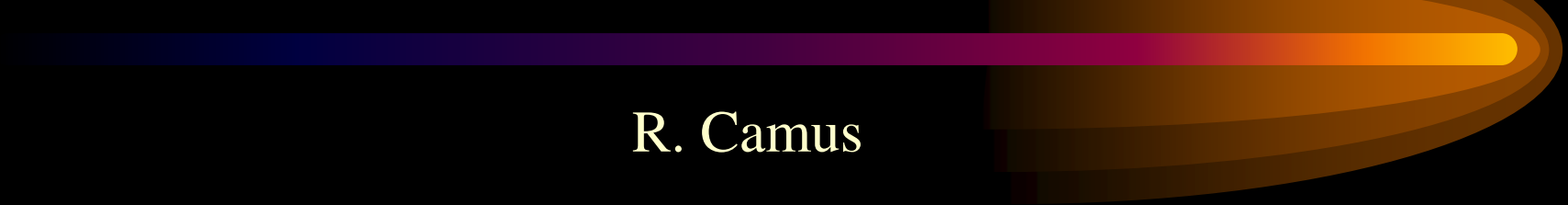


Progetto di impianti semaforici - 2



R. Camus

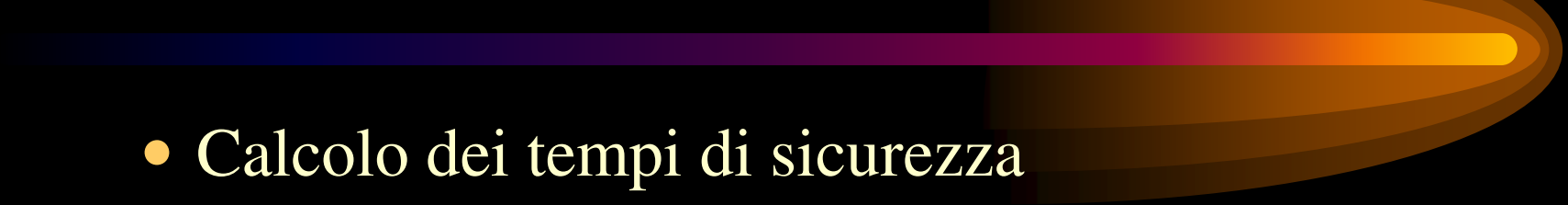
Progetto
del piano semaforico
a tempi fissi

Caratteristiche



- Durata del ciclo
- Composizione delle fasi
- Tempi di sicurezza
- Sequenza delle fasi
- Tempi di verde

Sequenza progettuale - 1



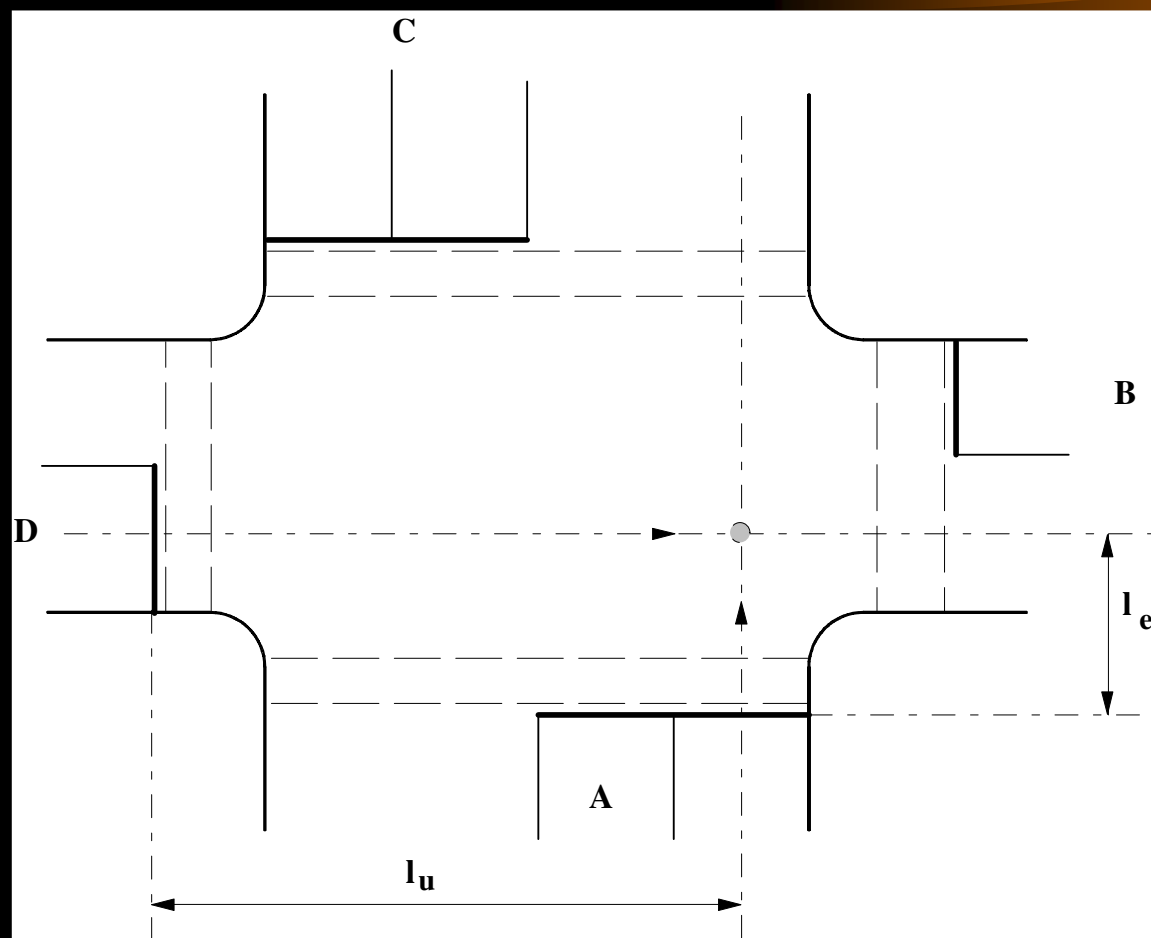
- Calcolo dei tempi di sicurezza
- Progetto delle fasi
- Determinazione della sequenza delle fasi
- Calcolo dei flussi critici e dei flussi di saturazione
- Calcolo della durata del ciclo
- Calcolo dei tempi di verde
- Disegno del piano semaforico

Sequenza progettuale - 2



- Verifica della capacità
- Verifica del tempo perso e del numero di arresti
- Determinazione degli intervalli di tempo in cui inserire il piano
- Determinazione degli istanti di commutazione.

Tempi di sicurezza - traiettorie



Tempi di sicurezza - componenti

- Somma algebrica di tre tempi:
 - t_u tempo di uscita (uscite durante il giallo)
 - t_e tempo di sgombero
 - t_i tempo di ingresso

$$t_s = t_u + t_e - t_i$$

Distanza di sgombero

- Composta da due termini:
 - la lunghezza fra la linea di arresto e il punto di conflitto più sfavorevole (più distante) l_e ;
 - la lunghezza fittizia l_v del veicolo in fase di sgombero. Tale lunghezza non corrisponde all'effettiva lunghezza del veicolo, in quanto si suppone che i veicoli di elevate dimensioni vengano percepiti più chiaramente da chi impegna l'intersezione

Lunghezze fittizie dei veicoli



Tipi di veicolo	l_v (m)
Cicli	0
Veicoli sia leggeri che pesanti	6
Tram	15

Tempi di uscita

Il tempo di uscita dipende dalla velocità dei veicoli in arrivo e dalle loro caratteristiche di decelerazione.

Corrente in uscita	Velocità (km/h)	t_u
Veicoli che procedono dritto	36	3
Veicoli in svolta (raggio ≥ 10 m)	25	2
Veicoli in svolta (raggio < 10 m)	18	2
Tram o Bus senza fermata prima dell'intersezione	≤ 30	3
	$30 \div 50$	5
	$50 \div 70$	7
Tram o Bus con fermata prima dell'intersezione (*)	$V_{\max}$	0
Biciclette	14	1
Pedoni	$3,5 \div 5,5$	0

Tempi di sgombero



- Il tempo di sgombero t_e viene calcolato sulla base della distanza da percorrere e della velocità media di percorrenza

$$t_e = (l_e + l_v)/v_m$$

Tempi di ingresso

- Il tempo di ingresso t_i è quello necessario per percorrere il tratto l_i
 - veicoli leggeri (40 km/h): $t_i = (l_i \cdot 3,6)/40$
 - bus (20 o 0 km/h) con accelerazione di 1 m/s^2
 - biciclette (18 km/h - 5 m/s): $t_i = l_i / 5$
 - pedoni (1,5 m/s) : $t_i = l_i / 1,5$

Numero di fasi



- numero di fasi minimo che garantisca il deflusso di tutte le manovre
- accorpare in una stessa fase correnti di traffico che richiedono tempi di verde di durata non troppo diversa;
- minimizzare la somma dei tempi persi (intertempi di sicurezza o altre necessità legate alle transizioni di fase)

Successione delle fasi - 1

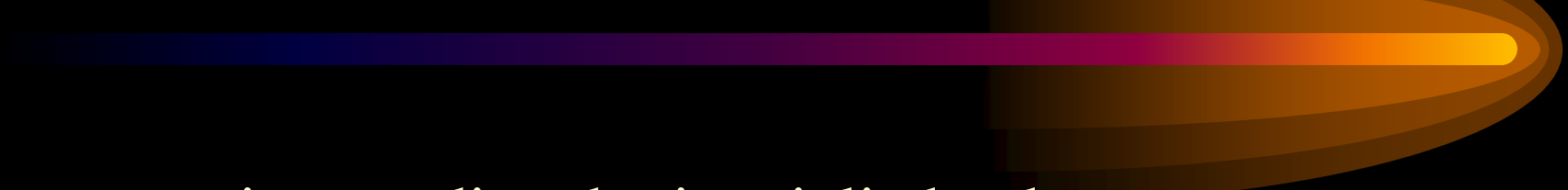


Nel caso di più di 2 fasi si pone il problema della scelta della successione delle fasi.

Possono influire sulla scelta diversi tipi di considerazioni:

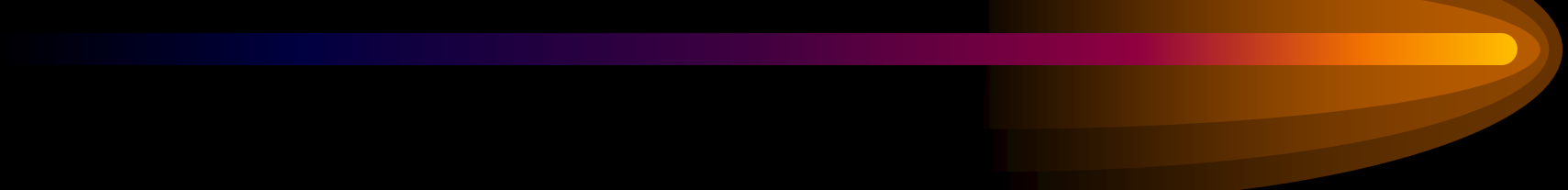
- legate ai movimenti degli utenti
- legate a problemi di capacità
- legate alle manovre (svolte a sx o a dx)

Successione delle fasi - 2



- esigenze di pedoni o cicli che devono impegnare due attraversamenti in successione;
- necessità (intersezioni complesse) di far defluire alcune correnti in modo da smaltire le code, evitando che queste costituiscano ostacolo per altre correnti di traffico
- deflusso di una corrente di traffico in più fasi, che devono pertanto essere consecutive

Successione delle fasi - 3



- il coordinamento con impianti adiacenti può condizionare in modo sensibile la scelta di una particolare sequenza di fasi

Senza altri vincoli:

- la sequenza delle fasi più conveniente è quella che consente di ottenere il ciclo minimo, considerando la sommatoria dei tempi persi.

Transizioni di fasi - 1

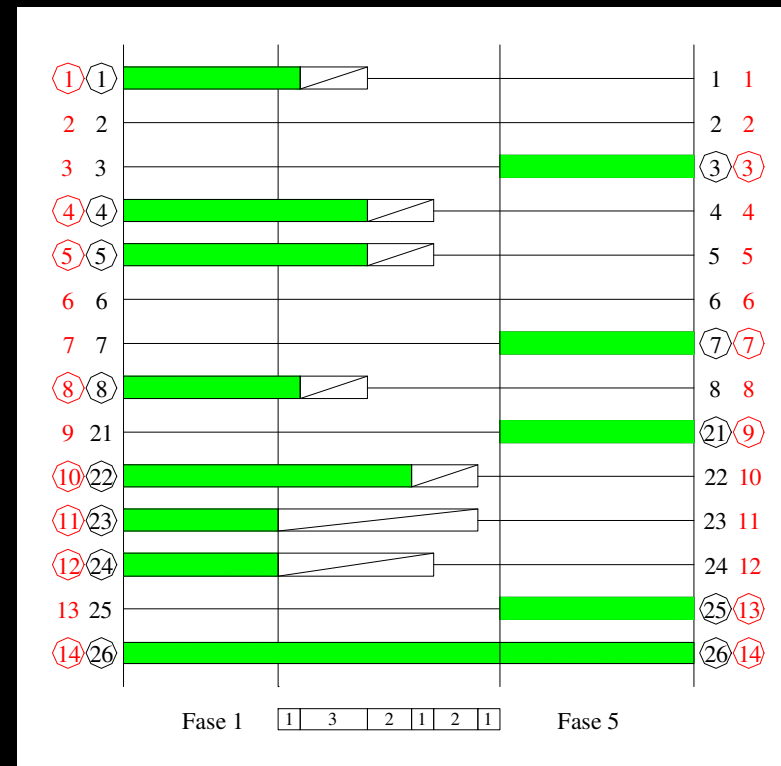
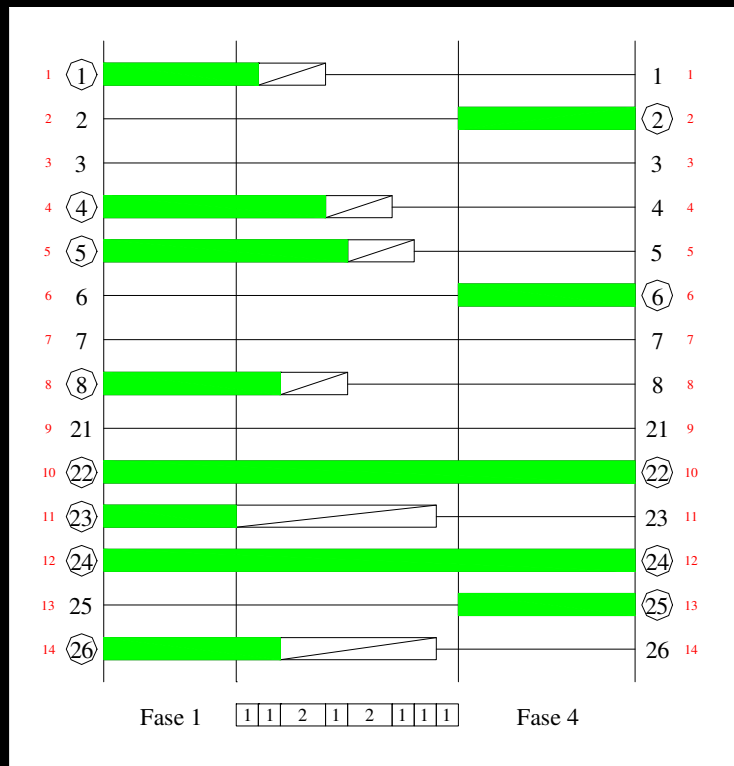


- Una transizione di fase (passaggio da una fase ad un'altra) avviene fra l'istante in cui commuta al rosso il primo segnale della fase uscente, e quello in cui commuta al verde l'ultimo segnale della fase entrante
- deve soddisfare i tempi di sicurezza

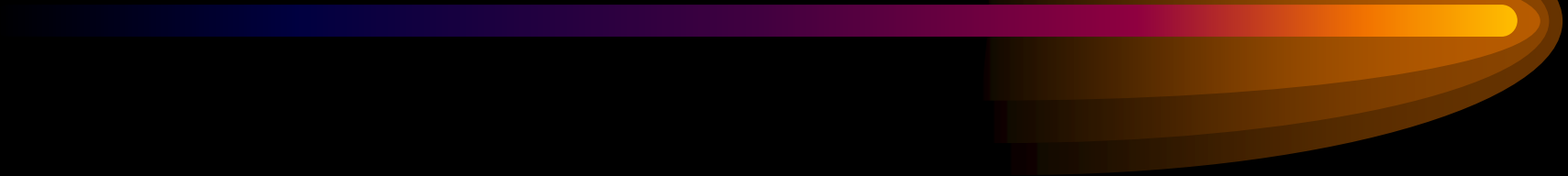
Transizioni di fasi - 2

- può contenere anche tempi necessari per soddisfare particolari condizioni
 - esempio: prolungare la durata di un segnale per sgomberare i veicoli che provengono da un altro segnale della stessa fase, nel caso di due segnali consecutivi a breve distanza
- evitare di inserire attuazioni che modifichino la transizione di fase (garantire comunque i tempi di sicurezza)

Esempi di transizioni di fase



Svolte a sinistra



- Svolte protette
- svolte non protette
- svolte parzialmente protette

Svolte a sinistra protette - 1

- Una svolta a sinistra si dice protetta se durante il proprio tempo di verde i segnali che controllano tutte le correnti in conflitto sono al rosso

Svolte a sinistra protette - 2

- La protezione è di particolare importanza se:
 - il traffico opposto sia particolarmente veloce
 - il traffico sulla manovra di svolta debba essere fatto evacuare rapidamente
 - il traffico di svolta o quello antagonista siano particolarmente intensi
 - scarsa visibilità nell'effettuare la manovra
 - il traffico in svolta debba fare attenzione ad una molteplicità di conflitti (tram, svolte a destra, pedoni, biciclette)

Svolte a sinistra protette - 3



- Nel caso in cui la svolta si effettui su più corsie di norma la svolta deve essere protetta

Svolte a sinistra non protette

- I veicoli in svolta devono dare la precedenza a veicoli della direzione opposta o ad altre correnti aventi diritto di precedenza
- Sono da utilizzarsi soltanto nel caso di flussi antagonisti di modesta entità
- Per lo smaltimento delle code di veicoli in svolta che si possono formare all'interno dell'intersezione è possibile prevedere un ritardato inizio della fase successiva

Svolte a sinistra parzialmente protette

- Parte del verde protetta e parte non protetta
- La parte protetta del verde può essere ottenuta prolungando e/o anticipando il verde rispetto a quello delle correnti antagoniste
- L'utilizzo di un *verde prolungato* è sempre ammissibile. Il *verde anticipato* deve essere invece valutato attentamente per quanto riguarda la sicurezza (è preferibile adottare una fase apposita di svolta)

Svolte a destra



- Svolte a destra protette
- svolte non protette
- svolte parzialmente protette
- svolte non segnalate

Svolte a destra protette



Svolte a destra protetta possono essere previste se i flussi delle correnti in conflitto sono particolarmente elevati, o se la svolta a destra può essere effettuata a velocità pericolose per le correnti antagoniste.

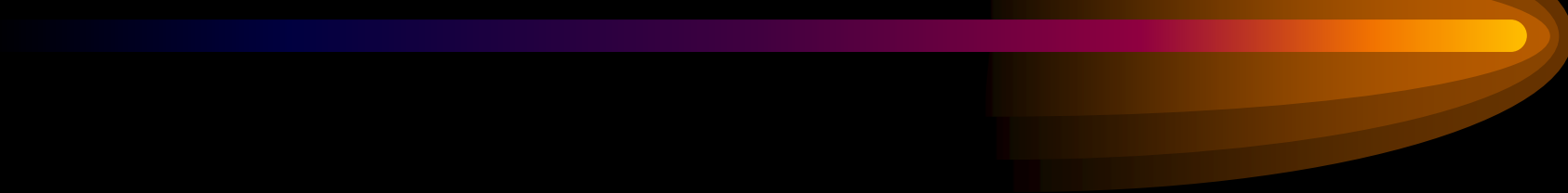
Con corsie delimitate da isole spartitraffico triangolari, l'uso di segnali per le svolte a destra è da considerare se:

- la manovra viene effettuata su più corsie
- le correnti antagoniste sono particolarmente intense
- la velocità con cui viene effettuata la manovra può determinare situazioni di pericolo.

Svolte a destra non protette - 1

- Il conflitto con i pedoni può essere segnalato con lanterna gialla lampeggiante, che deve lampeggiare anche nei periodi di sgombero delle correnti in conflitto
- Il conflitto con veicoli in svolta a sinistra dalla direzione opposta non è generalmente critica in assenza di isole spartitraffico triangolari
- In presenza di isole e con verde pieno per la svolta a destra, il conflitto con le svolte a sinistra delle direzione opposta deve essere evitato in quanto può generare situazioni di pericolo.

Svolte a destra non protette - 2



- In presenza di isole si può fare eccezione nel caso di una corsia sufficientemente lunga dopo il segnale semaforico, e dopo l'attraversamento pedonale in conflitto, in modo da poter installare un segnale di dare precedenza, eventualmente in presenza anche di un segnale giallo lampeggiante (in modo da far riconoscere chiaramente ai veicoli in svolta l'esistenza di un conflitto con veicoli che possono sopraggiungere da sinistra)

Svolte a destra parzialmente protette

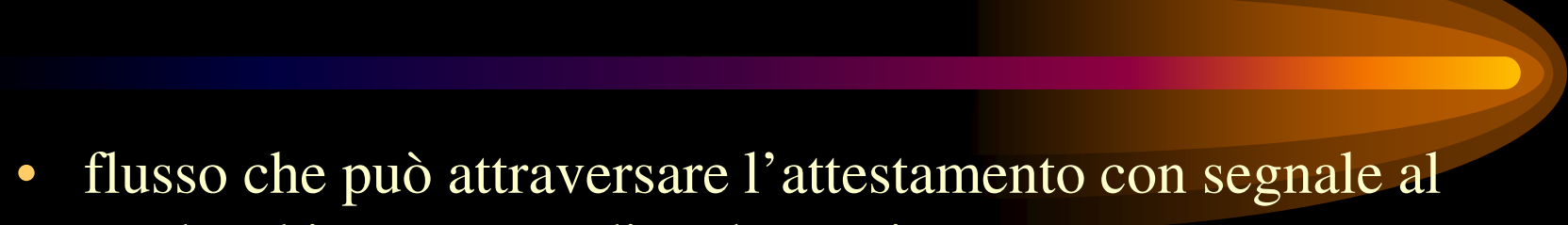
- In presenza di corsie specializzate per la svolta a destra si possono far defluire i veicoli in svolta anche in intervalli di tempo nei quali le correnti antagoniste vengono fermate.
- In tal caso risulta opportuno prevedere lanterne semaforiche veicolari di corsia, utilizzando la lanterna gialla lampeggiante di indicazione del passaggio pedonale per il tempo in cui quest'ultimo si trova al verde, considerando anche i relativi tempi di sgombero.

Svolte a destra non segnalate



- Le svolte a destra non segnalate possono essere effettuate soltanto nel caso in cui vi sia una corsia apposita protetta da un'isola spartitraffico triangolare
- Questa soluzione deve essere valutata attentamente per quanto attiene la sicurezza, soprattutto nei casi in cui il flusso in svolta sia elevato o possa effettuare la manovra in velocità.

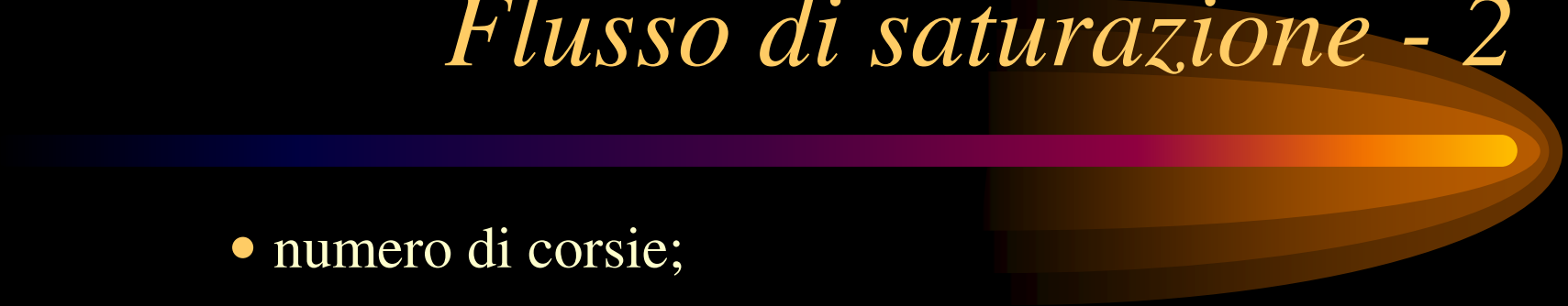
Flusso di saturazione - 1



- flusso che può attraversare l'attestamento con segnale al verde ed in presenza di coda continua.
- espresso in autovetture equivalenti per unità di tempo (Ae/s) o (Ae/h).

Il flusso di saturazione dipende dai molteplici fattori

Flusso di saturazione - 2



- numero di corsie;
- larghezza delle corsie
- composizione del flusso veicolare;
- pendenza della strada;
- presenza di parcheggio;
- presenza di fermate di autobus;
- localizzazione dell'incrocio nell'area urbana;
- modalità di utilizzo delle corsie disponibili;
- manovre di svolta a destra
- manovre di svolta a sinistra.

Flusso di saturazione - 3

$$S = S_0 \cdot n_c \cdot k_{\text{larg}} \cdot k_{\text{vp}} \cdot k_{\text{pend}} \cdot k_{\text{parc}} \cdot k_{\text{bus}} \cdot k_A \cdot k_{\text{ut}} \cdot k_{\text{dx}} \cdot k_{\text{sx}}$$

- s_0 flusso ideale di saturazione per corsia (1900 Ae/h)
- n_c è il numero di corsie
- k_{larg} effetto della larghezza delle corsie (base 3,60 m)
- k_{vp} presenza di veicoli pesanti
- k_{pend} effetto della pendenza
- k_{parc} presenza di parcheggio a lato della strada
- k_{bus} presenza di fermate dei bus
- k_A area in cui è collocata l'intersezione
- k_{ut} è il coefficiente di utilizzazione delle corsie
- k_{dx} effetto delle svolte a destra
- k_{sx} effetto delle svolte a sinistra

Durata del ciclo semaforico - 1

- Indichiamo con

- f_k flusso max. entrante nella fase k (Ae/sec)
- s_k Flusso di saturazione (Ae/sec)
- P Tempo perso totale (sec)
- v_k Verde efficace della fase k (sec)
- $y_k = f_k/s_k$ Rapporto dei flussi
- Il tempo perso totale può' essere espresso come

$$P = C_m - \sum_{k=1}^{nf} v_k$$

Durata del ciclo semaforico - 2

- imponendo l'uguaglianza fra volume entrante ed uscente

$$C_m \cdot f_k = v_k \cdot S_k$$

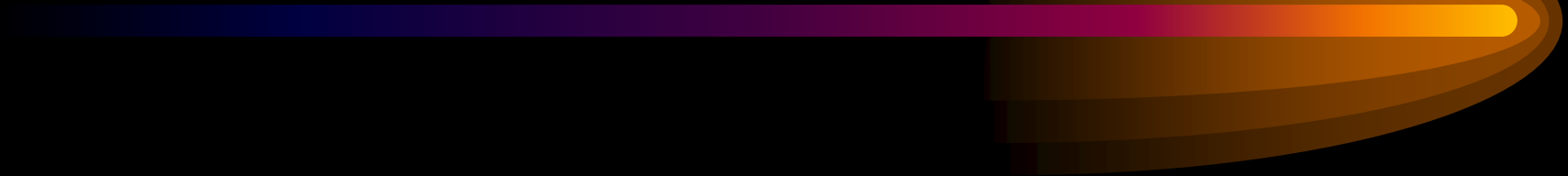
- si ottiene la durata del ciclo minimo:

$$C_m = \frac{P}{1 - Y}$$

- con

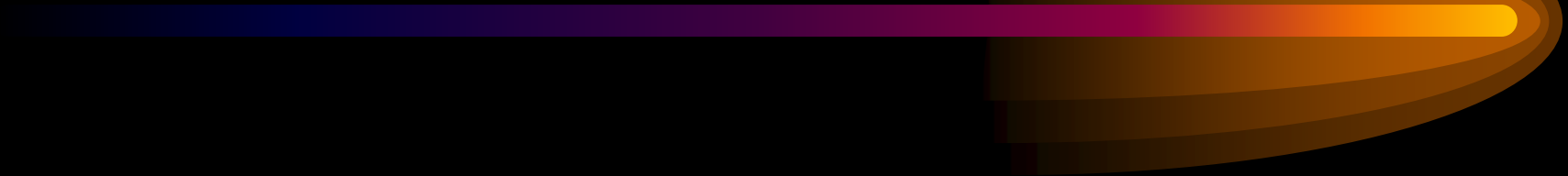
$$Y = \sum_{k=1}^{nf} y_k$$

Ciclo “ottimo”

A horizontal line with a gradient from dark blue to yellow, ending in a comet-like tail.

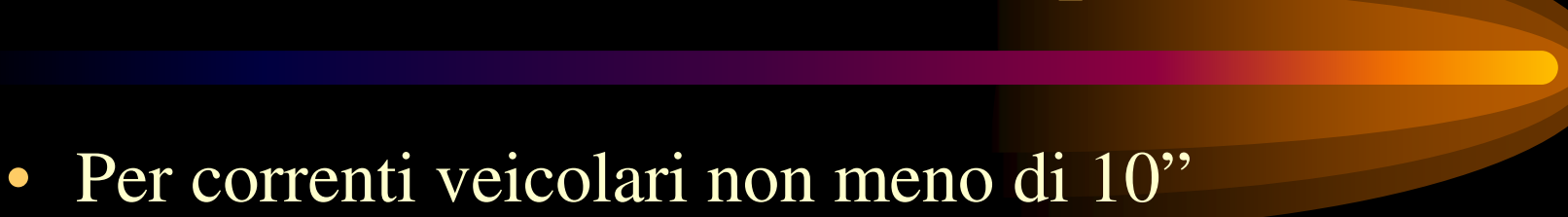
$$C_0 = \frac{1.5 \cdot P + 5}{1 - Y}$$

Tempi di verde -1



$$v_k = \frac{y_k}{Y} (C_o - P)$$

Durate minime dei tempi di verde



- Per correnti veicolari non meno di 10''
- Per correnti principali non meno di 15''
- Per flussi particolarmente bassi o in impianti attuati non meno di 5''
- Per mezzi pubblici, biciclette e pedoni non meno di 5''
- Per svolte a sinistra non meno di 10''
- Frecce direzionali per la svolta a sinistra protetta, non meno di 5''

Durata massima del rosso

- dipende da molteplici fattori
 - accettazione da parte di pedoni e di ciclisti;
 - disponibilità di spazi di accumulo per i veicoli in coda;
 - disponibilità di spazi per l'accumulo di pedoni e ciclisti;
 - ritardi per i mezzi pubblici.
- Per pedoni e ciclisti non superare la durata 60''
- Durata anche doppia per il traffico veicolare.

Anticipo del verde per conflitti

- L'inizio del verde per movimenti di pedoni o biciclette dovrebbe avvenire 1 o 2 secondi prima dell'arrivo di veicoli provenienti da manovre in conflitto
- Il calcolo va effettuato sulla base dei tempi necessari ad impegnare l'area di conflitto.

Ritardo dell'inizio del verde

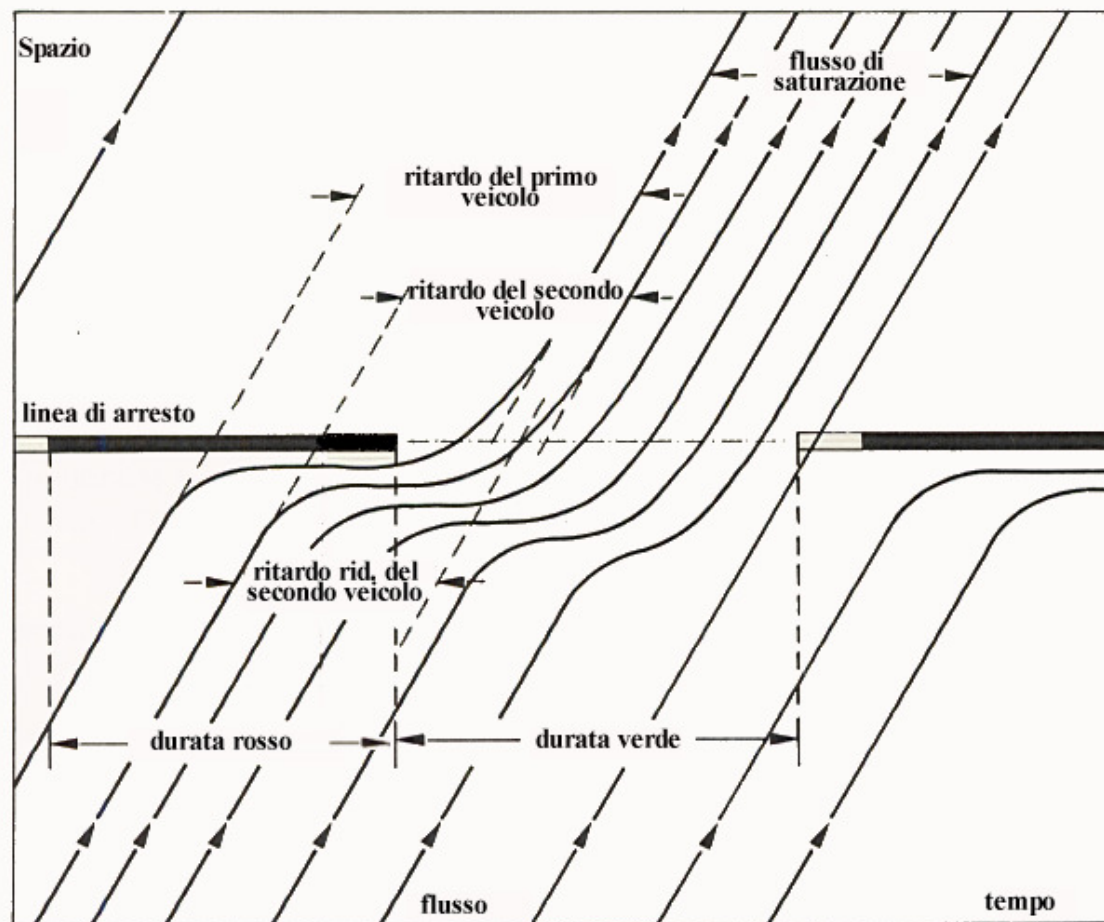
- I veicoli in svolta a sinistra non protetta che non possono eseguire la manovra per la presenza del traffico opposto devono poter liberare l'area d'incrocio senza rischi
- Se per i veicoli della fase successiva hanno difficoltà nel riconoscere la presenza dei veicoli in svolta, tale fase va ritardata di un intervallo di tempo di 2÷4 secondi in modo da garantire lo svuotamento della manovra di svolta.

Criteri di progetto



- Ritardi (definizione)
- Livello di servizio
- Code
- Numero di arresti
- Capacità

Ritardi (1)



Ritardi (2)

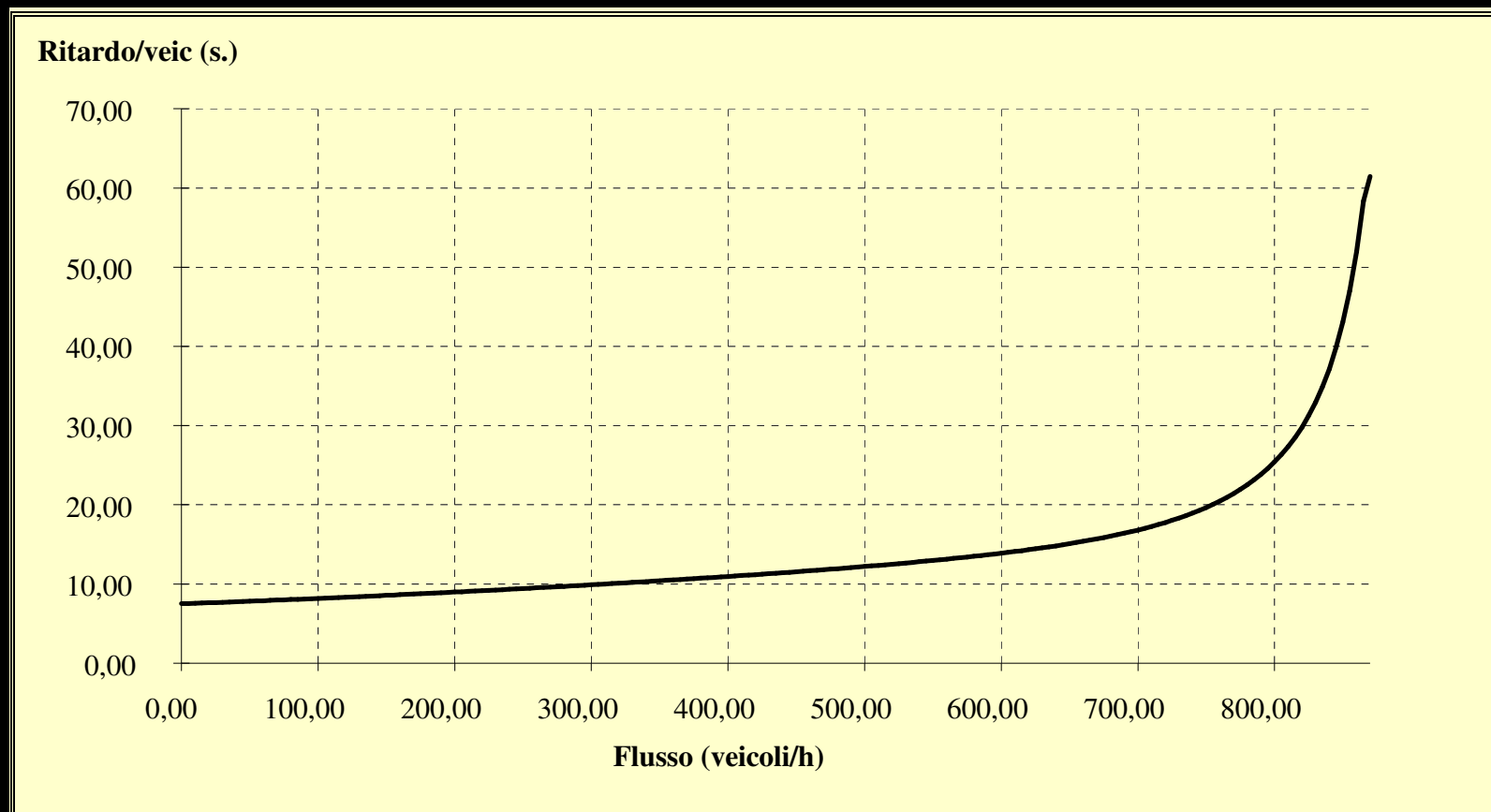
Formula di Webster (arrivi con distribuzione poissoniana):

$$r = \frac{C \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot f \cdot (1 - x)} - 0.65 \cdot \left(\frac{C}{f^2} \right)^{1/3} \cdot x^{(2+5 \cdot \lambda)}$$

r	ritardo (sec./veic.)
C	durata ciclo (secondi)
v	verde efficace (secondi)
s	flusso di saturazione (veic./sec.)
f	flusso entrante (veic./sec.)
$\lambda = v/C$	percentuale di verde
$x = f/(\lambda \cdot s)$	coefficiente di saturazione

Ritardi (3)

$C = 60''$, $v = 30''$, $s = 0.5$ veic./sec.



Livello di servizio

In termini di ritardo, che è legato a consumi, costo del tragitto, comfort, inquinamento...

LDS	RITARDO MEDIO PER VEICOLO [sec]
A	≤ 10.0
B	> 10.0 e ≤ 20.0
C	> 20.0 e ≤ 35.0
D	> 35.0 e ≤ 55.0
E	> 55.0 e ≤ 80.0
F	> 80.0

Lunghezza delle code

Il numero di veicoli in coda per corsia può essere calcolato con:

$$n_1 = f [(C-v)/2 + r]$$

oppure con la

$$n_2 = f (C-v)$$

Si considera quindi: $N_q = \max(n_1, n_2)$

(osservazione: N_q è il numero di veicoli in coda all'inizio del tempo di verde, ossia la massima coda nel ciclo)

La lunghezza della coda si ottiene infine considerando una lunghezza media per veicolo, ad esempio: $q = 5,6 \cdot N_q$

Webster: la formula sottostima i ritardi del 5-10% (aggiunge i veicoli alla coda solo al raggiungimento della linea di arresto).

ESEMPIO - Lunghezza di una coda

Dati:

$C=60''$ $g=30''$ $f=600 \text{ veic/h}$ $r=13,8 \text{ sec/veic}$

Si calcola: $n1=(600/3600) \cdot [(60-30)/2+13.8] = 4,8 \text{ veic}$

$n2=(600/3600) \cdot [60-30] = 5 \text{ veic}$

quindi si ha $Nq = 5 \text{ veic}$

Con una lunghezza media per veicolo di 5,6 m si determina la lunghezza della coda q :

$$q=5,6 \cdot 5=28 \text{ m}$$

Numero di arresti - 1

- Nel numero di arresti vengono conteggiati anche i veicoli che devono frenare ma non si fermano
- Se i veicoli in coda defluiscono nel verde vale la

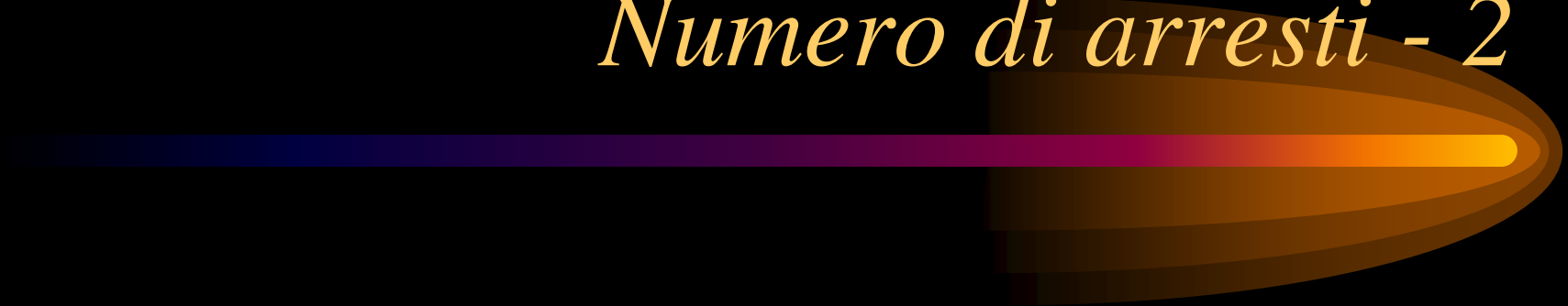
$$N_q / (s - f) < v$$

(s-f) è la “disponibilità” di capacità per lo smaltimento della coda durante il tempo di verde

e la percentuale del numero di arresti si calcola con la:

$$N_a \% = N_q / [f C (1 - f/s)] 100$$

Numero di arresti - 2



- Nel caso in cui invece sia

$$N_q / (s - f) > v$$

la percentuale si determina con la:

$$N_a \% = [N_q / (f C) + v/C] 100$$

ESEMPIO 1- Numero di arresti

Dati:

$$C=60'' \quad g=30'' \quad f=600 \text{ veic/h} \quad s=1800 \text{ veic/h}$$

Si calcola il numero dei veicoli in coda pari a $N_q = 5$ veic.

Poiché è

$$N_q/[s-f]=5/[(1800-600)/3600] = 15'' < g = 30''$$

si ha:

$$N_a = 5/[(600/3600) \cdot 60 \cdot (1-600/1800)] = 0,75$$

Cioè ogni veicolo ha un probabilità di fermarsi pari al 75%,
cioè per 10 veicoli in arrivo 7,5 dovranno fermarsi.

ESEMPIO 2- Numero di arresti

Dati:

$$C=60'' \quad g=22'' \quad r=28,5 \text{ sec/veic}$$

$$f=600 \text{ veic/h} \quad s=1800 \text{ veic/h}$$

Il numero dei veicoli in coda è $N_q = 8$ veic. Quindi;

$$N_q/[s-f]=8/[(1800-600)/3600] = 24'' > g = 22''$$

In questo caso è:

$$N_a = 8/[(600/3600) \cdot 60] + 22/60 = 1,17$$

Cioè tutti i veicoli subiranno un arresto e il 17% di questi sarà costretto a fermarsi una seconda volta.

Capacità



Un altro criterio per una regolazione ottimale è la massimizzazione della capacità

La massimizzazione della capacità delle intersezioni implica la massimizzazione della capacità della rete.

La capacità di un piano semaforico assegnato può essere calcolata determinando i flussi massimi che possono essere smaltiti da ciascun segnale nel suo tempo di verde, confrontandoli con i flussi effettivi. Il segnale per cui la differenza fra flusso massimo e flusso effettivo è minima rappresenta il segnale critico per tutta l'intersezione.