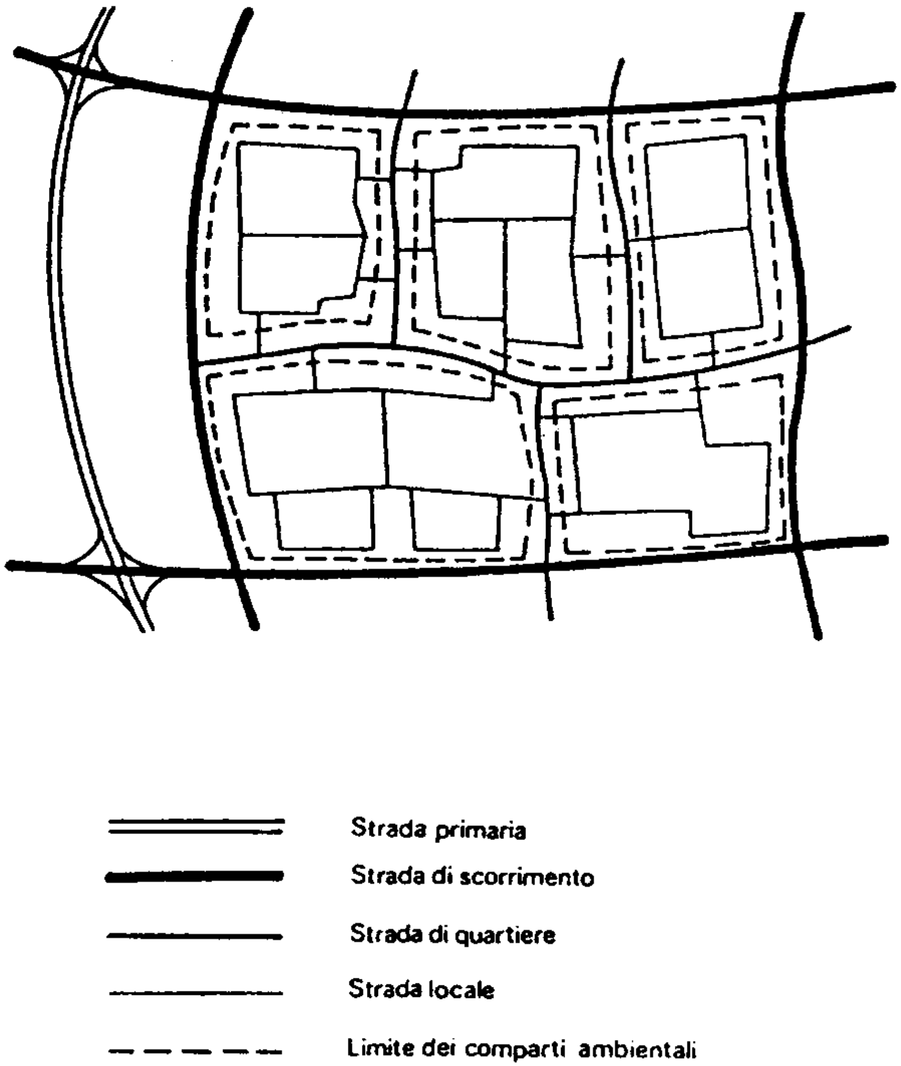
Itinerario considerato *nel modello*

In realtà la previsione dei comparti ambientali, non è tanto una norma per *limitare* gli *errori* dovuti alla *modellizzazione* del sistema di trasporto tramite una rete, ma è soprattutto una *importante norma* di tipo *progettuale.*

Si devono *progettare* reti stradali urbane che siano divise in comparti ambientali al fine di *limitare l'inquinamento atmosferico* ed *acustico* nelle aree residenziali.

Previsione dei comparti ambientali: famoso rapporto "*Traffic in Towns*" della Commissione *Buchan,* anni '60 in Gran Bretagna

Classificazione delle strade urbane



Strade *primarie*: tronchi terminali e passanti delle strade *extraurbane*, prevalentemente *raccolgono* e *distribuiscono* il traffico di *scambio* fra il territorio urbano ed extraurbano (ma sono utilizzate anche dal traffico di attraversamento).

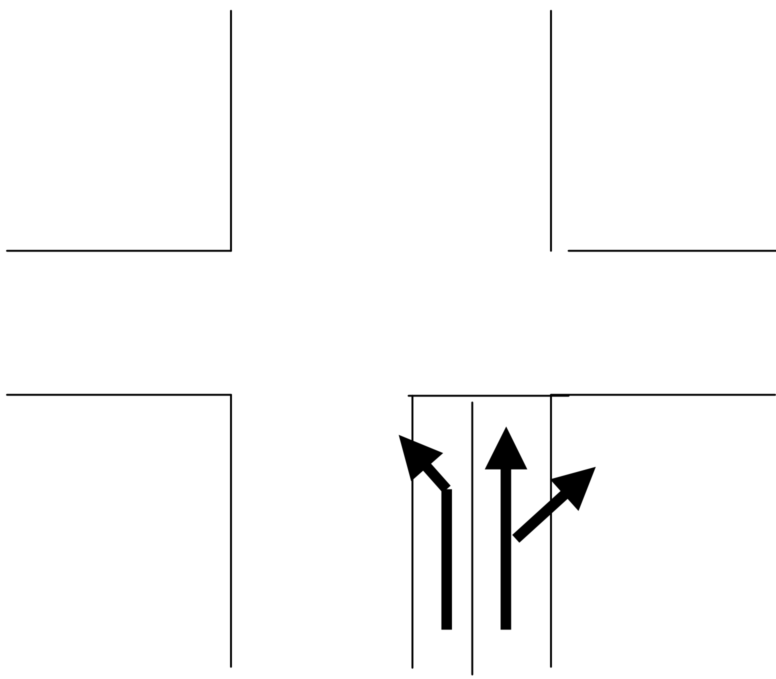
Strade di *scorrimento*: sono totalmente comprese in ambito urbano, prevalentemente, canalizzano gli spostamenti di *maggiore lunghezza* e i *flussi più elevati.*

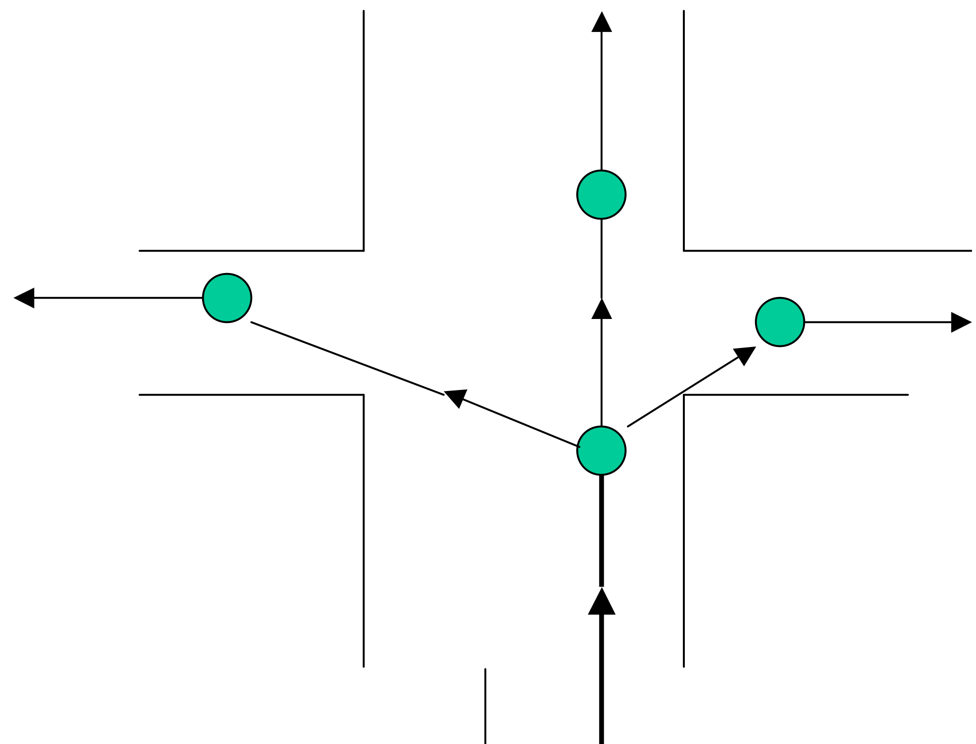
Strade di *quartiere*: sono a servizio di ambiti urbani più limitati di quelle di scorrimento, ma superiori a quelli delle strade locali.

Strade *locali*: sono al servizio dei *comparti ambientali*. Le strade locali devono essere progettate per consentire l'*accesso* agli edifici del comparto, ma *non* per essere utilizzate per *attraversare* il comparto.

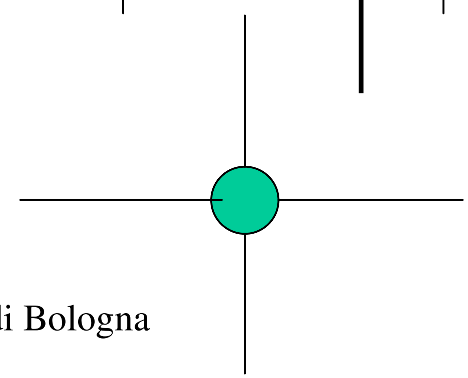
Intersezioni semaforizzate

Rappresentazione cosiddetta *“esplosa”*

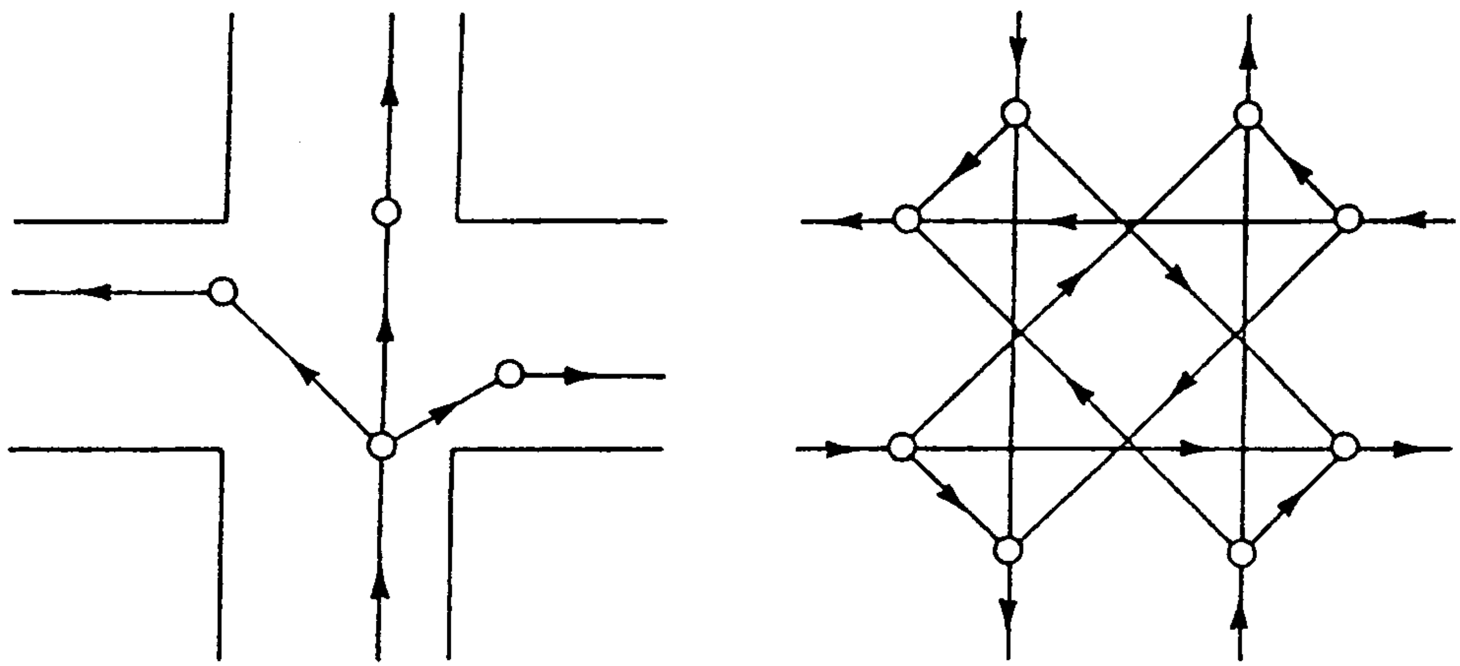




Rappresentazione cosiddetta *“semplificata”* (unico nodo)

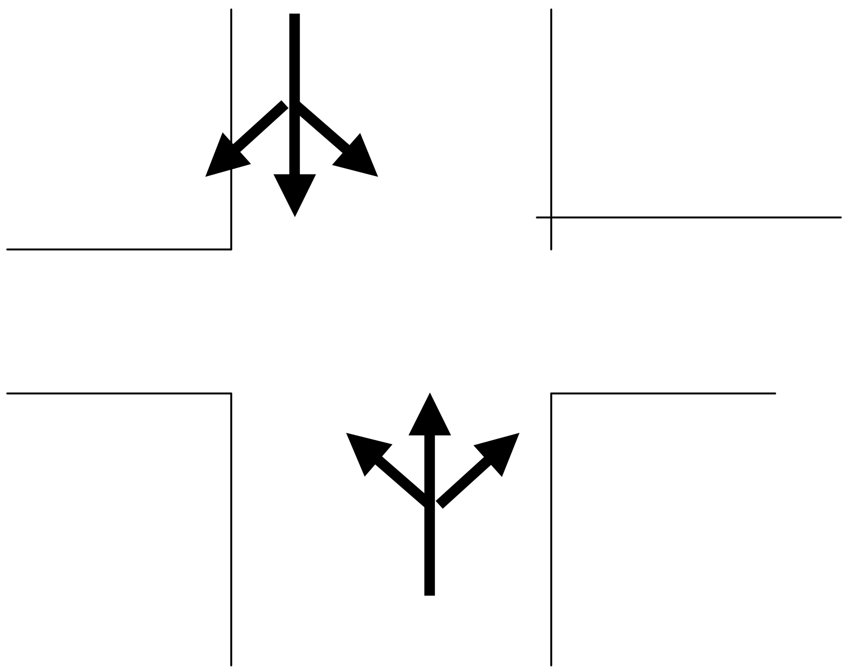


Rappresentazione "esplosa"

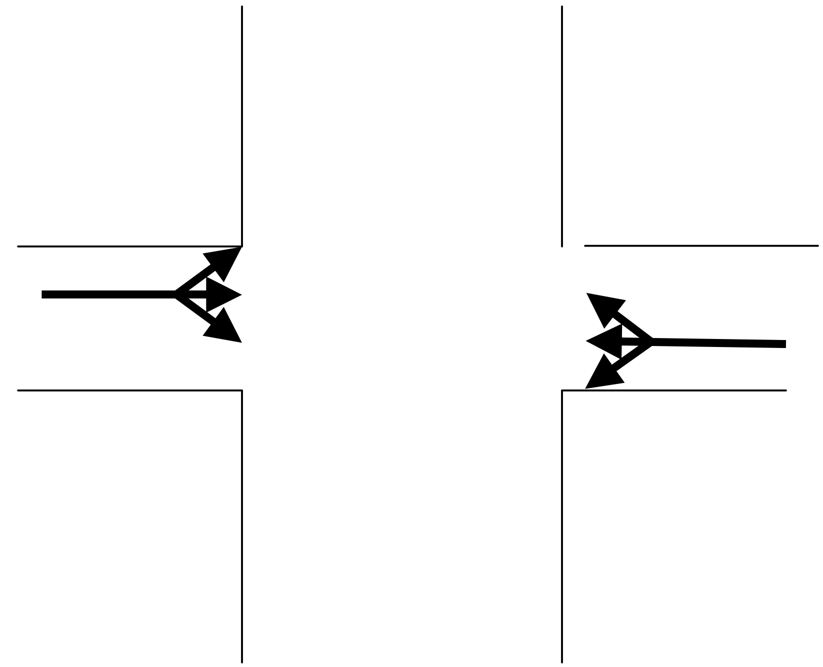


Una intersezione semaforizzata è rappresentata con *8 nodi* e *12 archi* (per ciascun approccio ho tre archi: svolta a destra, attraversamento, svolta a sinistra).

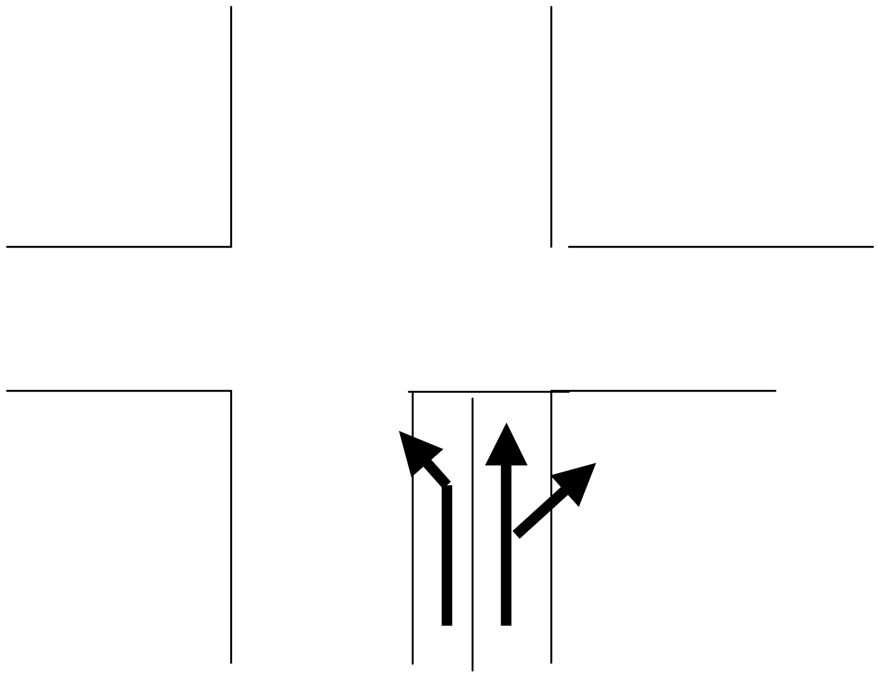
Immaginiamo una certa fasatura:

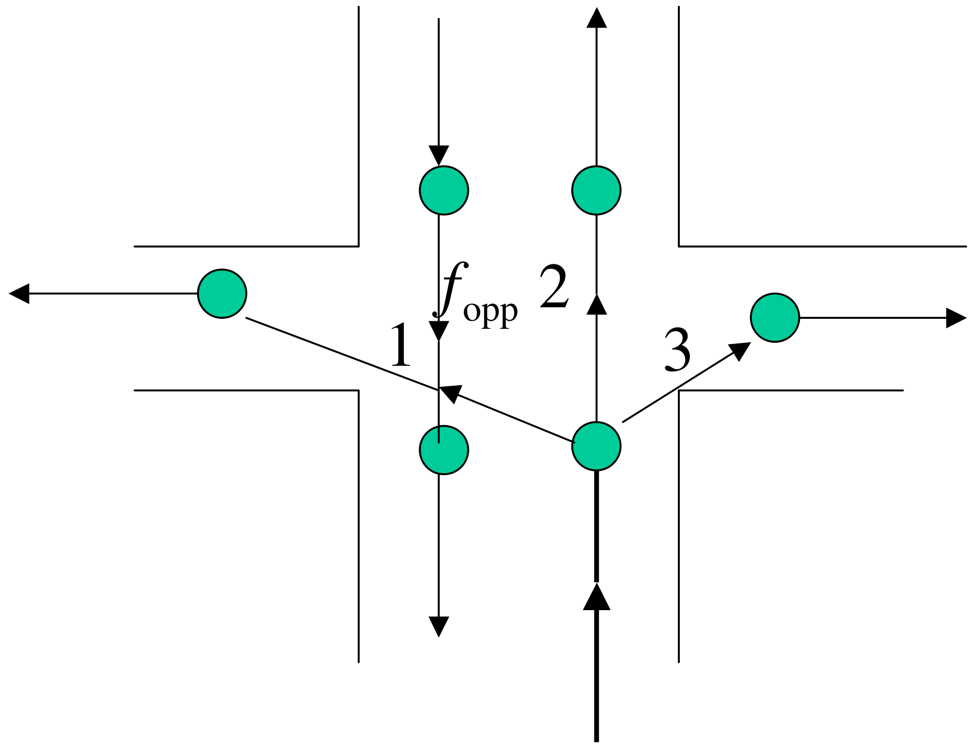


1° fase: nord-sud



2° fase: est-ovest





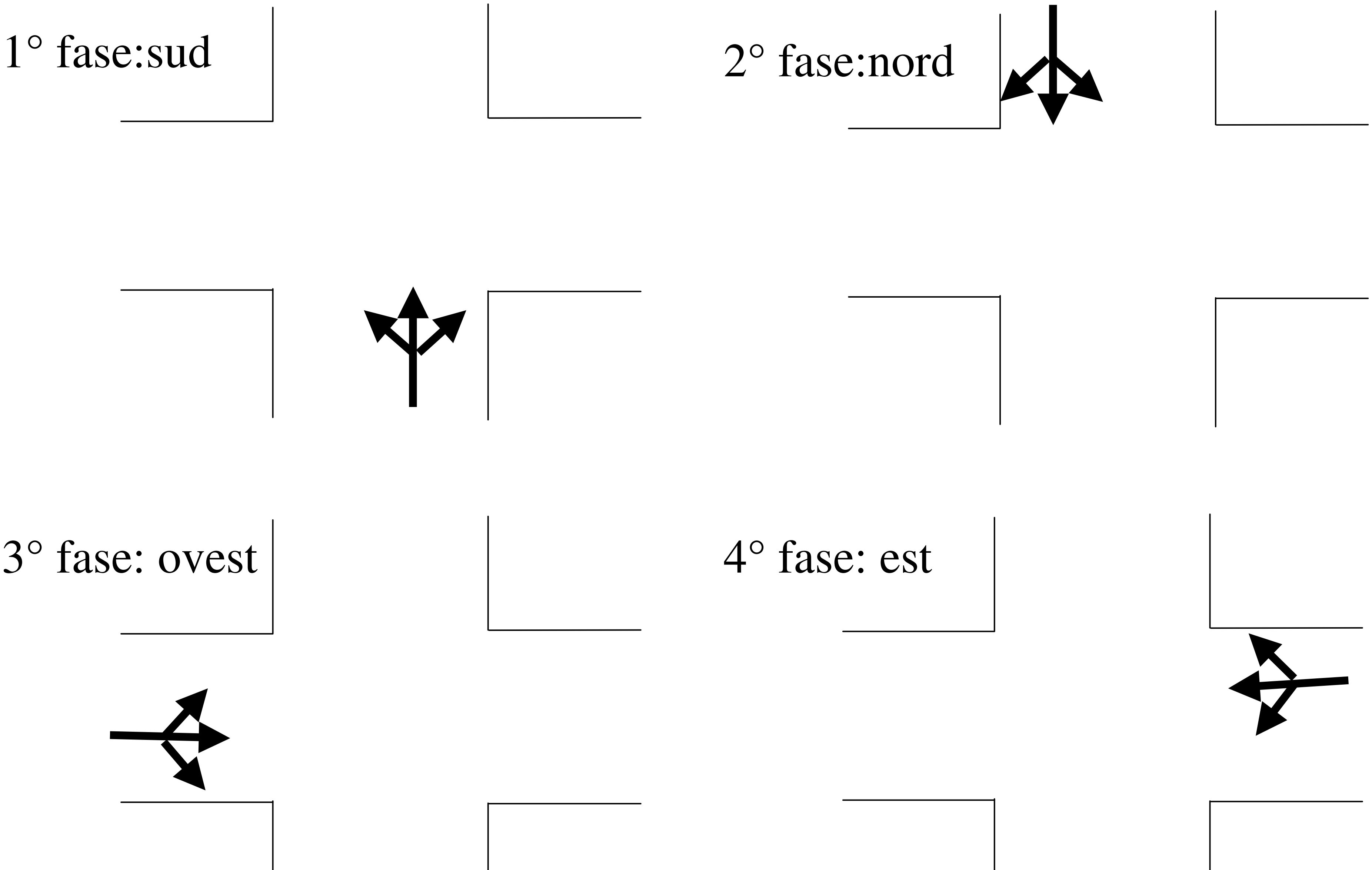
Funzioni di costo *non separabili* : il costo dipende *non solo* dal flusso sull'arco a cui ci si riferisce.

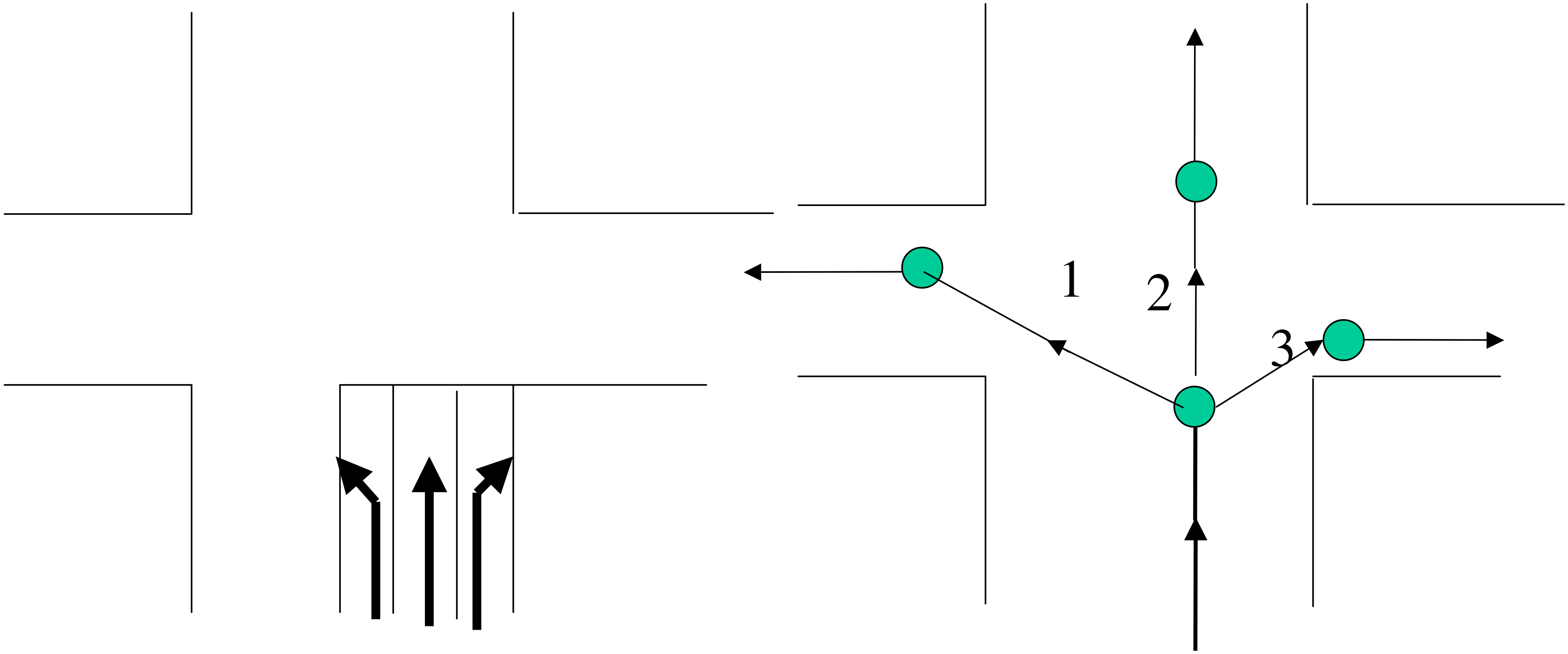
Arco1, *svolta a sinistra*, *non* separabile**:** $c_1 = c_1(f_1, f_{\text{opp}})$

Arco 2, *attraversamento*, *non* separabile: $c_2 = c_2(f_2, f_3)$

Arco 3, *svolta a destra*, *non* separabile: $c_3 = c_3(f_3, f_2)$

Altro tipo di fasatura





Funzioni di costo *separabili* : il costo dipende solo dal flusso sull'arco a cui ci si riferisce.

Arco1, *svolta sinistra*, *separabile*: $c_1 = c_1(f_1)$

Arco 2, *attraversamento*, *separabile*: $c_2 = c_2(f_2)$

Arco 3, *svolta a destra*, *separabile*: $c_3 = c_3(f_3)$