

Università degli Studi di Bologna

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

**Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile
Tesi di Laurea in Teoria e Tecnica della Circolazione LS**

**OTTIMIZZAZIONE DELLA FASATURA E
DISPOSITIVI DI CONTROLLO AUTOMATICO
DEL RISPETTO DEL ROSSO SEMAFORICO:
ANALISI DI UN'INTERSEZIONE ISOLATA
NEL COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO**

**TESI DI LAUREA DI:
ILARIA CRESCENTINI**

**RELATORE:
PROF. ING. LUCA MANTECCHINI**

**CORRELATORI:
ING. FRANCESCO MARIA CELLINI
DOTT. STEFANO BOLOGNESI**

Anno Accademico 2006 - 2007

PAROLE CHIAVE

Intersezioni semaforizzate

Traffico urbano

Livello di Servizio

Highway Capacity Software

Vista Red

SOMMARIO

INTRODUZIONE	6
1 LE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE	8
1.1 Cenni storici	8
1.2 Generalità	8
1.3 Il ciclo semaforico	9
1.4 Livello di servizio di intersezioni semaforizzate	12
1.4.1 Generalità	12
1.4.2 Highway Capacity Manual	18
1.4.3 Webster:	20
1.4.4 Doherty	22
1.4.5 Miller	23
1.4.6 Newel	23
1.5 Controllo semaforico	24
2 LA FASATURA DEGLI IMPIANTI SEMAFORICI	26
2.1 Generalità	26
2.2 Calcolo del ciclo semaforico	27
2.2.1 Metodo di Webster	27
2.2.2 Metodo SIGSET	29
2.2.3 Metodo dell'equisaturazione	30
2.2.4 Manuale HCM	32
2.2.5 HCS 33	
3 LA RETE VIARIA DI CASALECCHIO DI RENO: INQUADRAMENTO GENERALE	38
3.1 Viabilità nel Comune di Casalecchio di Reno	38
3.1.1 Premessa	38
3.1.2 Domanda di trasporto	41
3.1.3 Scenari futuri	42

3.2	Intersezioni semaforizzate	43
4	ANALISI DI UN'INTERSEZIONE SEMAFORIZZATA NEL COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO	46
4.1	Finalità dello studio	46
4.2	Stato attuale	47
4.2.1	Geometria	47
4.2.2	Dotazione impiantistica	49
4.2.3	Rilievi di traffico	50
4.2.4	Fasatura	59
4.3	Prospettive di ottimizzazione	63
4.3.1	Nuova fasatura	63
4.3.2	Risultati ottenuti e considerazioni	69
4.3.3	Centralina dinamica	71
5	CONTROLLO DEL ROSSO SEMAFORICO: IMPIANTO VISTA RED	88
5.1	Importanza dei dispositivi di controllo del rosso semaforico	88
5.2	Presentazione dei principali dispositivi in commercio	89
5.2.1	FTR 89	
5.2.2	TRAFFIPHOT	90
5.2.3	PHOTORED	91
5.2.4	T-RED	92
5.2.5	VISTA RED	92
5.3	Caratteristiche dell'impianto Vista Red	93
5.3.1	Generalità	93
5.3.2	Struttura del sistema	93
5.4	Utilizzo della tecnologia Vista Red nel comune di Casalecchio di Reno	96
5.5	Calcolo del tempo di giallo minimo	101
5.5.1	Premessa	101
5.5.2	Riferimenti normativi	102
5.5.3	Calcolo dei tempi di giallo	102

5.5.4	Tempo di reazione in accordo con le norme CNR	105
5.5.5	Tempo di reazione in accordo con il DM 05/11/2001	105
5.5.6	Considerazioni in merito ai diversi tempi di reazione	105
5.5.7	Ipotesi di attraversamento	106
CONCLUSIONI		108
BIBLIOGRAFIA		111

INTRODUZIONE

Nell'ambito della mobilità e del traffico urbano, gli impianti semaforici giocano un ruolo fondamentale nella regolazione delle intersezioni a raso, presentandosi come il modo più semplice di risolvere la problematica della regolazione delle precedenza con la separazione temporale delle correnti in conflitto, per garantire la sicurezza degli utenti della strada.

Negli ultimi decenni abbiamo assistito alla conversione di gran parte delle intersezioni a raso in area urbana in intersezioni a rotatoria, fenomeno largamente diffuso nel nostro paese anche se spesso non supportato dalle adeguate condizioni di flusso e geometriche. Se da una parte gli impianti semaforici presenti nelle nostre città stanno per questo motivo via via diminuendo, dall'altra ciò non ha impedito comunque lo sviluppo di tecnologie collegate alla regolazione semaforica e aventi diverse finalità,

I primi capitoli di questo elaborato saranno volti a comprendere aspetti ed elementi caratterizzanti un'intersezione semaforizzata, a partire da alcuni concetti teorici quali il calcolo del ciclo semaforico e del Livello di Servizio per questo genere di intersezioni.

A seguito di queste premesse di carattere teorico è stata affrontata l'analisi di un'intersezione semaforizzata presente nella rete viaria urbana del Comune di Casalecchio di Reno, in provincia di Bologna; questa è caratterizzata da traffico elevato, essendo posta su uno degli assi principali della città, ossia la via Porrettana, e presenta per gran parte della giornata condizioni di saturazione. Lo studio dell'attuale saturazione e le conoscenze teoriche precedentemente richiamate hanno costituito le basi per una nuova strategia di regolazione dell'intersezione, che prevede come punto centrale

il passaggio da un solo piano fisso in funzione in tutti gli orari e giorni dell'anno a nuove fasature da alternare nei diversi giorni e orari per meglio rispondere al traffico presente.

Infine, nell'ultima parte di questo lavoro di tesi, sarà approfondita una tematica strettamente connessa agli impianti semaforici e di grande attualità, ossia quella dei dispositivi automatici di controllo del rispetto del rosso semaforico. Dopo una breve panoramica sui principali impianti in commercio nel nostro paese ci si soffermerà su di uno in particolare, il Vista Red, utilizzato tra l'altro proprio nel comune di Casalecchio di Reno; ne verranno illustrati gli elementi principali e il funzionamento, riportando infine alcuni dati sulle infrazioni registrate a Casalecchio dall'installazione ad oggi.

1 LE INTERSEZIONI SEMAFORIZZATE

1.1 Cenni storici

Il primo esempio di impianto semaforico compare nel 1868 a Londra; fu sperimentato un semaforo con una lampada a gas di colore rosso e verde, che si rivelò però pericoloso a causa della presenza stessa del gas. Il primo semaforo elettrico, caratterizzato anch'esso dai colori rosso e verde, fu introdotto a Cleveland (Ohio) nel 1914 e funzionava a mano. A New York, quattro anni più tardi, furono installati i primi semafori con luci rosse, gialle e verdi, che vennero però brevettati per la prima volta solo nel 1923 da G. A. Morgan. I semafori automatici, dai quali derivano i nostri, comparvero a Londra nel 1925.

1.2 Generalità

Le intersezioni semaforizzate, realizzando la separazione temporale delle

correnti veicolari in conflitto all'intersezione, consentono di ottenere vantaggi quali il miglioramento della sicurezza e la riduzione delle code e dei tempi di attesa, in quanto l'impianto semaforico:

- favorisce un ordinato movimento delle correnti veicolari
- riduce la frequenza degli incidenti più lesivi (collisioni ortogonali)
- fornisce un'indicazione chiara e sicura ai guidatori e ai pedoni, evitando comportamenti scorretti
- permette un trattamento prioritario ad alcuni movimenti o veicoli, ad esempio ai veicoli di emergenza, di rappresentanza, di pubblica sicurezza
- consente a un flusso continuo di plotoni veicolari di muoversi a una data velocità, lungo una certa direttrice di scorrimento
- interrompe un traffico intenso a intervalli determinati consentendo ad altre correnti pedonali o veicolari di attraversare.

1.3 Il ciclo semaforico

Il ciclo semaforico (C) è la successione ordinata dei segnali verde (V), giallo (G), rosso (R) durante il quale tutte le correnti completano le manovre all'intersezione; è composto da due o più fasi, ossia frazioni del ciclo durante le quali i segnali per ogni gruppo di corsie restano fissi.

La durata del ciclo semaforico è data dalla somma:

$$C = V + I + R \quad [\text{sec}]$$

dove

V è il tempo di verde (periodo di tempo in cui il semaforo, per una certa corrente o gruppo di corsie, è posto al verde);

I è l'intervallo di cambio, cioè l'intervallo di tempo utile ai veicoli per sgomberare l'aria di incrocio e completare le manovre prima del cambio di fase. È a sua volta costituito dalla somma tra il tempo di giallo G e il tempo di tutto rosso ($AR - All Red$) durante il quale tutte le lanterne sono disposte al rosso;

R è il tempo di rosso (periodo di tempo in cui il semaforo, per una certa corrente o gruppo di corsie, è posto al rosso).

Un ciclo può altresì essere schematizzato come composto da due soli intervalli temporali:

- rosso effettivo (R_E): parte del ciclo semaforico durante la quale, nella stima del ritardo, si assume che nessun veicolo proveniente dal braccio esaminato attraversi l'intersezione;
- verde effettivo (V_E): parte rimanente del ciclo, durante la quale si suppone che i veicoli attraversino il braccio dell'intersezione con un tasso di flusso costante e pari a S , flusso di saturazione (massimo numero di veicoli che potrebbe transitare attraverso l'intersezione in condizioni di accesso saturo e in condizioni di segnale disposto al via libera per tutto il ciclo). La durata del ciclo sarà quindi pari alla somma di rosso effettivo e verde effettivo.

Come si può osservare in figura 1.1 la durata complessiva delle fasi di verde e di giallo ($V + G$) è pari alla durata della fase di verde effettivo se ad essa si aggiunge un intervallo di tempo perduto L (*lost time*), dato dalla somma dei perditempo in avviamento e sgombero ($l_A + l_S$).

Le relazioni che legano i tempi di verde, rosso, verde effettivo e rosso effettivo sono dunque le seguenti:

$$V + I = L + V_E$$

$$R + L = R_E$$

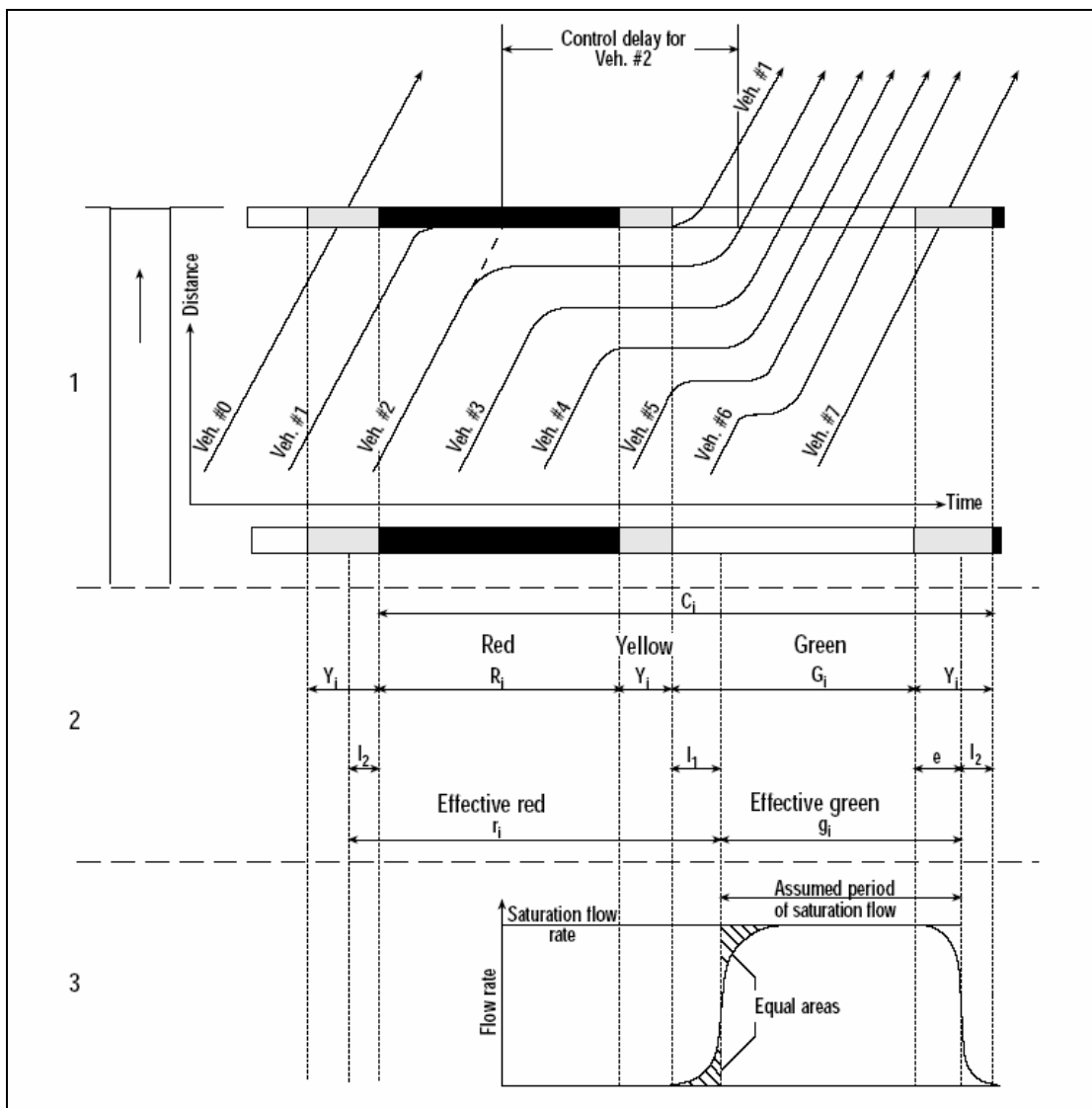


Fig. 1.1 – Diagramma spazio-tempo (1); diagramma delle fasi e dei tempi persi (2); andamento del flusso (3).

Si nota inoltre che nella fase iniziale, un istante dopo che il semaforo è passato al verde, i veicoli che si trovano in coda accelerano fino a raggiungere una determinata velocità. I distanziamenti temporali risultano abbastanza ampi e conseguentemente il tasso di flusso smaltito attraverso il braccio che riceve il verde è basso. Solo successivamente tali intervalli si riducono fino a stabilizzarsi su di un valore pressoché costante e il tasso di flusso raggiunge il valore di saturazione. Se, alla fine del tempo di verde, esiste ancora coda da smaltire, potrà esservi qualche veicolo che attraversa l'intersezione con segnale disposto al giallo e in questo caso il tasso di flusso risulta certamente inferiore al flusso di saturazione.

1.4 Livello di servizio di intersezioni semaforizzate

1.4.1 Generalità

Il Livello di Servizio (LOS, *Level Of Service*) di un generico tratto di strada è una misura delle condizioni operative della strada stessa e del funzionamento dell'insieme strada-veicolo, così come viene percepito dall'utente; rappresenta pertanto un indice che misura le condizioni di deflusso; per una intersezione viene calcolato in termini di ritardo medio per veicolo.

Il ritardo dipende da:

- progressione dei veicoli
- durata del ciclo (C) [sec]
- rapporto di verde (λ) $\lambda = \frac{V_E}{C}$
- saturazione

- grado di saturazione (x)

Il grado di saturazione x_i di un accesso i è dato dal rapporto tra flusso e capacità.

$$x_i = \left(\frac{v_p}{c} \right)_i$$

Il flusso di picco che si utilizza per l'analisi dell'intersezione e lo studio della saturazione è normalmente riferito al quarto d'ora più carico nell'ora di riferimento, ragguagliato ad ora; prende il nome di tasso di flusso (v_p) e si calcola come rapporto tra il flusso orario q e il fattore dell'ora di punta PHF (*peak hour factor*), coefficiente di ragguaglio.

$$v_p = \frac{q}{\text{PHF}} \text{ [veic/h]}$$

La capacità c_i di un accesso è il prodotto tra S_i , flusso di saturazione, e rapporto di verde effettivo (λ_i):

$$c_i = S_i \left(\frac{V_E}{C} \right) = S_i \lambda_i \text{ [veic/h]}$$

Dalle precedenti relazioni si ottiene:

$$x_i = \left(\frac{v_p}{c} \right)_i = \frac{v_{pi}}{S_i \frac{V_{Ei}}{C}} = \frac{v_{pi} \cdot C}{S_i \cdot V_{Ei}} = \frac{y_i}{\lambda_i}$$

in cui y_i rappresenta il rapporto di saturazione, ossia il rapporto tra flusso e flusso di saturazione.

Per quanto riguarda il calcolo del flusso di saturazione si riporta la formulazione fornita dal manuale HCM (*Highway Capacity Manual*), che calcola S come prodotto di un valore ideale S_0 per una serie di coefficienti correttivi.

$$S = S_0 \cdot N \cdot f_{HV} \cdot f_{lw} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \text{ [veic/h]}$$

dove

f_{HV} è il coefficiente correttivo per la presenza di veicoli pesanti

f_{lw} per la larghezza delle corsie

f_g per la pendenza dell'accesso

f_p presenza di sosta a lato strada

f_{bb} presenza di fermate d'autobus

f_a tipo di area urbana

f_{LT} svolta a sinistra

f_{RT} svolta a destra.

N è il numero di corsie del gruppo; nello studio di intersezioni semaforizzate infatti si fa generalmente riferimento non alla singola corsia bensì al gruppo di corsie, definito come l'insieme delle correnti di un

accesso che compiono almeno una manovra in comune e che hanno lo stesso tempo di attesa.

Generalmente si assume per ogni corsia un valore di S_0 pari a 1900 veic/h, che si ottiene ipotizzando che il distanziamento temporale tra due veicoli successivi che si ha allo scattare del verde si stabilizzi su un valore costante d_t pari a 1,8 secondi.

Il manuale HCM individua sei differenti livelli di servizio in funzione del valore del ritardo medio d (*delay*) a veicolo, secondo la tabella sottostante:

LIVELLO DI SERVIZIO	RITARDO [sec/veic]
A	≤ 10
B	$10 < d \leq 20$
C	$20 < d \leq 35$
D	$35 < d \leq 55$
E	$55 < d \leq 80$
F	> 80

Le caratteristiche dei diversi livelli di servizio sono le seguenti:

LOS A:

- progressione estremamente favorevole
- la maggior parte dei veicoli arriva durante il verde

- la maggior parte dei veicoli non subisce arresto
- i conducenti sono poco influenzati dalla presenza del semaforo

LOS B:

- buona progressione e breve durata del ciclo
- più veicoli subiscono interruzioni rispetto al livello di servizio A

LOS C:

- progressione peggiore, ciclo più lungo
- possono cominciare a comparire locali difetti di ciclo e/o fasatura in caso di variazioni del flusso
- numero di veicoli arrestato più elevato (ancora molti comunque riescono ad attraversare l'intersezione senza arrestarsi)

LOS D:

- l'influenza della congestione comincia a diventare evidente
- maggiore ritardo (progressione sfavorevole, ciclo più lungo, alti valori del rapporto q/c)
- molti veicoli arrestati (la quota di veicoli che riescono ad attraversare senza essere arrestati decresce fortemente)

LOS E:

- limite di accettabilità del ritardo
- pessima progressione, durata del ciclo al limite, elevati valori q/c prossimi a 1
- frequenti sovrasaturazioni

LOS F:

- situazione inaccettabile
- ci si trova in condizioni di sovrasaturazione e il ritardo tende ad aumentare indefinitamente: si verifica quando il flusso in arrivo eccede, per brevi periodi o stabilmente, la capacità
- rapporto $q/c > 1$

La procedura riportata dal manuale HCM per il calcolo del livello di servizio è sintetizzata dallo schema a blocchi in figura.

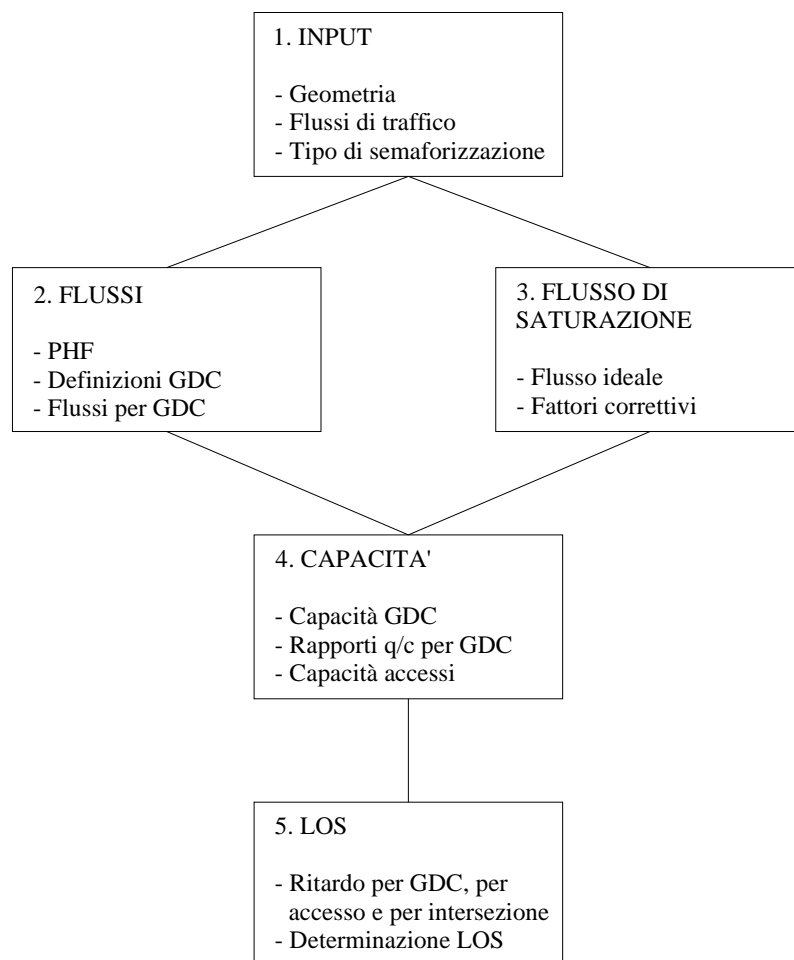


Fig. 1.2 – Schema della procedura HCM per il calcolo del livello di servizio.

Di seguito si riporta la formulazione del manuale HCM per il calcolo del ritardo (blocco 5).

1.4.2 Highway Capacity Manual

La formula empirica fornita dal manuale HCM viene utilizzata in caso di accesso sovrasaturo, quando cioè $x \geq 1$; finché permane questa condizione (generalmente per periodi di tempo limitati e inferiori ai 30 minuti) si ha accumulo continuo di veicoli in coda, che vengono poi smaltiti nei periodi successivi in cui si torna ad avere $x < 1$.

Il manuale HCM individua tre componenti del ritardo:

$$d = PF \cdot d_1 + d_2 + d_3 \text{ [sec]}$$

Il primo termine è dato dal prodotto del ritardo uniforme d_1 per PF (*progression factor*), fattore che dipende dalla progressione dei veicoli, quindi dalla presenza o meno di coordinamento, e dal tipo di controllo. Ipotizzando flusso uniforme e stabile, senza coda iniziale, d_1 si calcola come:

$$d_1 = \frac{0,5(1-\lambda)^2}{1 - [\min(1, x)\lambda]} \text{ [sec]}$$

PF si ricava noti i valori di f_{pA} , fattore correttivo tabulato in funzione delle diverse tipologie di arrivo, e P, percentuale di veicoli che arrivano col verde, data dal prodotto del rapporto di plotone R_p (tabulato) per il rapporto di verde λ :

$$PF = \frac{(1-P)f_{PA}}{1-\lambda}$$

Il termine del ritardo incrementale d_2 si calcola:

$$d_2 = 900T \left[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8kIx}{cT}} \right] \text{ [sec]}$$

dove

T è la durata del periodo di analisi [h]

k è un fattore che tiene conto del tipo di controllo

I è un fattore che tiene conto degli effetti del coordinamento:

$I = 0,91 \cdot x_u^{2,68}$, in cui x_u è il grado di saturazione dell'intersezione di monte (*upstream*).

Il termine d_3 , infine, rappresenta il ritardo dovuto alla presenza di una coda iniziale, o residua, cioè precedente all'inizio del periodo di analisi.

Ipotizzando $d_3 = 0$ la formulazione HCM ci fornisce quindi la seguente espressione per il calcolo del ritardo:

$$d = \frac{0,5(1-\lambda)^2}{1 - [\min(1, x)\lambda]} PF + 900T \left[x-1 + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8kIx}{cT}} \right] \text{ [sec]}$$

Occorre però ricordare che esistono in letteratura numerose diverse formulazioni per il calcolo del ritardo di intersezioni semaforizzate; si riportano le principali:

1.4.3 Webster:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} - 0,65 \left(\frac{c}{q^2} \right)^{1/3} x^{(2+5x)} \text{ [sec]}$$

Il terzo termine della precedente espressione risulta valere circa il 10% del ritardo complessivo; per questo motivo la formula può essere scritta:

$$d = \frac{9}{10} \left[\frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2q(1-x)} \right] \text{ [sec]}$$

Il primo termine della formula di Webster viene indicato come ritardo uniforme (*uniform delay*) e si ricava facilmente osservando su un grafico l'arrivo dei veicoli a un'intersezione semaforizzata, con l'ipotesi di accesso sottosaturo e tasso di arrivi costante.

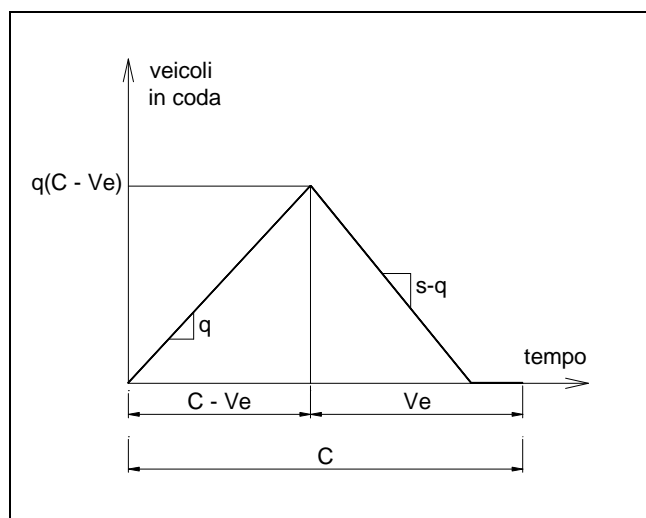


Fig. 1.3 – Andamento dei veicoli ad una intersezione nel caso di accesso sottosaturo.

Al termine di un ciclo C il tempo di attesa sarà pari all'area sottesa dal grafico in figura 1.3, cioè:

$$\frac{1}{2}q(C-V_E)\left[C-V_E+\frac{q(C-V_E)}{S-C}\right]=\frac{q(C-V_E)^2}{2}\cdot\frac{1}{1-\lambda_x}$$

Si ottiene il ritardo uniforme dividendo l'espressione precedente per il prodotto $q\cdot C$, che indica il numero di veicoli che arrivano durante C :

$$d_u = \left[\frac{q(C-V_E)^2}{2}\cdot\frac{1}{1-\lambda_x}\right]\cdot\frac{1}{qC} = \frac{C}{2}\frac{\left(1-\frac{V_E}{C}\right)^2}{1-\lambda_x} = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda_x)} \text{ [sec]}$$

Il secondo termine della formula di Webster deriva invece dalla teoria delle code; prende il nome di ritardo incrementale o stocastico (*incremental delay*) e si ricava considerando gli arrivi poissoniani (intertempi distribuiti secondo legge esponenziale negativa) e il tasso di servizio costante (ciclo e fasatura sono costanti) pari a λS .

Le caratteristiche sopra descritte identificano una coda, secondo la notazione di Kendall, del tipo M/D/1; la prima lettera è riferita alla distribuzione degli intertempi in arrivo (M è la distribuzione esponenziale, o catena Markoviana), la seconda indica il tipo di distribuzione dei tempi di servizio (D è una distribuzione costante, o degenera) e il numero 1 è il numero dei serventi. Per una coda di tipo M/D/1 il tempo medio di attesa in coda è pari a:

$$\frac{1}{2} \frac{\rho^2}{\lambda(1-\rho)}$$

dove ρ è il tasso di servizio dato dal rapporto tra tasso medio degli arrivi (λ) e delle partenze. Con le dovute sostituzioni si ottiene:

$$d_i = \frac{1}{2} \frac{\left(\frac{q}{\lambda S}\right)^2}{q\left(1 - \frac{q}{\lambda S}\right)} = \frac{1}{2} \frac{x^2}{q(1-x)} \text{ [sec]}$$

1.4.4 Doherty

$$d = \frac{1}{2} C(1-\lambda)^2 + \frac{K}{\lambda S} \frac{x}{(\lambda-x)} \text{ [sec]}$$

K è un fattore che dipende dal tipo di arrivo dei veicoli all'intersezione; per $K = 0,5$ il secondo termine, ossia *l'incremental delay*, per le formule di Webster e di Doherty coincidono.

La formula di Doherty, così come quella di Webster, è stata elaborata per accessi sottosaturi, per i quali generalmente $x \leq 0,6$; quando si ha $0,95 \leq x \leq 1$ si considera l'approssimazione lineare della formula di Doherty:

$$d = d(x = 0,95) - \frac{209}{\lambda S} + \frac{220}{\lambda S} x \text{ [sec]}$$

la quale però, come è stato dimostrato, comporta una sovrastima del ritardo.

1.4.5 Miller

L'espressione di Miller è:

$$d = \frac{1-\lambda}{2(1-\lambda x)} \left[C(1-\lambda) + \frac{(2x-1)I}{q(1-x)} + \frac{I+\lambda x-1}{S} \right] \text{ [sec]}$$

dove

$$I = \frac{\text{varianza numeri di arrivi per ciclo}}{\text{numero medio di arrivi per ciclo}}$$

e rappresenta il coefficiente di variazione degli arrivi. Quando $I \approx 1$ i valori di ritardo sono molto simili a quelli ottenibili dalla formula di Webster; per $I > 1$ la formula di Miller fornisce valori superiori ma comunque in accordo con i valori misurati.

1.4.6 Newell

La formula di Newell, ottenuta essenzialmente per via teorica, calcola il tempo di ritardo come:

$$d = \frac{C(1-\lambda)^2}{2(1-\lambda x)} + \frac{IH(\mu)x}{2q(1-x)} + \frac{I(1-\lambda)}{2S(1-\lambda x)} \text{ [sec]}$$

in cui

$$\mu = \frac{SV_E - qC}{\sqrt{ISV_E}}$$

rappresenta una misura adimensionale della capacità del braccio;

$H(\mu)$ è una particolare funzione decrescente per la quale risulta $H(0) = 1$ e $H(1) = 0,25$.

1.5 Controllo semaforico

Il controllo semaforico può essere a ciclo fisso o attuato dal traffico.

Nel primo caso ciclo e fasatura sono predeterminati sulla base di certi valori di domanda; questo tipo di controllo consiste infatti in una regolare sequenza di indicazioni segnaletiche ripetute, modificabile entro certi limiti per mutevoli esigenze di circolazione, ma sempre in base a un programma prefissato di funzionamento.

In presenza di un impianto attuato la struttura delle fasi è variabile sulla base dei flussi di traffico in arrivo, rilevati da detector, quali ad esempio spie ad induzione. È possibile individuare diversi tipi di attuazione per incroci isolati:

- attuazione parziale, in cui viene modificata solo la fase di una delle correnti, senza modificare le altre (ciclo variabile)
- semiattuazione, in cui si rilevano flussi su una sola direzione, ma si modificano tutte le fasi
- attuazione totale, in cui si rilevano tutti i flussi e si modificano tutte le fasi.

Gli obiettivi dell'attuazione sono quelli di favorire le correnti principali, incrementare la velocità media e consentire la gestione di itinerari preferenziali per veicoli pubblici e mezzi di soccorso. Si ricorre a impianti di tipo attuato quando l'intersezione è caratterizzata da forti variazioni dei flussi di traffico nel corso della giornata e irregolarità nell'arrivo dei veicoli.

Un impianto elementare di attuazione è rappresentato in figura 1.4:

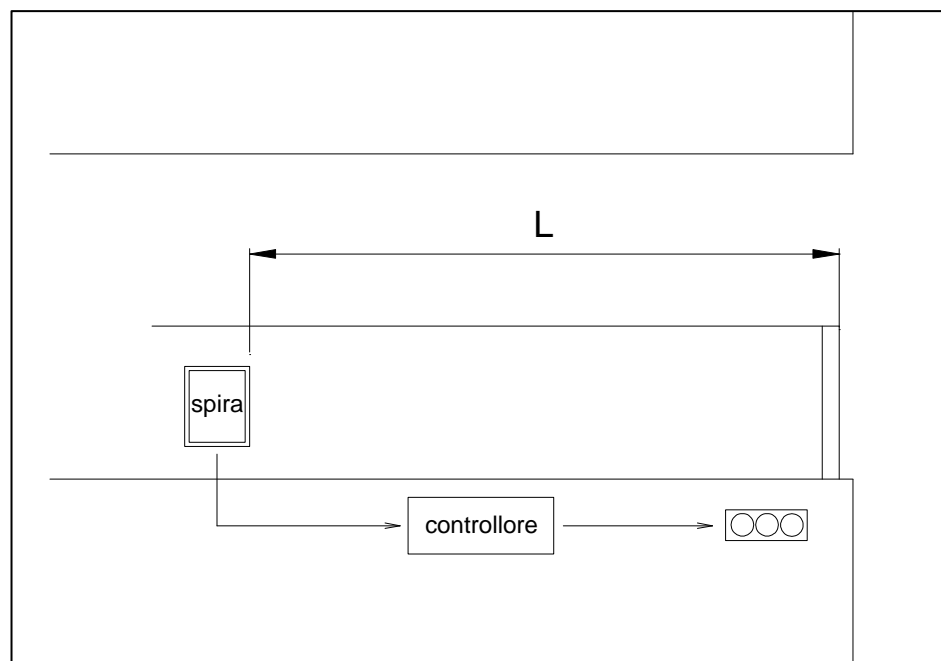


Fig. 1.4 – Schema di un impianto elementare di attuazione.

Se allo scadere del tempo di verde minimo V_{\min} la spira non rileva alcun veicolo il segnale si dispone al rosso; se viene rilevato un veicolo il controllore dispone un incremento di verde pari a ΔV :

$$\Delta V = \frac{L}{v_{\text{media}}}$$

fino al raggiungimento di un limite V_{\max} prefissato.

2 LA FASATURA DEGLI IMPIANTI SEMAFORICI

2.1 Generalità

Nella progettazione del funzionamento di un impianto semaforico - noti la geometria dell'intersezione, le manovre, i gruppi di corsie e l'entità dei flussi - le variabili da definire sono le seguenti:

- Durata del ciclo (C)
- Numero, composizione e sequenza delle fasi
- Tempi di giallo e tutto rosso

Si può procedere fissando a priori il numero e la composizione delle fasi e calcolando i tempi di verde e di ciclo attraverso l'ottimizzazione di alcuni parametri, ad esempio ricercando il minimo ritardo, la massima capacità o la minima durata del ciclo.

I dati necessari per procedere nella progettazione sono la geometria dell'intersezione, le manovre e i relativi gruppi di corsie, l'entità dei flussi.

Per quanto riguarda la definizione del numero delle fasi occorre tenere presente che, sebbene il numero ideale sia quello minimo, ossia 2, è necessario considerare l'entità

dei flussi in conflitto; nel caso di svolte a sinistra elevate è bene prevedere, qualora la geometria dell'intersezione lo consenta, piani di 3 o 4 fasi con corsie di svolta protetta.

2.2 Calcolo del ciclo semaforico

2.2.1 Metodo di Webster

Il metodo di Webster è volto a ricercare il ciclo ottimo, ossia quello che minimizza il ritardo totale all'intersezione; le sommatorie che compaiono nell'espressione seguente sono estese alle correnti per le quali è massimo il rapporto q_i/S_i (correnti critiche).

$$C_w = \frac{1,5 \cdot \sum_i l_i + 5}{1 - \sum_i \frac{q_i}{S_i}} \text{ [sec]}$$

Poiché C_w è il valore di C che minimizza il ritardo all'intersezione risulta, di conseguenza, che per una data condizione di traffico ipotizzare un ciclo diverso da quello ottimo significa causare un aumento del ritardo. Ciò va a smentire l'idea spesso diffusa che l'aumento della durata del ciclo semaforico sia sempre un miglioramento in termini di livello di servizio di una intersezione.

Il grafico riportato in figura 2.1 aiuta a chiarire questo aspetto; esso riporta in ordinata il ritardo medio per veicolo [sec] e in ascissa la durata complessiva del ciclo [sec]. Le diverse curve tracciate sono relative a diverse condizioni di traffico: ad ognuna di esse corrisponde un valore del flusso complessivo entrante nell'intersezione [veic/h].

Essendo C_0 il minimo della funzione ogni variazione della durata del ciclo da quel valore comporta un aumento del ritardo; in particolare si osserva un incremento più

rapido, quindi un repentino peggioramento del livello di servizio dell'intersezione, per valori di $C < C_0$.

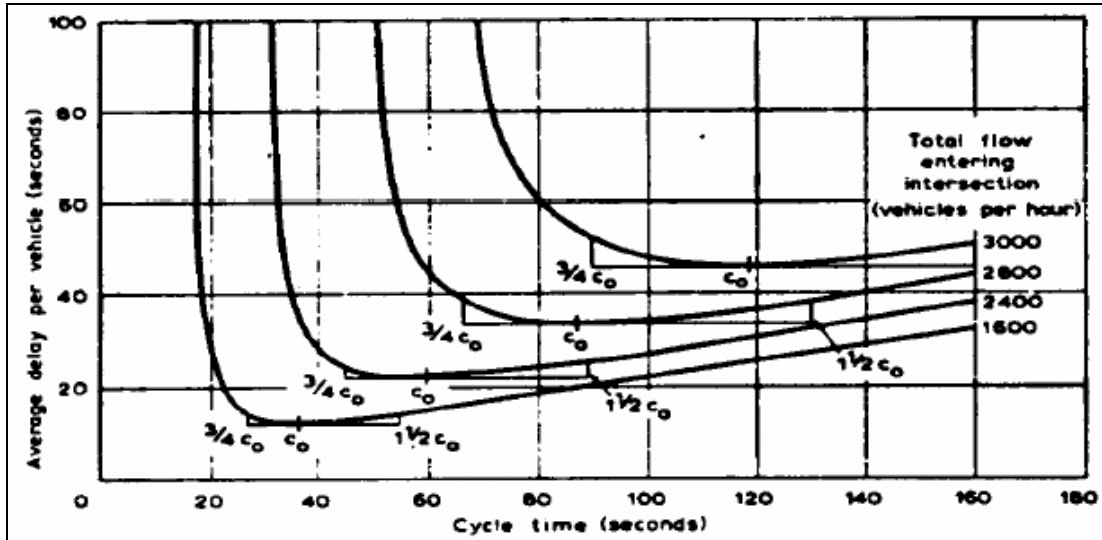


Fig 2.1 – Effetto sul ritardo della variazione della lunghezza del ciclo

Una volta calcolata la durata complessiva del ciclo si ricavano i tempi di verde di ogni fase ipotizzando che questi si distribuiscano in proporzione ai rapporti di saturazione massimi; il verde così ottenuto sarà quello che consente di smaltire la coda massima in ogni accesso.

$$V_{Ei} = \frac{\frac{q_i}{S_i}}{\sum_i \frac{q_i}{S_i}} \cdot \left(C - \sum_i l_i \right) \text{ [sec]}$$

Una volta calcolato il verde effettivo si ottengono i valori di verde e rosso reali, fissati per dritempo e intervalli di cambio, secondo le espressioni riportate al paragrafo 1.3.

Qualora sia presente all'intersezione anche un attraversamento pedonale occorre verificare che il tempo di verde ottenuto per il flusso veicolare sia superiore al verde pedonale, che vale:

$$V_{ped} = (4 \div 7) + \frac{L}{v_{ped}} [\text{sec}]$$

dove

L è la lunghezza dell'attraversamento, in metri

v_{ped} è la velocità dei pedoni $\approx 1 \div 2$ m/sec.

2.2.2 Metodo SIGSET

È un metodo che persegue la minimizzazione del ritardo complessivo, a prescindere dalle condizioni di saturazione di ogni accesso; si procede ipotizzando un ciclo a due fasi i e j e di durata complessiva C. Si ricavano le durate minime dei tempi di verde efficace imponendo le condizioni di sottosaturazione:

$$q_i C < S_i V_{Ei} \Rightarrow V_{Ei} > y_i C$$

$$q_j C < S_j V_{Ej} \Rightarrow V_{Ej} > y_j C$$

Nota o fissata la durata complessiva del ciclo e imponendo un certo valore del perditempo L si ottiene anche un limite massimo per V_{Ei} , V_{Ej} :

$$V_{Ei} < C - V_{Ej} - L$$

$$V_{Ej} < C - V_{Ei} - L$$

Occorre a questo punto risolvere il seguente problema di ottimizzazione:

$$\text{MIN}(W_{\text{tot}}) = \text{MIN} \left\{ \sum_k W_k (V_{Ek}) q_k \right\}$$

Si ricorre a un metodo di calcolo iterativo determinando i tempi di V_E che minimizzano il ritardo W_{tot} , procedendo a step di 1 secondo.

I vincoli da rispettare, una volta fissati la durata del ciclo e del tempo perso L sono quindi:

- | | |
|------------------------------|------------------------------|
| 1) $V_{Ei} > y_i C$ | 4) $V_{Ej} < C - V_{Ei} - L$ |
| 2) $V_{Ej} > y_j C$ | 5) $V_{Ei} < C - V_{Ej} - L$ |
| 3) $V_{Ei} < C - V_{Ej} - L$ | 6) $V_{Ei} + V_{Ej} + L = C$ |

2.2.3 Metodo dell'equisaturazione

Il metodo dell'equisaturazione persegue lo scopo di ricercare il ciclo minimo C_{min} , pari al tempo necessario per smaltire tutti i veicoli in arrivo da ciascuno dei rami in condizioni di sottosaturazione.

C_{min} si ottiene imponendo che per ogni accesso i la portata in arrivo durante il ciclo ($q_i C$) sia uguale alla portata massima che è possibile smaltire ($S_i V_E$).

$$q_i C = S_i V_E \Rightarrow \sum_i V_E = \sum_i \frac{q_i}{S_i} \cdot C$$

$$\text{Essendo} \quad C - \sum_i l_i = \sum_i \frac{q_i}{S_i} \cdot C$$

$$\text{Si ottiene} \quad \sum_i V_{Ei} = C - \sum_i l_i$$

Dalle espressioni precedenti si ricava la formula per il calcolo del ciclo minimo attraverso il metodo dell'equisaturazione:

$$C = \frac{\sum_i l_i}{1 - \sum_i \frac{q_i}{S_i}} \text{ [sec]}$$

Anche in questo caso le sommatorie sono estese a quei gruppi di corsie critici per ogni fase, cioè quelli che in ogni fase presentano il massimo valore del rapporto q_i/S_i .

Occorre rilevare il fatto che tale metodo, così come i precedenti, nasce per la regolazione di intersezioni sottosature, per le quali fornisce soluzioni soddisfacenti.

Attualmente, poiché è sempre più frequente trovarsi a regolare intersezioni in condizioni di sovrasaturazione, le vecchie formule deterministiche sono viste come punti di partenza per procedimenti iterativi di ottimizzazioni sempre più diffusi grazie alle moderne tecnologie e agli strumenti di calcolo.

Nel paragrafo successivo si riporta ad esempio la formulazione HCM che prevede una formula analoga alle precedenti solo come primo step di un procedimento più complesso.

2.2.4 Manuale HCM

L'espressione proposta dall' Highway Capacity Manual, da applicare una volta stabiliti numero delle fasi e loro durata, è la seguente:

$$C = \frac{Lx_c}{\left[x_c - \sum_i \left(\frac{q}{S} \right)_{ci} \right]}$$

Si fa quindi riferimento al rapporto critico flusso/capacità (x_c).

Il valore ottenuto dalla formulazione precedente risulta essere un punto di partenza per un algoritmo di ottimizzazione del ciclo.

2.2.5 HCS

L'HCS 2000 (*Highway Capacity Software*), sviluppato dal *Mc Trans Centre* dell'Università della Florida, è un programma dedicato alla verifica di intersezioni o di particolari tratti di strada mediante il calcolo dei principali indicatori di performance per l'elemento in analisi; per fare questo il software implementa le procedure definite dal manuale HCM.



Fig. 2.2 –Schermata iniziale di HCS.

Una volta lanciato il programma la schermata che appare (Fig. 2.2) contiene le icone dei diversi moduli presenti nel software; ciascuno di essi è dedicato ad un diverso contesto di circolazione stradale, tra cui:

- *Freeways* (autostrade)
- *Multilane* (strade a più corsie per senso di marcia)
- *Two-lane* (strade a due corsie e doppio senso di marcia)
- *Signals* (intersezioni semaforizzate)
- *Unsignalas* (intersezioni non semaforizzate)

La parte del software dedicata alle intersezioni semaforizzate (*signals*) consente, dopo avere inserito una serie di dati relativi all'intersezione, di calcolare il livello di servizio, sia quello relativo ad ogni accesso che quello complessivo dell'intersezione.

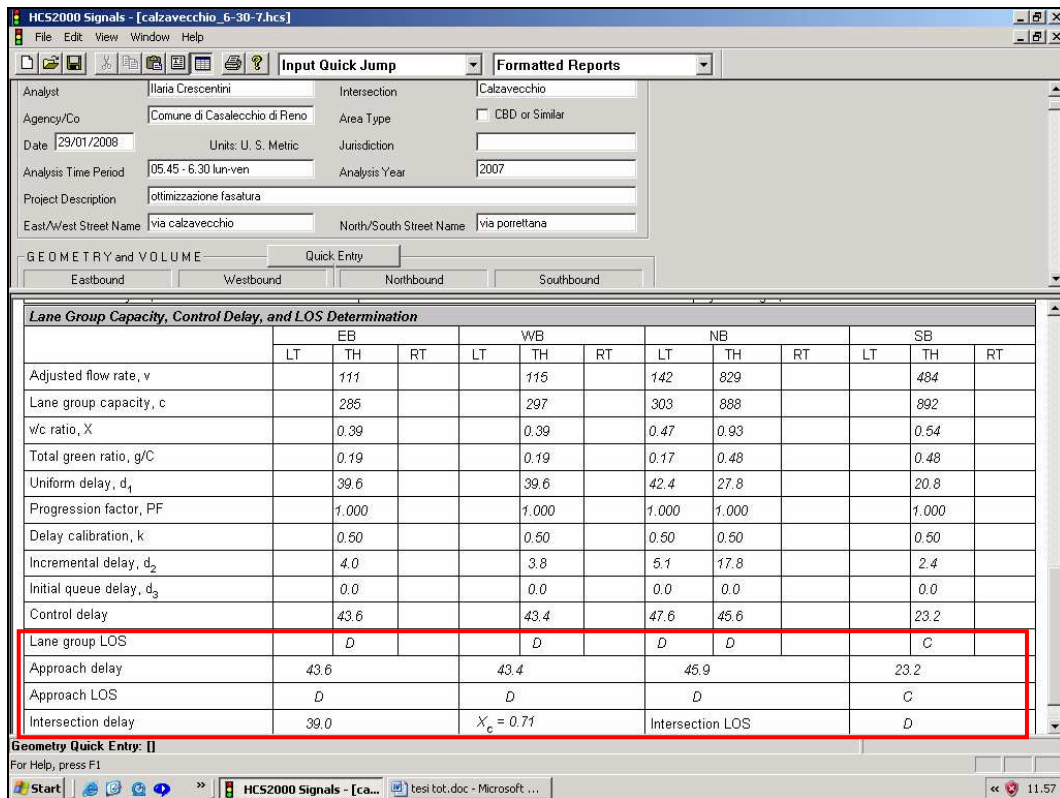


Fig. 2.3 – LOS dei singoli accessi e dell'intersezione

Come si osserva in Fig. 2.4 la schermata è divisa in due parti: in quella superiore si inseriscono i dati di input e in quella inferiore è possibile visualizzare il report che il programma fornisce come output.

HCS2000 Signals - [calzavecchio_6-30-7.hcs]

File Edit View Window Help

Input Quick Jump Formatted Reports

SIGNALIZED INTERSECTIONS OPERATIONAL ANALYSIS

Analyst: Intersection:
 Agency/Co: Area Type: CBD or Similar
 Date: Units: U. S. Metric Jurisdiction:
 Analysis Time Period: Analysis Year:
 Project Description:
 East/West Street Name: North/South Street Name:

G E O M E T R Y and V O L U M E Quick Entry

Eastbound Westbound Northbound Southbound

Left Thru Right Left Thru Right Left Thru Right Left Thru Right

Number of Lanes and Usage

HCS2000™ DETAILED REPORT

General Information				Site Information					
Analyst	Ilaria Crescentini			Intersection	Calzavecchio				
Agency or Co.	Comune di Casalecchio di Reno			Area Type	All other areas				
Date Performed	29/01/2008			Jurisdiction					
Time Period	05.45 - 6.30 lun-ven			Analysis Year	2007				
Project ID				Project ID	ottimizzazione fasatura				

	EB			WB			NB		
	LT	TH	RT	LT	TH	RT	LT	TH	RT
Number of lanes, N_i	0	1	0	0	1	0	1	1	0
Lane group		LTR			LTR		L	TR	
Volume, V (vph)	45	15	40	40	20	44	128	640	106

Geometry Quick Entry: []
For Help, press F1

Fig. 2.4 – Schermata di HCS 2000 Signals

I primi dati da inserire sono quelli relativi alla geometria dell'intersezione e ai volumi di traffico presenti; per facilitare il corretto inserimento dei dati è possibile, selezionando il bottone *Quick Entry*, accedere a una finestra che consente di visualizzare una rappresentazione schematica dell'intersezione e delle diverse manovre con i relativi flussi.

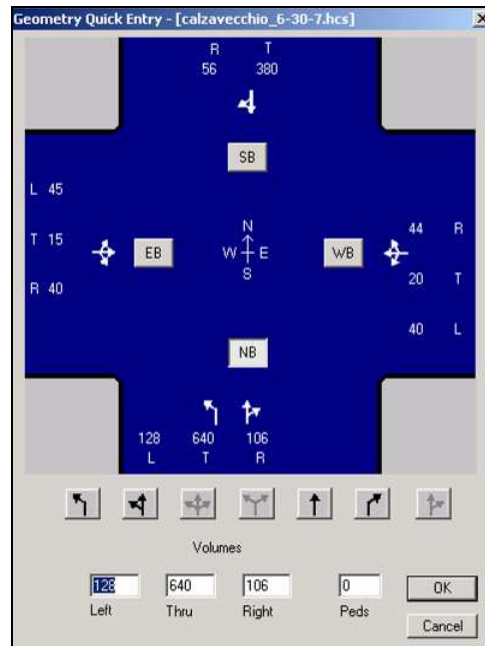


Fig. 2.5 – Geometry Quick Entry

Si procede poi inserendo gli altri dati richiesti, tra i quali c'è anche la fasatura dell'impianto; una volta inserita è possibile però, selezionando il pulsante *Estimation/Optimization*, richiedere al programma di cercare, attraverso un certo numero di iterazioni, di trovare la fasatura ottima per l'intersezione. Occorre comunque stabilire alcuni vincoli per la nuova fasatura, come ad esempio la durata minima e massima del ciclo.

Al termine dei processi computazionali il programma mostra la fasatura che ha calcolato e la assume come dato di input su cui calcolare il livello di servizio.

È in questo senso che l'HCS può essere considerato uno strumento di supporto per l'ottimizzazione delle fasature semaforiche.

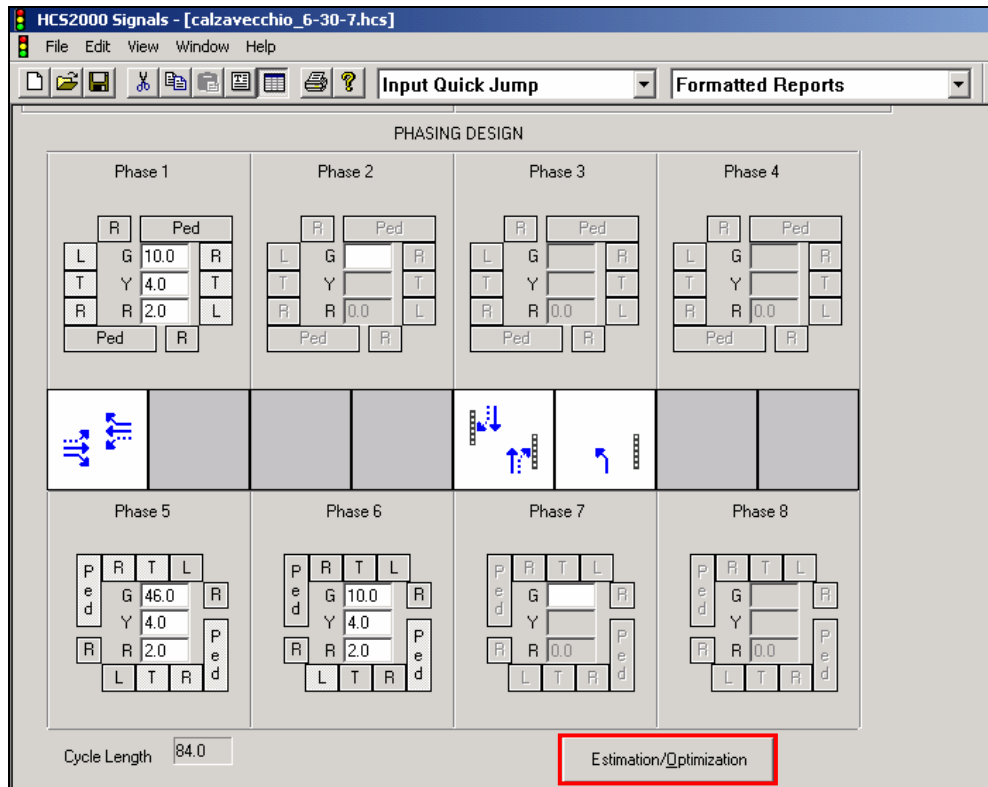


Fig. 2.6 – Phasing Design

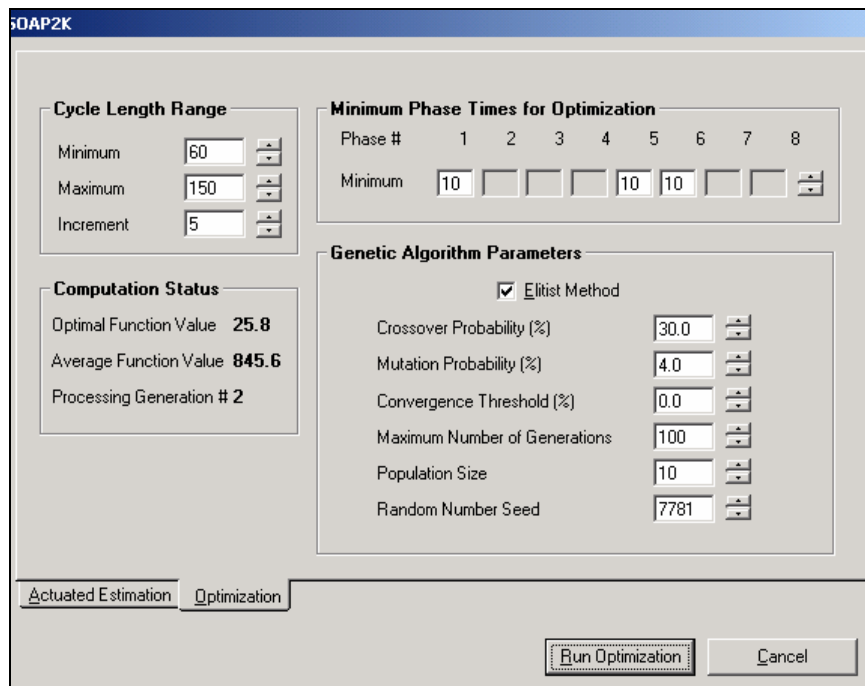


Fig. 2.7 – Ottimizzazione della fasatura

3 LA RETE VIARIA DI CASALECCHIO DI RENO: INQUADRAMENTO GENERALE

3.1 Viabilità nel Comune di Casalecchio di Reno

3.1.1 Premessa

Il Comune di Casalecchio di Reno, situato a sud-ovest della città di Bologna, è un nodo stradale importante all'interno della rete autostradale nazionale, in particolare dell'autostrada A1 Milano-Napoli, ed è, inoltre, punto di origine della Tangenziale di Bologna.

La rete viaria di Casalecchio di Reno, oltre a rispondere alla domanda di mobilità generata dagli spostamenti all'interno dello stesso territorio comunale e a quella dovuta alla presenza di alcuni importanti centri commerciali di livello sovracomunale, è sottoposta ad elevati flussi di traffico di attraversamento dovuti alla contiguità con il capoluogo provinciale e al ruolo di via principale di collegamento con la valle del Reno.



Fig. 3.1 – Il territorio comunale di Casalecchio di Reno

Uno degli assi più critici, in termini di congestione stradale, della rete viaria di Casalecchio è rappresentato dalla via Porrettana, che collega la città al Comune limitrofo di Sasso Marconi.

Si riporta in Figura 3.2 una schermata del software di macrosimulazione VISUM riportante il grado di saturazione dell'intera rete stradale comunale; si osserva che la via Porrettana è sempre caratterizzata da valori di saturazione superiori al 60%.

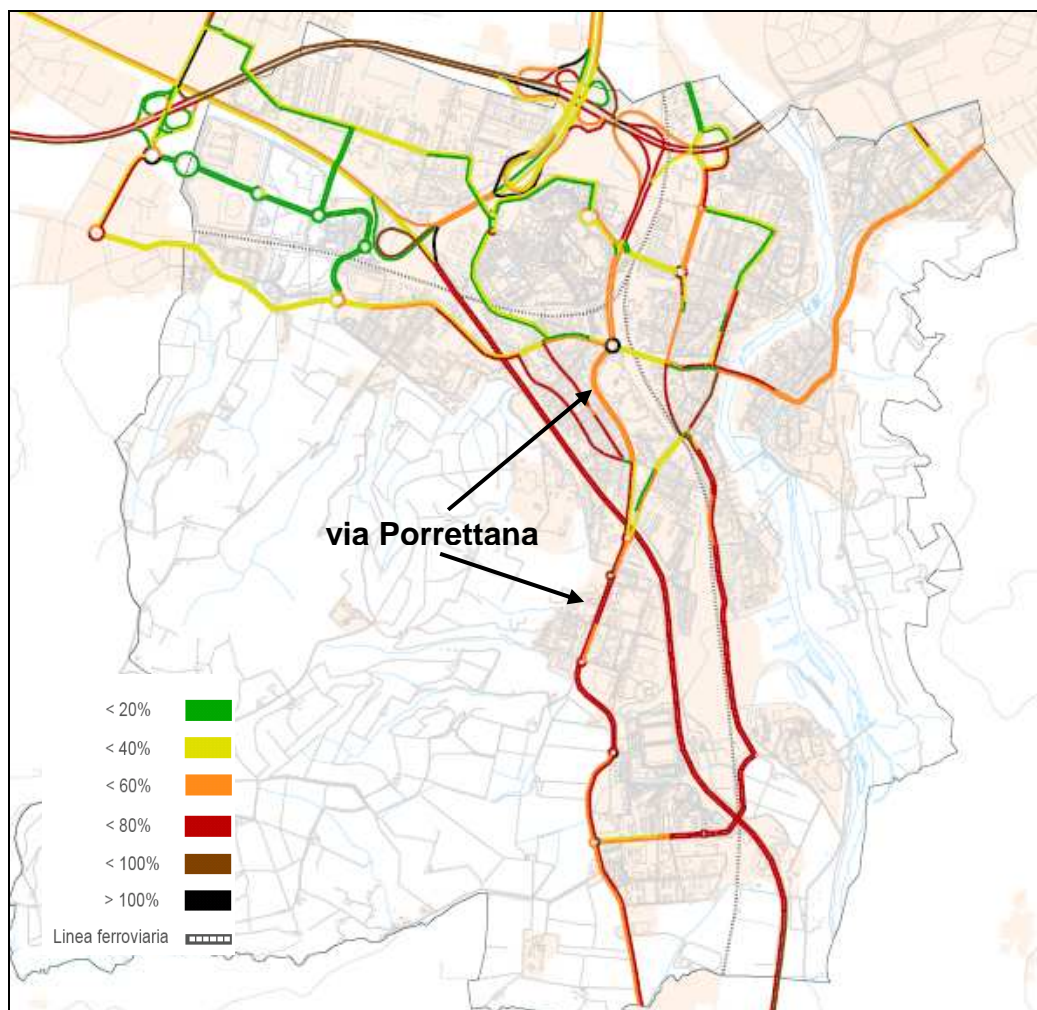


Fig. 3.2 - Grado di saturazione della rete viaria di Casalecchio di Reno

3.1.2 Domanda di trasporto

La domanda di trasporto è rappresentata nella seguente tavola, nella quale è riportata, per ogni ramo stradale, una barra di spessore proporzionale all'entità del flusso che lo interessa.

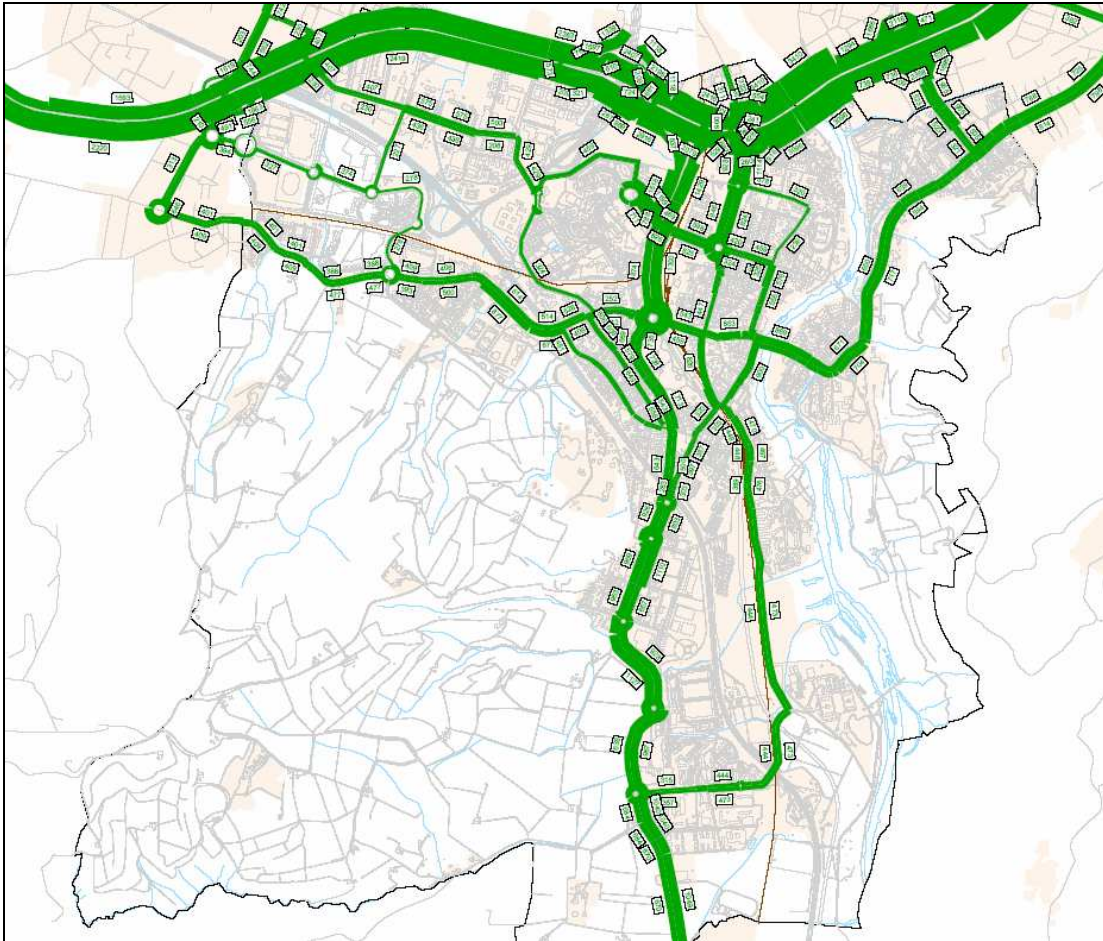


Fig. 3.3 - Flussogramma della rete viaria di Casalecchio di Reno

In Fig. 3.4 si mette in evidenza il traffico di via Porrettana riportando un dettaglio della precedente tavola.

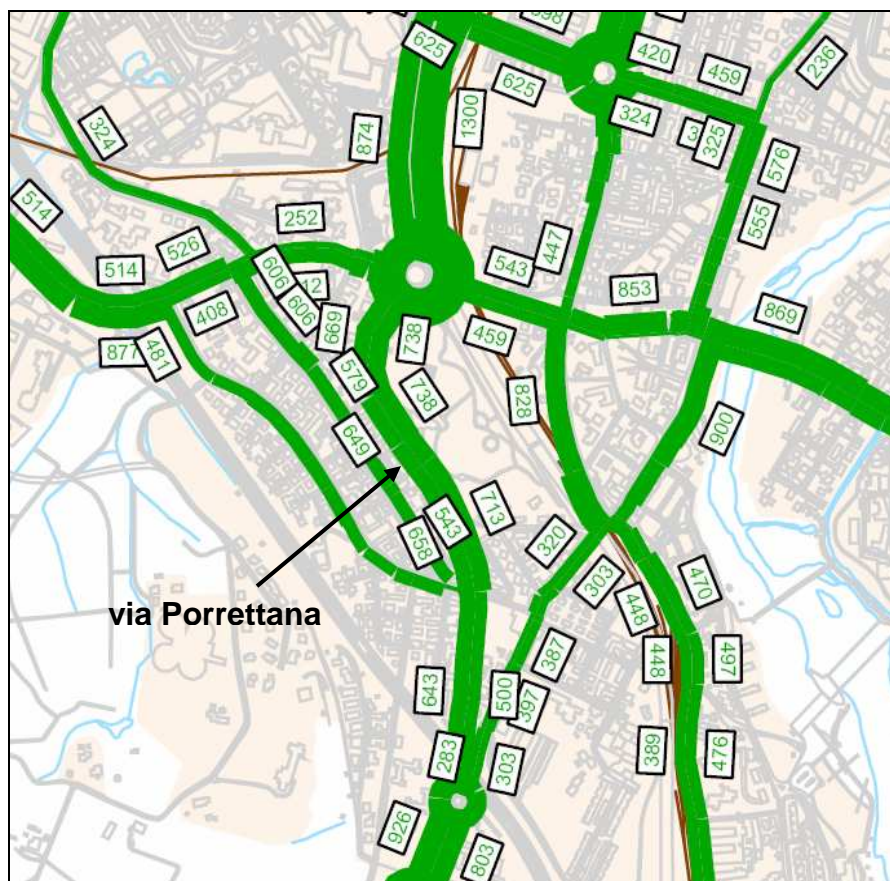


Fig. 3.4 - Flussogramma della rete viaria di Casalecchio di Reno, dettaglio

3.1.3 Scenari futuri

L'intervento che porterà alla circolazione urbana il più grande beneficio è la realizzazione della "nuova Porrettana", ossia di una variante della S.S. 64 (Porrettana) che interesserà il comune di Casalecchio per un tratto di circa 4 km, a partire dagli svincoli di autostrada e tangenziale, posti a nord della città, fino al confine con il Comune di Sasso Marconi. Nell'attraversamento di Casalecchio il progetto prevede la realizzazione di tratti in galleria, per superare intersezioni già critiche senza doverle attraversare; in questo modo la nuova strada assorbirà il traffico di attraversamento, lasciando sull'attuale via Porrettana i soli movimenti dovuti alla domanda interna.

Attualmente però i soli tratti realizzati sono lo svincolo Meridiana-Casalecchio Centro eseguito da ANAS tra il 1999 e il 2001 e il tratto del Comune di Sasso Marconi

iniziato nel 2002 che si è concluso alla fine della primavera 2007 ed è attualmente in attesa dei collaudi e della presa in carico da parte di ANAS. È ancora da realizzare tutto il tratto che interessa il territorio di Casalecchio; gli elevati costi che comporta questo progetto rimangono attualmente il principale ostacolo all'inizio dei lavori.

3.2 Intersezioni semaforizzate

Nel Comune di Casalecchio di Reno sono presenti 15 intersezioni semaforizzate; queste sono individuate nella cartina riportata in figura 3.5, rappresentativa dell'intera rete comunale.

Gli impianti di queste intersezioni sono quasi tutti regolati da una centralina di tipo S400, che consente al semaforo di funzionare con un solo piano fisso o di alternare due o più piani, precedentemente fissati, in determinate fasce orarie o nei diversi giorni della settimana o dell'anno.

Un unico impianto, ossia quello all'incrocio tra via Piave e via Porrettana (numero 1 in figura), è regolato da una centralina moderna, di tipo Hydra che, come verrà successivamente illustrato, è in grado di ottimizzare la fasatura dell'impianto per rispondere in tempo reale ai flussi che interessano l'intersezione.

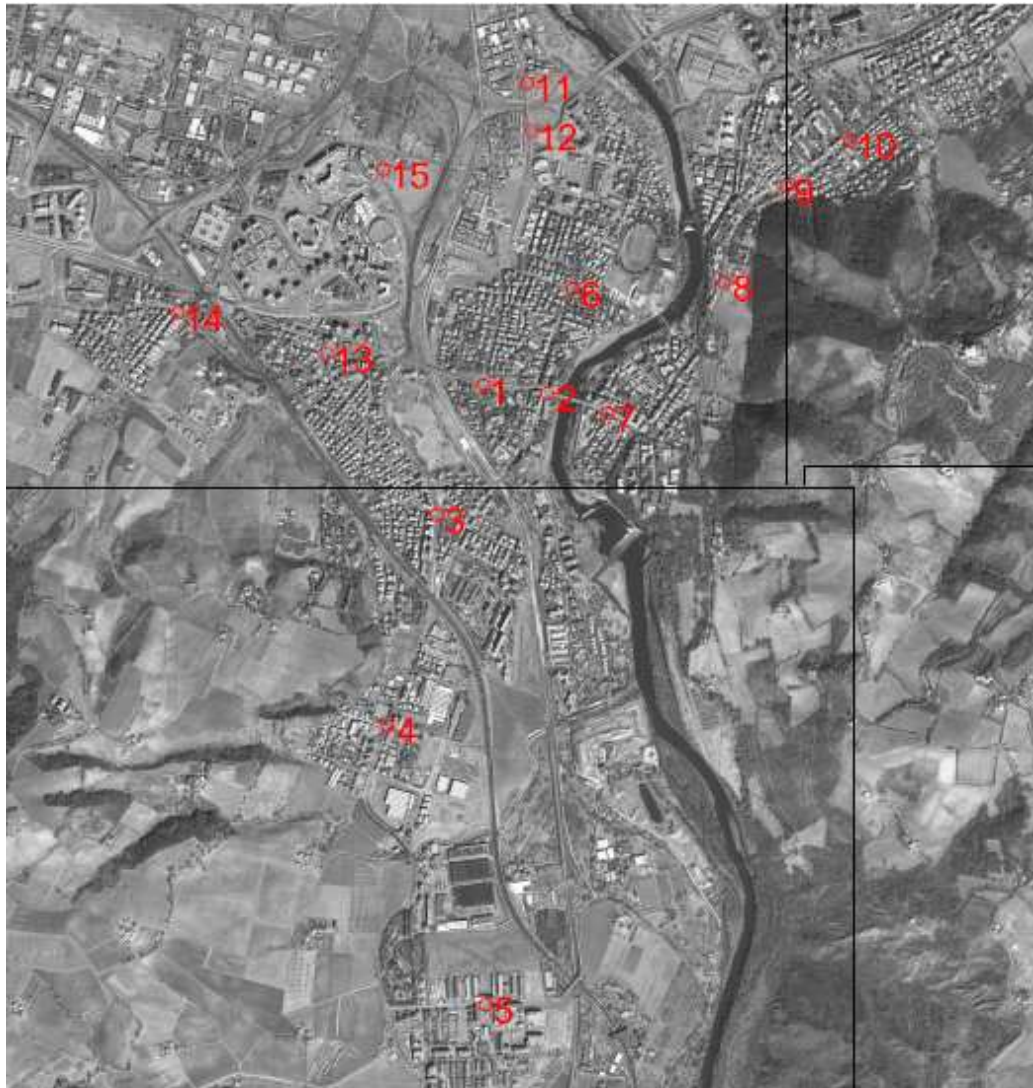


Fig. 3.5 – Intersezioni semaforizzate nel Comune di Casalecchio di Reno

Le intersezioni indicate nell'immagine di Fig. 3.4 sono le seguenti:

- 1 - Porrettana - Piave
- 2 - Porrettana - Marconi
- 3 - Porrettana - Calzavecchio
- 4 - Porrettana - Michelangelo
- 5 - Micca - Caduti di Cefalonia

- 6 - Garibaldi - Mille
- 7 - Porrettana - Giordani
- 8 - Porrettana - Villa Chiara
- 9 - Porrettana - Tunisi
- 10 - Porrettana - Caravaggio - Carracci
- 11 - Brigata Bolero - Tangenziale dir.Zola
- 12 - Brigata Bolero - Tangenziale dir.Bologna
- 13 - Bazzanese - Lavoro
- 14 - Bazzanese - Boccherini
- 15 - Isonzo

4 ANALISI DI UN'INTERSEZIONE SEMAFORIZZATA NEL COMUNE DI CASALECCHIO DI RENO

4.1 Finalità dello studio

L'intersezione semaforica scelta come oggetto di studio è quella tra via Porrettana e via Calzavecchio; lo scopo dell'analisi è quello di ricercare una nuova fasatura che consenta di migliorare le condizioni di deflusso, spesso critiche, degli accessi.

Tale operazione di ottimizzazione dell'impianto richiede però una conoscenza dello stato attuale dell'intersezione secondo diversi aspetti, quali la geometria, i dati di traffico, la dotazione impiantistica e la fasatura attuale. Una volta raccolti questi dati sarà possibile procedere alla ideazione di un'ipotesi progettuale migliorativa.

4.2 Stato attuale

4.2.1 Geometria

Le informazioni relative alla geometria dell'intersezione si ricavano da foto e rilievi topografici e satellitari.



(a)



(b)

Fig. 4.1 – Accesso di Via Porrettana in direzione Bologna (a) e in direzione Sasso Marconi (b)



Fig. 4.2 – Rilievo satellitare

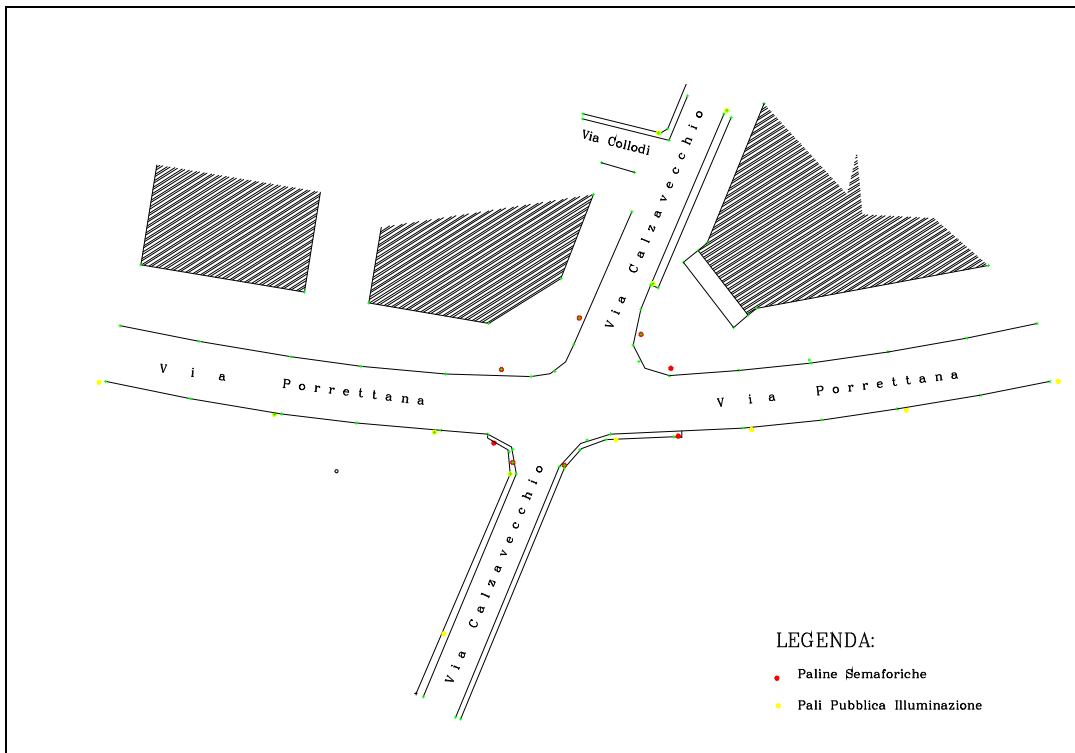


Fig. 4.3 – Rilievo topografico

4.2.2 Dotazione impiantistica

In Figura 4.4 è riportato uno schema dell'intersezione, nel quale sono state individuate tutte le lanterne semaforiche; ognuna di esse è indicata con un numero. Nel caso di lanterne pedonali, si utilizza il numero utilizzato per quella veicolare installata sullo stesso palo aggiungendo la lettera "p".

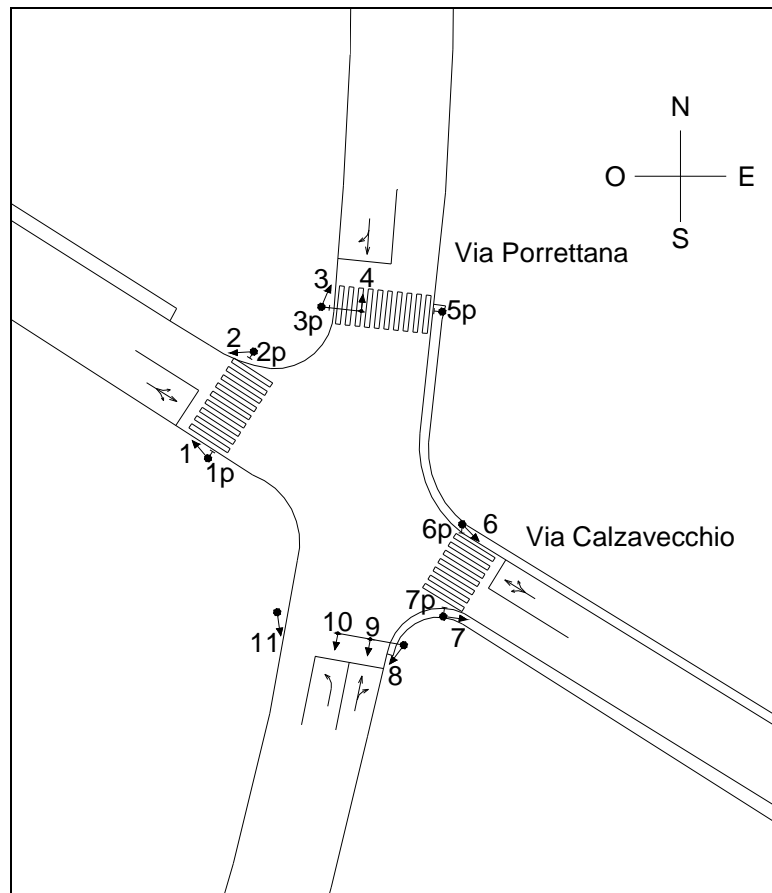


Fig. 4.4 – Schema paline semaforiche

L'impianto in esame è regolato da una centralina di tipo S400, ovvero funzionante a piani statici per selezione oraria; possono essere infatti definite anche diverse fasature (o piani), occorre però indicare i giorni e gli orari in cui queste devono entrare in funzione impostando una tabella di selezione oraria (Figura 4.5).

Numero tabella	Attivazione
1	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve Sa Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Sett Ott Nov Dic . Ora: 5:45, Piano: 1
2	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve Sa Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Sett Ott Nov Dic . Ora: 2:00, Piano: 0

Fig. 4.5 – Tabella di selezione oraria

4.2.3 Rilievi di traffico

Grazie alla presenza di spire contaveicoli in corrispondenza degli accessi è possibile ricevere, direttamente su un computer collegato via GSM con l'impianto di rilevamento, a intervalli di tempo regolari, i dati di traffico relativi ai diversi rami.

Tali dati sono poi in forma tabulare (convertibile in un file Excel) dal software *ATC for Hydra*, dedicato alla gestione delle informazioni fornite; è stato possibile elaborarli per ricavare informazioni utili ai fini del nostro lavoro, quali le velocità medie dei veicoli in arrivo all'intersezione e la composizione delle correnti, dividendo il flusso in quattro categorie in funzione della lunghezza L dei veicoli:

- 1) $L < 5$ m
- 2) 5 m $< L < 8$ m
- 3) 8 m $< L < 12$ m
- 4) $L > 12$ m

Si riportano ad esempio i valori dei flussi per una giornata tipo (giovedì 17 gennaio) relativi all'accesso di via Porrettana in direzione Sud (verso Sasso Marconi) sia come tabella di Excel sia in forma grafica.

Gli stessi dati possono essere di più facile lettura se riportati in forma grafica, come in Fig. 4.6.

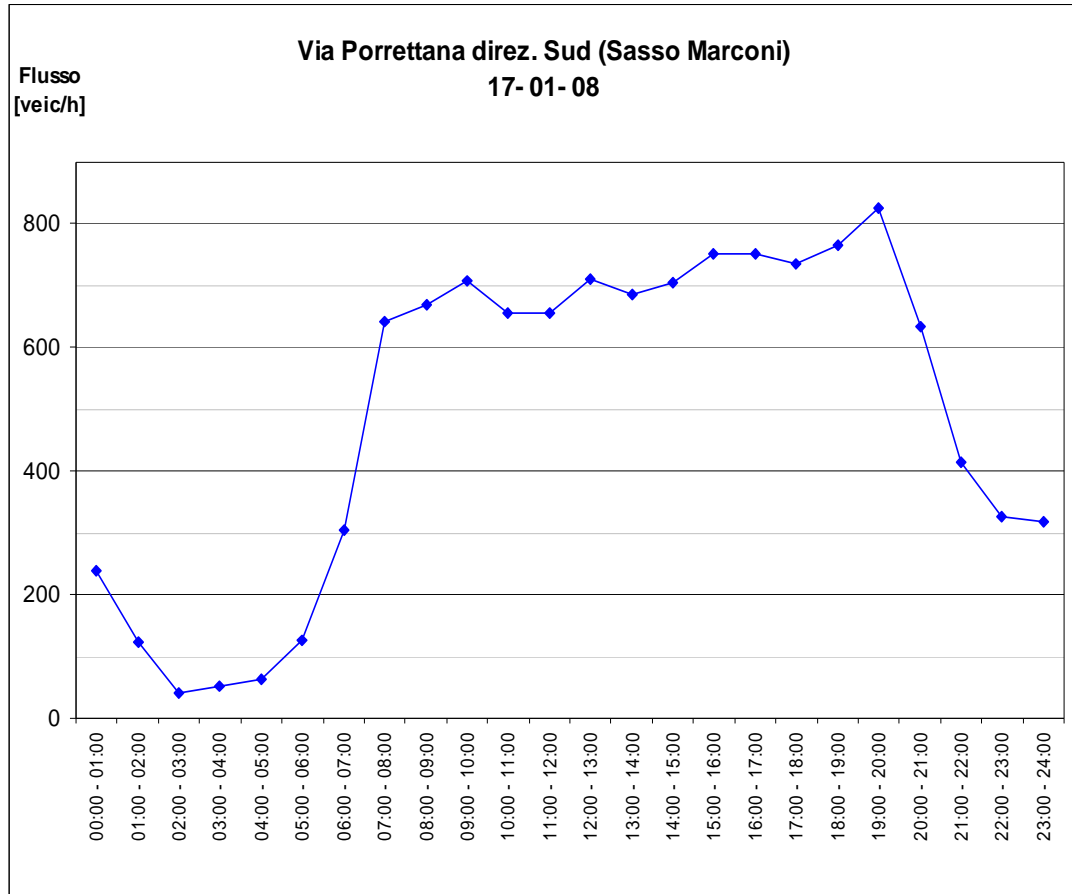


Fig. 4.6: Andamento giornaliero dei flussi [via Porrettana direzione Sasso Marconi]

Per meglio comprendere l'andamento giornaliero del traffico all'intersezione si elaborano i dati forniti dalle spire considerando prima separatamente le due direzioni principali N-S (Via Porrettana) e E-O (Via Calzavecchio) e riportando successivamente il grafico dei flussi dell'intera intersezione.

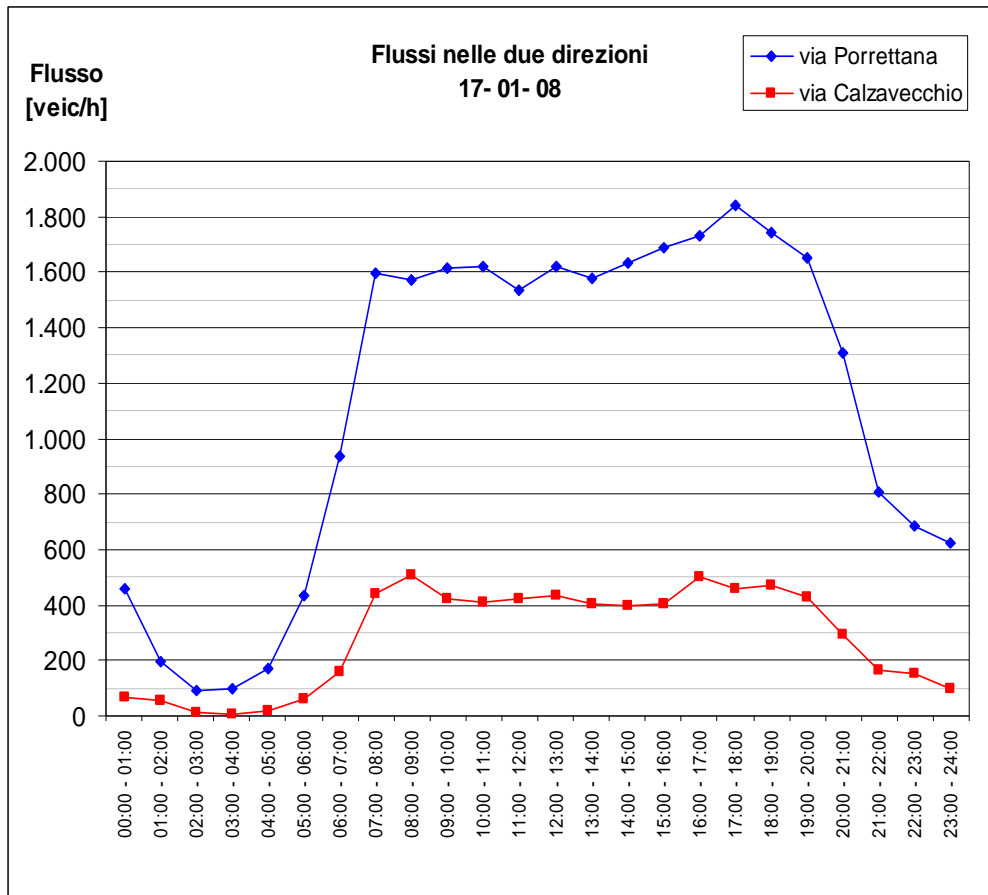


Fig. 4.7: Andamento giornaliero dei flussi nelle due direzioni

I due grafici precedenti, anche se forniscono dati ancora parziali rispetto all'intera intersezione, sono però già sufficienti per evidenziare l'evidente peculiarità dell'incrocio in esame. Questo non presenta infatti i tipici picchi del mattino e della sera, ma tende ad assumere un valore di flusso molto elevato nelle prime ore del mattino e mantenerlo pressoché costante, salvo lievi oscillazioni, per la maggior parte della giornata.

Si comportano diversamente i flussi che interessano gli accessi di via Calzavecchio, per i quali è possibile individuare le due ore di punta del mattino e del pomeriggio, rispettivamente dalle 8 alle 9 e dalle 16 alle 17. Occorre però fare in merito due osservazioni: innanzitutto, pur individuando questi due picchi, si nota che questi non si discostano in

maniera rilevante dal valore di flusso che interessa i due accessi per la maggior parte della giornata; inoltre va ricordato che via Calzavecchio rappresenta per l'intersezione la strada secondaria, con flussi molto minori rispetto a quelli della principale, via Porrettana, che influenzano maggiormente l'andamento dell'intera intersezione.

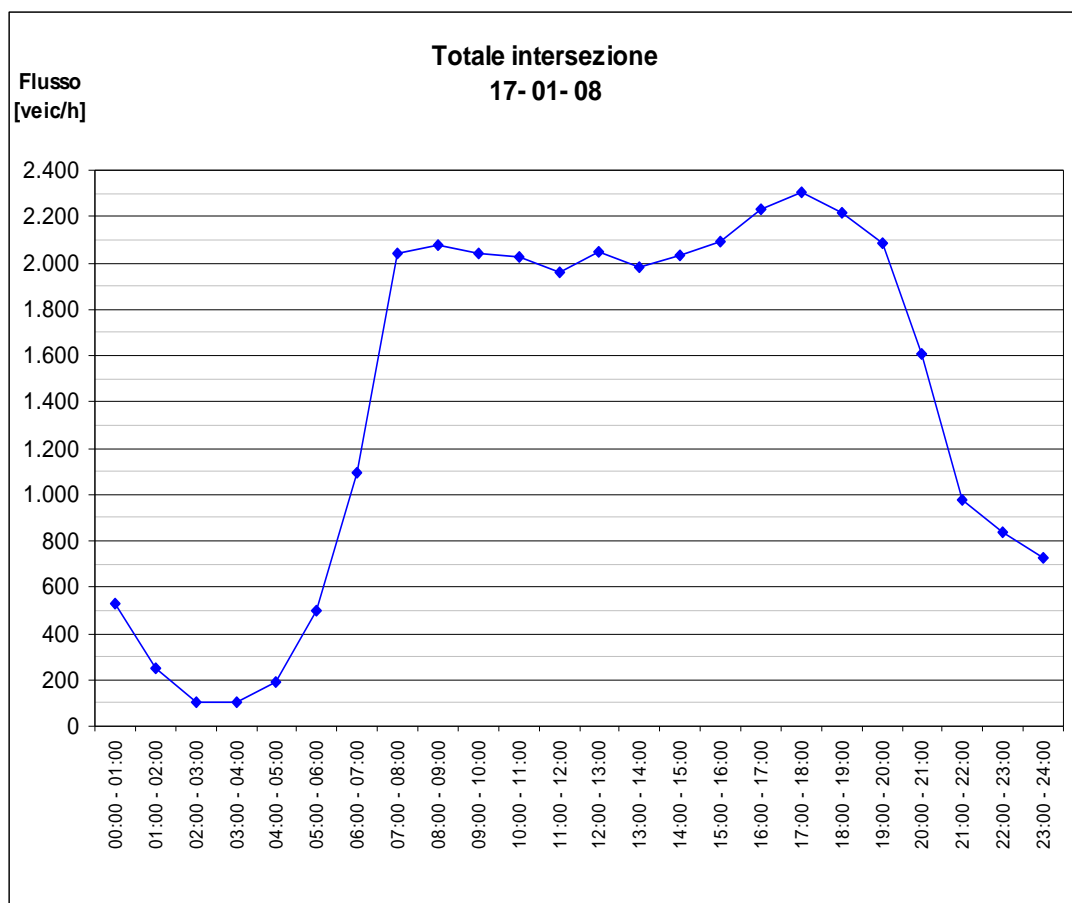


Fig. 4.9: Andamento giornaliero dei flussi totali all'intersezione.

L'andamento complessivo dei flussi che interessano l'intersezione rispecchia quanto precedentemente osservato per gli accessi di Via Porrettana.

Si riportano i dati complessivi dell'intersezione anche per un sabato e una domenica (in particolare sono stati scelti i giorni 19 e 20 gennaio 2008), in

quanto è stato osservato che in queste due giornate l'andamento e l'entità dei flussi variano notevolmente rispetto al resto della settimana.

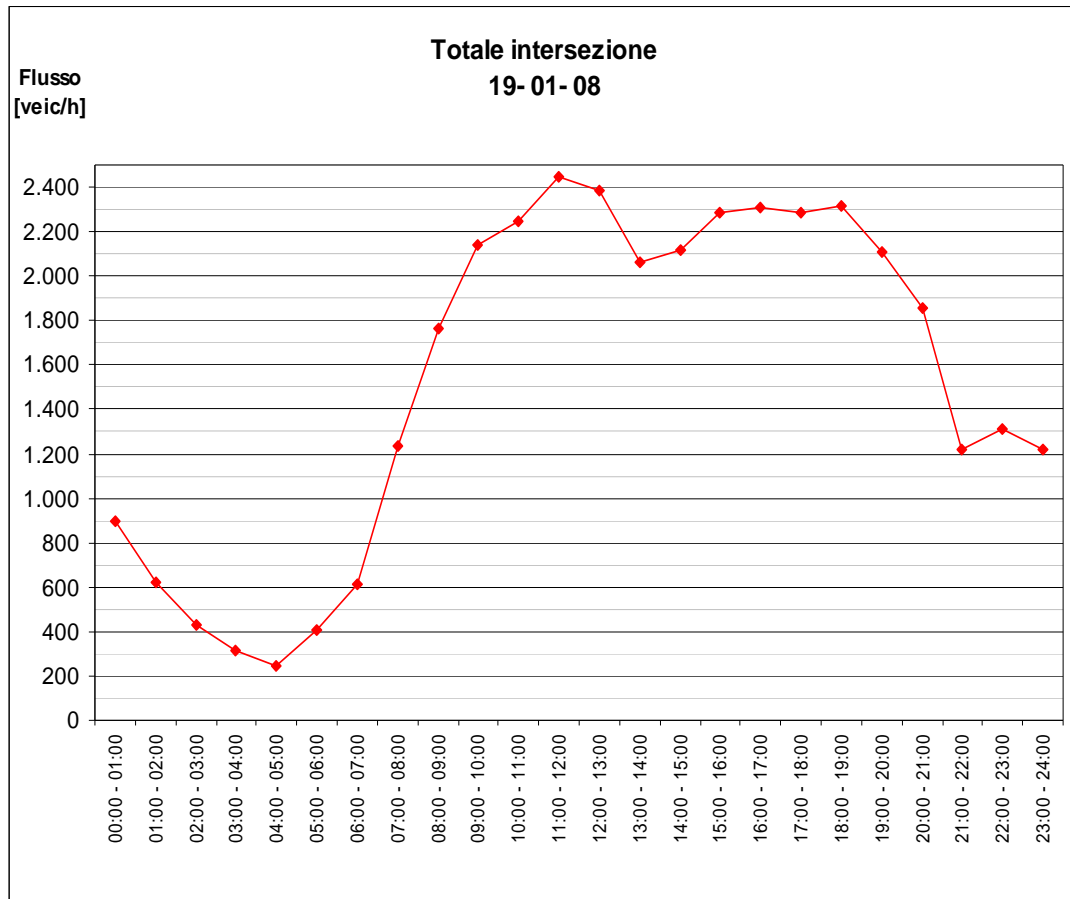


Fig. 4.10: Andamento giornaliero dei flussi totali all'intersezione - sabato.

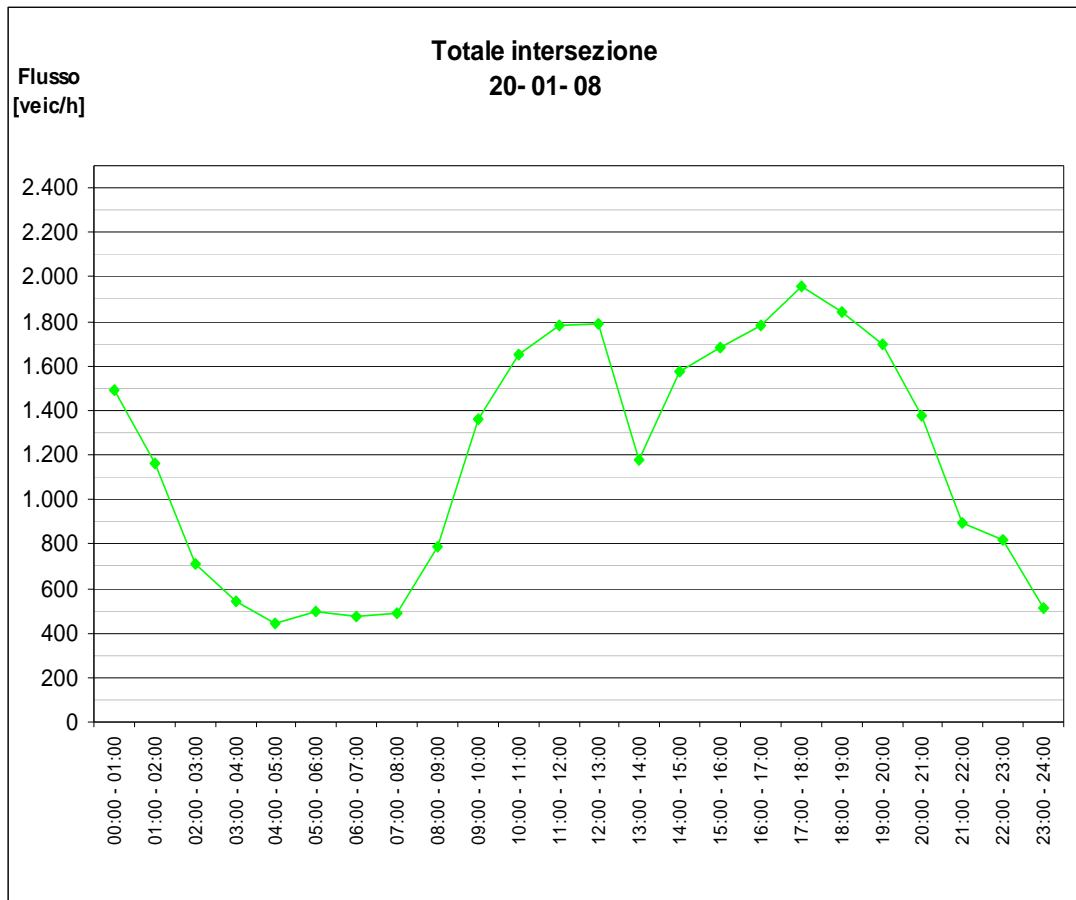


Fig. 4.11: Andamento giornaliero dei flussi totali all'intersezione - domenica.

Le diverse distribuzioni dei flussi emergono più chiaramente mediante un confronto dei tre andamenti, ottenuto sovrapponendo i grafici relativi alle giornate di giovedì, sabato e domenica.

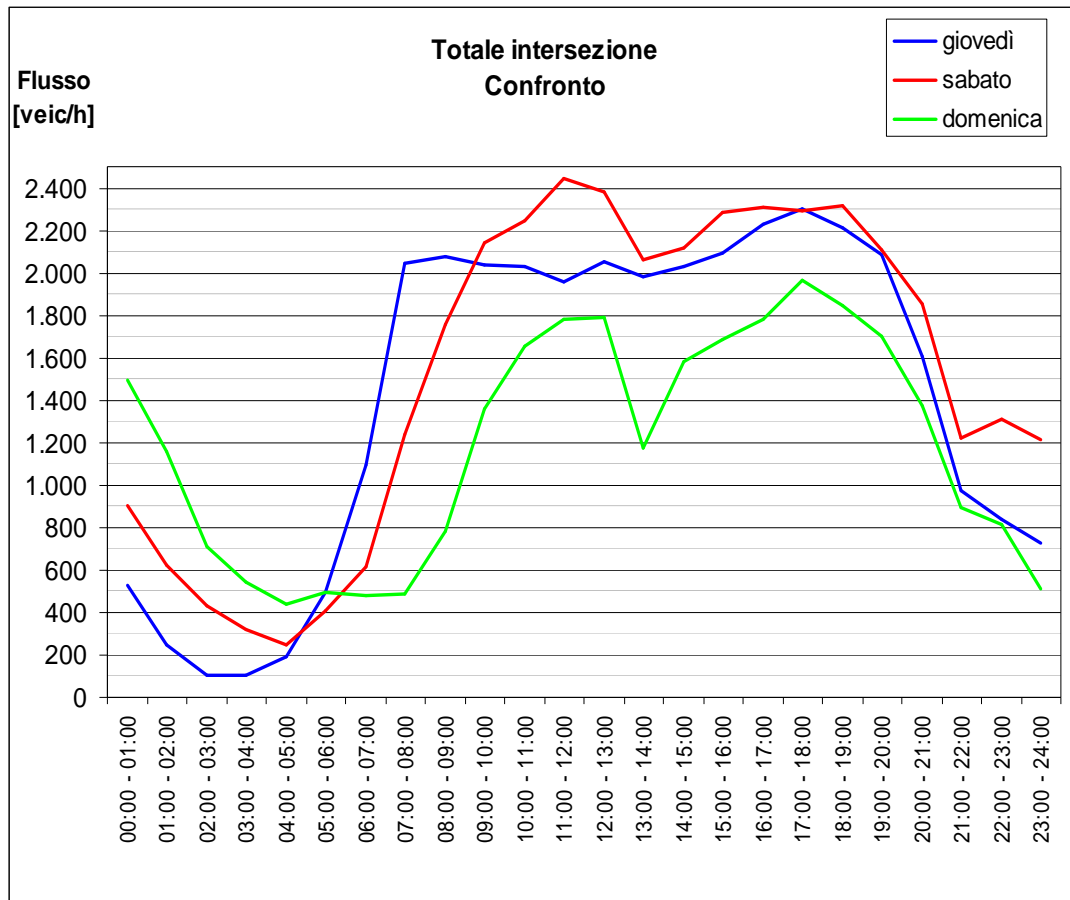


Fig. 4.11: Andamento giornaliero dei flussi totali all'intersezione - confronto.

Dai medesimi dati è possibile ricavare, come si vedeva chiaramente nella rappresentazione tabulare, la composizione veicolare delle correnti di traffico, raggruppando nella categoria “veicoli pesanti” tutti i veicoli aventi lunghezza superiore ai 5 metri.

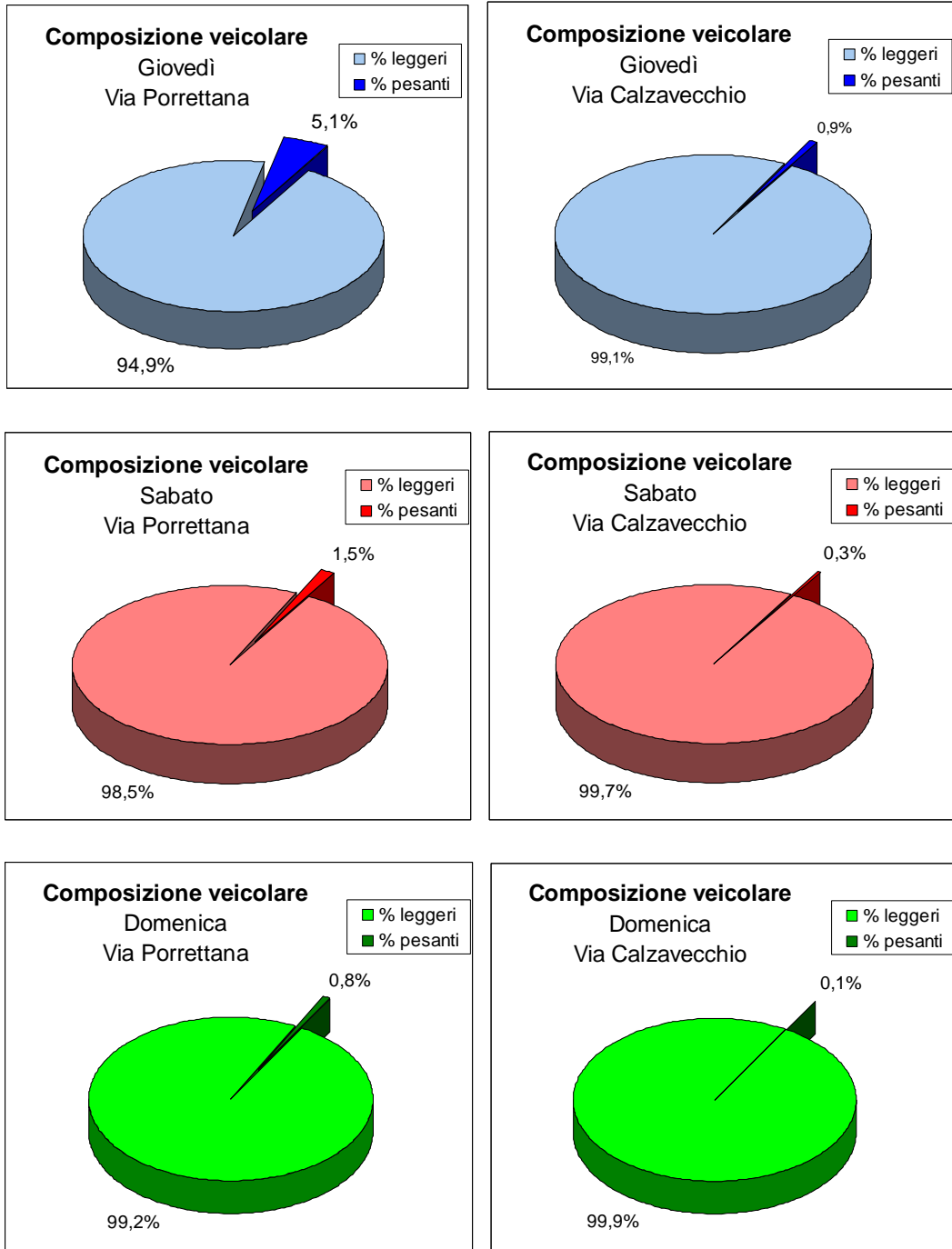


Fig. 4.12 – Composizione veicolare

4.2.4 Fasatura

Attualmente l'impianto prevede un solo piano (Piano 1) in funzione tutti i giorni dell'anno dalle ore 5.45 alle ore 2.00 (vedi tabella di selezione oraria in figura 4.5); dalle 2.00 alle 5.45 tutte le lanterne sono disposte a lampeggio (Piano 0).

È previsto l'alternarsi di 3 fasi, secondo le modalità di seguito descritte.

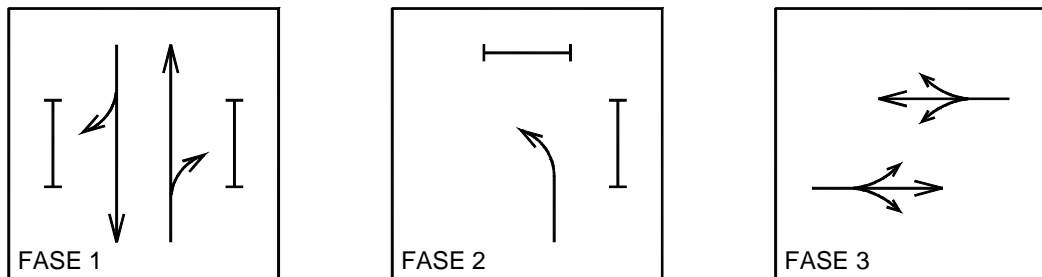
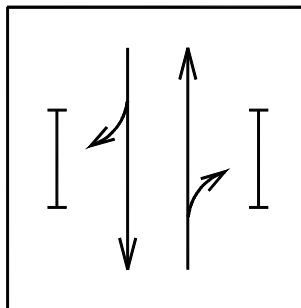


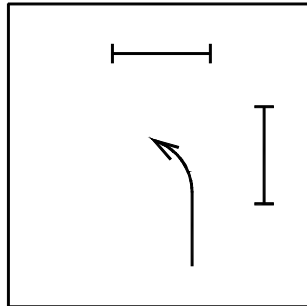
Fig. 4.13 – Schema delle fasi

In particolare:

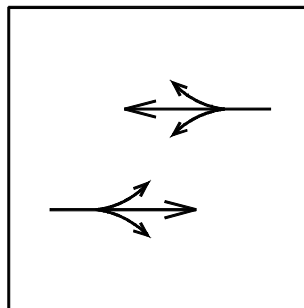
- *Fase 1:* Via Porrettana direzione Bologna (Nord) e Via Porrettana direzione Sasso Marconi (Sud); pedonali Calzavecchio;



- *Fase 2:* Via Porrettana sinistra direzione Calzavecchio; pedonale Porrettana e pedonale Calzavecchio bassa (accesso Est).



- *Fase 3:* Via Calzavecchio, direzione Est e Ovest.



L'organizzazione più dettagliata delle singole fasi si ricava dallo schema sottostante; le sigle che indicano gli accessi fanno riferimento a quelle presenti in Figura 4.4.

La durata dei singoli intervalli è riportata in basso, ed è espressa in secondi; la lunghezza complessiva di questo ciclo è pari a 113 secondi.

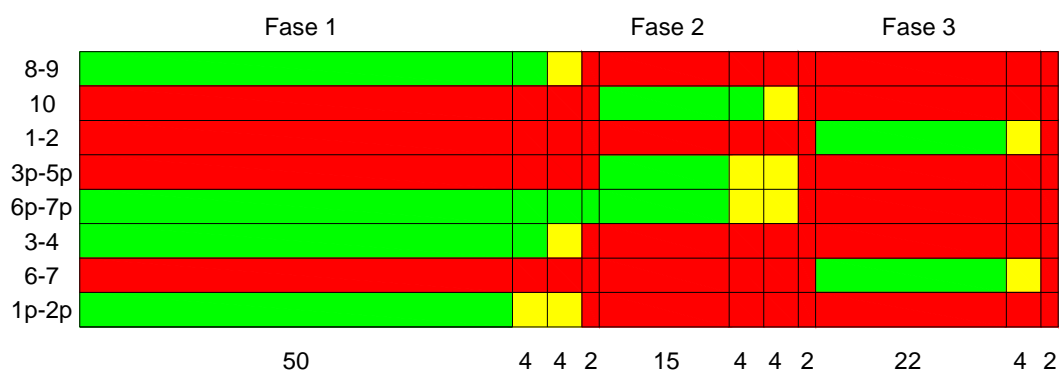


Fig. 4.14 – Durata delle fasi

Sono state individuate, prima per un giorno infrasettimanale e poi separatamente per il sabato e la domenica, alcune fasce orarie che presentano valori di flusso simili; per ognuna di esse è stata eseguita un'elaborazione dei dati di traffico precedentemente esposti con il Software HCS. Si riportano in seguito i risultati in termini di Livello di Servizio e ritardo medio a veicolo d [sec/veic].

Giovedì	O → E		E → O		S → N		N → S		Intersezione	
	LOS	d	LOS	d	LOS	d	LOS	d	LOS	d
05.45 - 06.30	D	39,5	D	38,1	C	25,3	B	18,3	C	25,3
06.30 - 07.00	D	43,2	D	41,5	D	47,5	C	23,4	D	40
07.00 - 08.30	E	70,9	E	59,2	E	57,4	C	34,2	D	52,1
08.30 - 17.00	E	73,6	D	48,8	E	59,6	D	42,5	D	54,7
17.00 - 20.00	E	79,7	D	49	E	58,3	D	55	E	59,2
20.00 - 21.00	D	50,4	D	42,2	C	31	C	32,1	C	34,5
21.00 - 02.00	D	41,8	D	38,3	C	22,9	C	21	C	25,1

Sabato	O → E		E → O		S → N		N → S		Intersezione	
	LOS	d	LOS	d	LOS	d	LOS	d	LOS	d
05.45 - 07.30	D	39,8	D	38,7	C	24,3	B	19,2	C	24,9
07.30 - 02.00	E	63,4	D	46,4	D	51,5	D	35,9	D	47,3

Domenica	O → E		E → O		S → N		N → S		Intersezione	
	LOS	d	LOS	d	LOS	d	LOS	d	LOS	d
05.45 - 09.30	D	39,5	D	38,4	C	22,4	B	18,9	C	23,7
09.30 - 13.00	E	57,8	D	45,9	C	32,7	C	29,8	D	36,2
13.00 - 15.00	D	46,4	D	40,8	C	28,9	C	25,6	C	30,4
15.00 - 20.30	D	46,4	D	42,5	D	41,7	C	30,7	D	38,2
20.30 - 02.00	D	40,6	D	38,1	C	23,4	B	20	C	24,5

Fig. 4.15 – Performance dell'intersezione – stato attuale

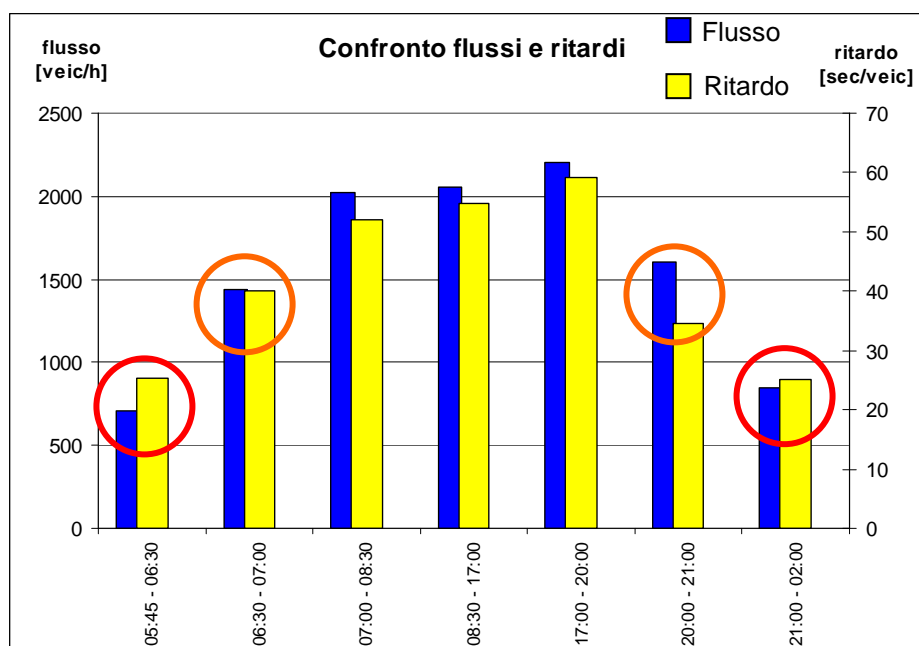


Fig. 4.16 – Confronto flusso - ritardo

Dalle tabelle emerge come l'intersezione sia sempre interessata da Livelli di Servizio molto bassi, ed è possibile osservare dal grafico che spesso l'andamento del ritardo è difforme da quello dei flussi: se si confronta ad esempio l'intervallo dalle 6:30 alle 7:00 con quello dalle 20:00 alle 21:00 si nota che, il secondo intervallo, caratterizzato da un flusso superiore, presenta però un tempo medio di ritardo inferiore. Inoltre nel primo e nell'ultimo intervallo, in cui i valori di flusso calano notevolmente rispetto al resto della giornata, i ritardi si mantengono elevati.

Ciò significa che le basse prestazioni dell'intersezione non sono dovute semplicemente agli elevati valori di flusso ma anche all'inadeguatezza della rigidità della presenza di un solo piano per rispondere ad un traffico dalle caratteristiche sopradescritte.

Per tale motivo un intervento migliorativo per le performance dell'intersezione consiste nello studio di una nuova strategia per l'alternarsi di diversi piani.

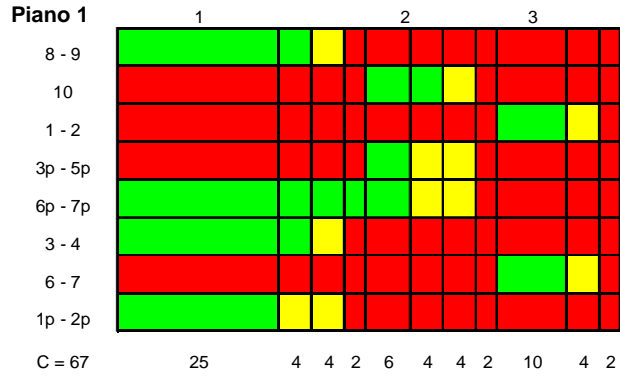
4.3 Prospettive di ottimizzazione

4.3.1 Nuova fasatura

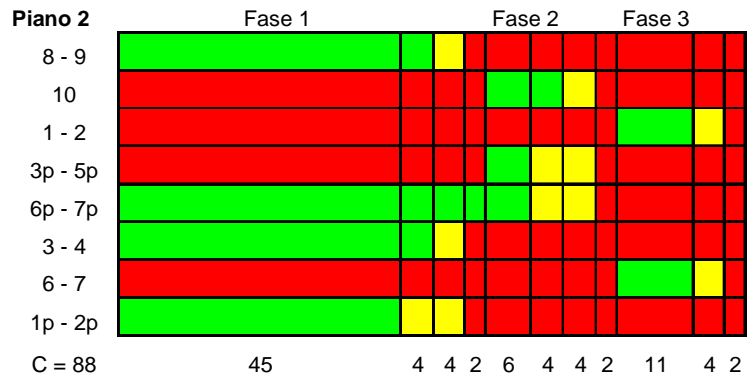
Per andare a migliorare le performance dell'intersezione sono stati utilizzati i flussi relativi ai diversi intervalli temporali precedentemente esposti per trovare, mediante l'algoritmo di ottimizzazione dell'HCS, la fasatura che sia in grado di minimizzare il ritardo medio a veicolo.

I risultati forniti dal Software sono stati analizzati in collaborazione con la FIS, Fabbrica Italiana Semafori, società che gestisce gli impianti semaforici del Comune di Casalecchio di Reno; si è giunti alle seguenti fasature di progetto e alle successive considerazioni:

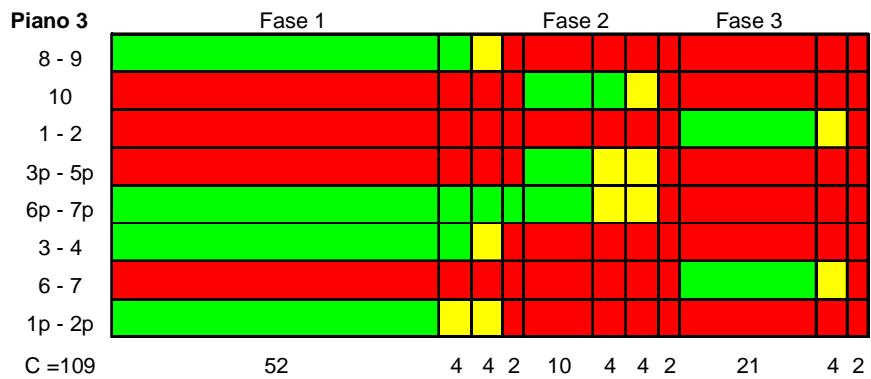
- Dal lunedì al venerdì, ore 5:45 – 6:30:



- Dal lunedì al venerdì, ore 6:30-7:00:



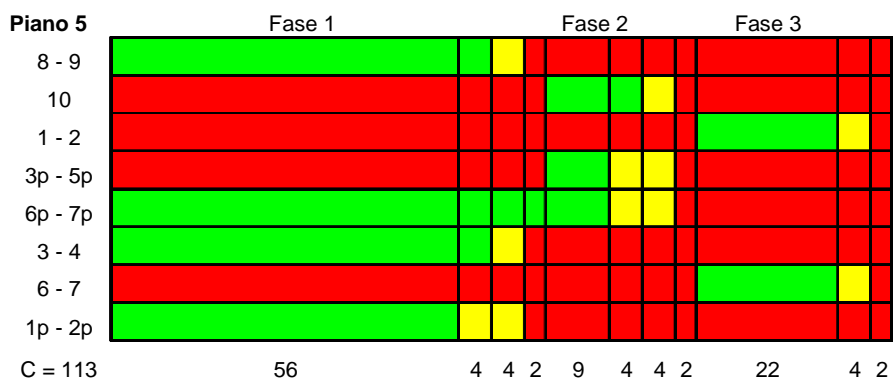
- Dal lunedì al venerdì, ore 7:00-8:30:



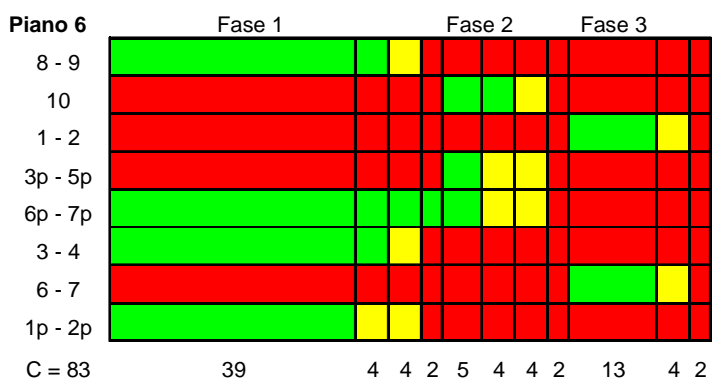
- Dal lunedì al venerdì, ore 8:30-17:00:



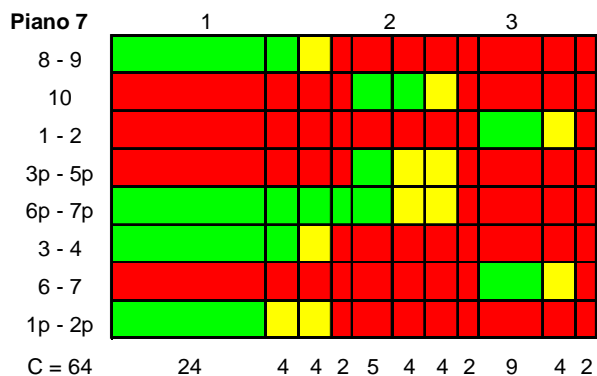
- Dal lunedì al venerdì, ore 17:00-20:00:



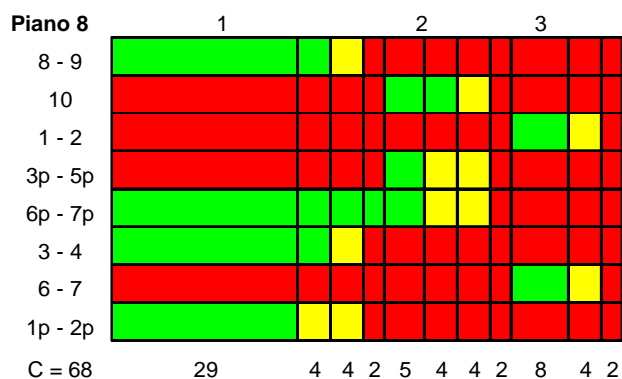
- Dal lunedì al venerdì, ore 20:00-21:00:



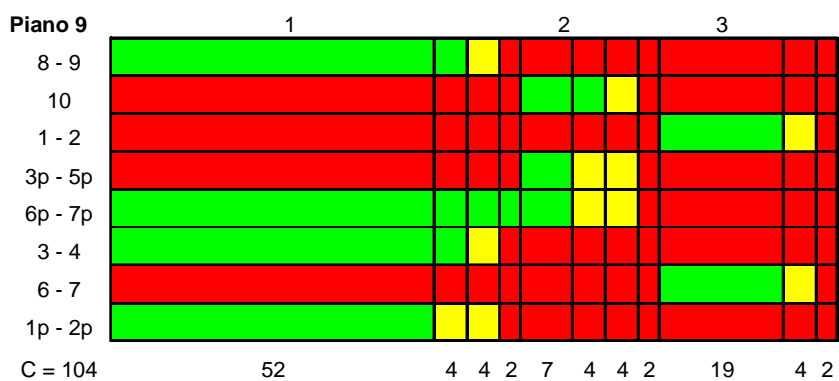
- Dal lunedì al venerdì, ore 21:00-02:00:



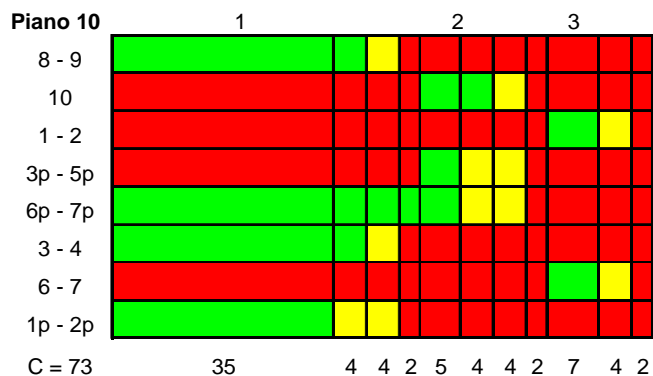
- Sabato, ore 5:45-7:30:



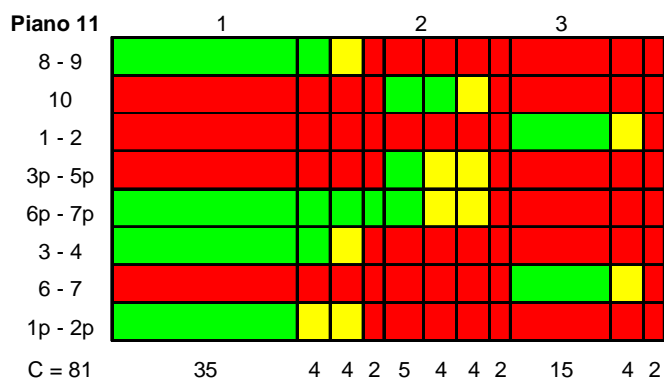
- Sabato, ore 7:30-2:00:



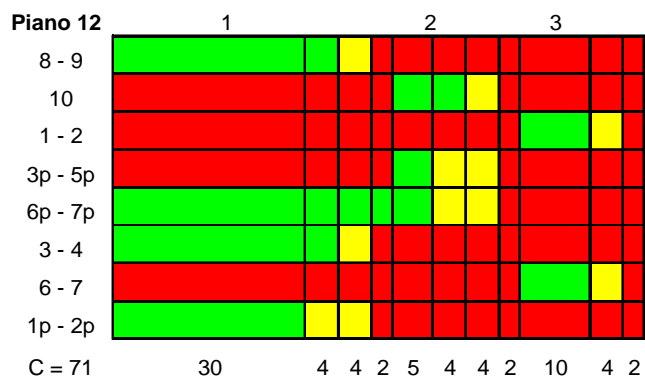
- Domenica, ore 5:45-9:30:



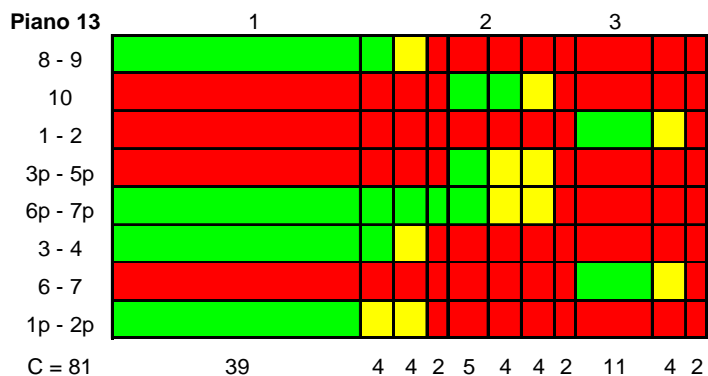
- Domenica, ore 9:30-13:00:



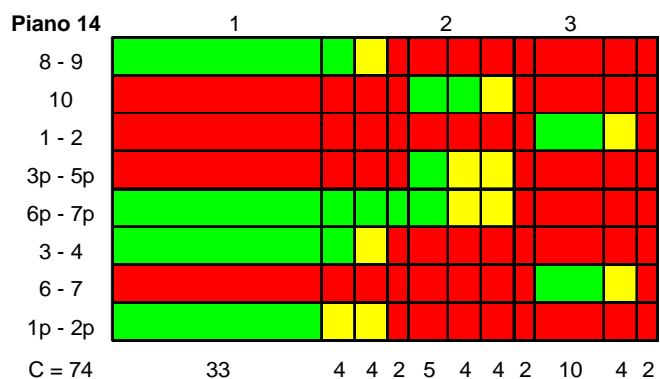
- Domenica, ore 13:00-15:00:



- Domenica, ore 15:00-20:30:



- Domenica, ore 20:30-2:00:



L'alternarsi dei nuovi piani nei diversi giorni e orari è riassunto nella nuova tabella di selezione oraria in Figura 4.17.

Num tabella	Attivazione
1	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 5.45, Piano 1
2	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 6.30, Piano 2
3	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 7.00, Piano 3
4	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 8.30, Piano 4
5	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 17.00, Piano 5
6	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 20.00, Piano 6
7	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 21.00, Piano 7
8	Ogni: Sa di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 5.45, Piano 8
9	Ogni: Sa di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 7.30, Piano 9
10	Ogni: Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 5.45, Piano 10
11	Ogni: Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 9.30, Piano 11
12	Ogni: Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 13.00, Piano 12
13	Ogni: Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 15.00, Piano 13
14	Ogni: Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 20.30, Piano 14
15	Ogni: Lu Ma Me Gi Ve Sa Do di: Gen Feb Mar Apr Mag Giu Lug Ago Set Ott Nov Dic . Ora 2.00, Piano 0

Fig. 4.17 – Nuova tabella di selezione oraria

4.3.2 Risultati ottenuti e considerazioni

Il miglioramento delle condizioni di deflusso all'intersezione appare evidente qualora si confrontino i Livelli di Servizio e i valori del ritardo medio d [sec/veic] precedenti con quelli calcolati da HCS per i nuovi piani; per cogliere il beneficio apportato dalla nuova strategia all'intersezione si possono utilizzare anche indicatori aggregati di nodo relativi all'intera intersezione, come quelli riportati nella tabella seguente.

Occorre però ricordare che tali indicatori vanno ritenuti affidabili solo se si è precedentemente verificato che la nuova fasatura non crei grossi squilibri (sempre in termini di ritardo medio a veicolo) tra i diversi accessi; se così non fosse il miglioramento del parametro aggregato potrebbe essere dovuto al miglioramento di una sola fase a scapito di un'altra.

Giovedì		LOS	d	Δd
05.45 - 06.30	stato attuale	C	25,3	-36,4%
	piano 1	B	16,1	
06.30 - 07.00	stato attuale	D	40	-38,0%
	piano 2	C	24,8	
07.00 - 08.30	stato attuale	D	52,1	-13,8%
	piano 3	D	45,4	
08.30 - 17.00	stato attuale	D	54,7	-21,8%
	piano 4	D	42,8	
17.00 - 20.00	stato attuale	E	59,2	-11,1%
	piano 5	D	48,1	
20.00 - 21.00	stato attuale	C	34,5	-25,2%
	piano 6	C	25,8	
21.00 - 02.00	stato attuale	C	25,1	-30,28%
	piano 7	B	17,5	

Sabato		LOS	d	Δd
05.45 - 07.30	stato attuale	C	24,9	-33,7%
	piano 8	B	16,5	
07.30 - 02.00	stato attuale	D	47,3	-20,9%
	piano 9	D	37,4	

Domenica		LOS	d	Δd
05.45 - 09.30	stato attuale	C	23,7	-35,0%
	piano 10	B	15,4	
09.30 - 13.00	stato attuale	D	36,2	-20,7%
	piano 11	C	28,7	
13.00 - 15.00	stato attuale	C	30,4	-25,0%
	piano 12	C	22,8	
15.00 - 20.30	stato attuale	D	38,2	-29,8%
	piano 13	C	26,8	
20.30 - 02.00	stato attuale	C	24,5	-32,2%
	piano 14	B	16,6	

Fig. 4.18– Confronto performance stato attuale e progetto.

La fase 2, che prevede la svolta a sinistra protetta da via Porrettana (veicoli provenienti da Sud) verso via Calzavecchio comincia contemporaneamente all'attraversamento pedonale di via Porrettana (3p-5p); al verde della svolta a sinistra è imposta una durata minima di 9 secondi perché, considerando che il giallo dell'attraversamento pedonale deve durare 8 secondi (di cui solo 4 si sovrappongono al giallo della corrente veicolare), questo possa avere una durata del tempo di verde almeno pari a 5 secondi.

Per i piani 1, 7, 8, 10 e 14, che sono attivi in fasce orarie caratterizzate da traffico modesto sia veicolare che pedonale, e per i quali l'ottimizzazione dell'HCS avrebbe previsto una durata minore della fase 2, si potrebbe prevedere l'attraversamento pedonale a chiamata; così facendo, qualora non si presentino pedoni all'attraversamento di via Porrettana, la lanterna del pedonale resta disposta al rosso fino al ciclo successivo, e il verde della svolta a sinistra può essere ridotto di 4 o 5 secondi.

Durante le ore centrali della giornata, quando il traffico è elevato e il Livello di Servizio dell'intersezione, fortemente influenzato dalla presenza di una fase dedicata alla sola svolta a sinistra, è destinato a calare, è utile invece prevedere l'attuazione proprio della fase 2. È possibile infatti concedere alla fase una durata minima di 9 secondi, da incrementare - fino al raggiungimento del valore previsto nei piani precedentemente descritti - solo se la spirale posta in quella corsia registra la presenza di un veicolo che si appresta a compiere la manovra di svolta.

Con questi due semplici accorgimenti è dunque possibile migliorare ulteriormente i risultati già positivi forniti dalle nuove fasature.

4.3.3 Centralina dinamica

È necessario però osservare che la soluzione più efficace e definitiva del problema dell'ottimizzazione della fasatura è rappresentata dalla

sostituzione della centralina esistente (tipo “S400”) con una moderna (tipo “Hydra”). Le centraline di nuova concezione consentono una regolazione dinamica dell’impianto, permettendo quindi la variazione delle fasi in funzione del traffico presente in strada, a differenza delle vecchie centraline che sono al più in grado di realizzare alcuni piani che si alternano seguendo quanto indicato nella tabella di selezione oraria. La novità delle centraline di tipo Hydra sta proprio nel fatto che non è necessario decidere a priori la fasatura ottimale ma, grazie al conteggio dei veicoli presenti all’intersezione e in arrivo ad essa (quest’ultimo dato si ottiene grazie alla presenza di spire distanti dalla linea di arresto circa un centinaio di metri) e al conseguente calcolo della densità veicolare è sufficiente, da parte del progettista, fissare i valori limite di progetto (ad esempio la durata massima e minima del ciclo complessivo e/o delle singole fasi).

Sarà poi la centralina stessa a generare il piano ottimo per le condizioni di traffico che ha rilevato per poi automaticamente adottarlo. È possibile fissare l’intervallo temporale tra l’elaborazione di due piani successivi; generalmente si considera un di stanziamento almeno pari a 5 minuti, per non creare instabilità nell’intersezione con variazioni continue del ciclo.

Occorre però ricordare che una soluzione di questo tipo comporta per l’amministrazione comunale costi rilevanti, sia per l’acquisto della centralina che per i lavori di installazione della stessa e di quanto vi è collegato, ad esempio l’aggiunta di nuove spire; l’ideazione di piani orari alternativi rappresenta, al contrario, un intervento della massima economicità.

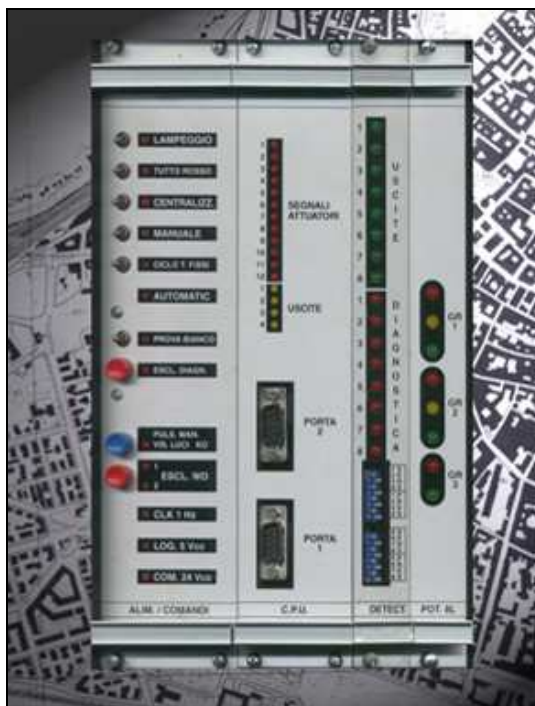
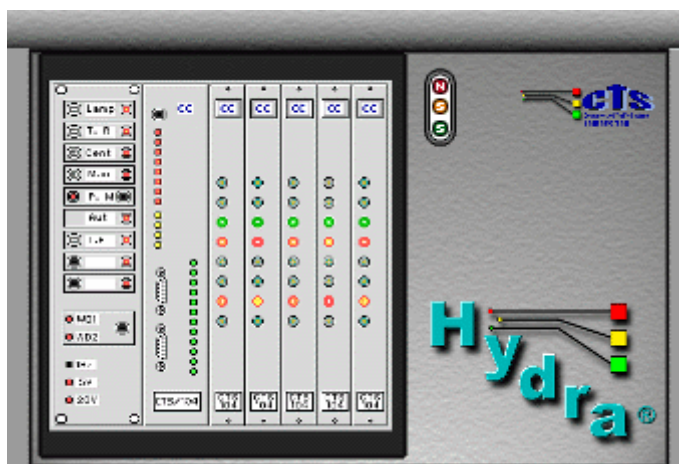


Fig. 4.19 – Centralina Hydra

Si riporta di seguito la scheda tecnica della centralina:

CONTROLLER HYDRA

SPECIFICHE TECNICHE



Controller Hydra

Si tratta di una apparecchiatura a struttura modulare realizzata con schede in formato eurocard 6U.

Le soluzioni progettuali adottate hanno permesso la realizzazione di una circuiteria estremamente semplice e compatta a fronte di costi ridotti, consumi limitati, prestazioni elevate, sicurezza ed affidabilità. Il controller Hydra è costituito da una scheda carrier (cioè una scheda che, fra le altre cose, assolve anche al compito di fornire un supporto meccanico alla PC/104), un nucleo PC/104 (AT compatibile) ancorato con un montaggio 'piggy back', un modulo di alimentazione multifunzione, un modulo BUS ed un numero variabile di moduli di uscita (di potenza). L'insieme della scheda carrier e della PC/104 costituiscono il modulo '**CPU**' ovvero l'unità di controllo centrale. La scheda carrier è costruita attorno ad un microcontrollore *single chip* OTP dedicato alle funzioni di input/output (cioè acquisisce i dati necessari ed attua i comandi impartiti a livello logico dalla PC/104), mentre la scheda PC/104 svolge le funzioni di *motore* (cioè fornisce la necessaria potenza elaborativa per l'applicazione richiesta) .

La **sicurezza di funzionamento** è il fiore all'occhiello di Hydra: infatti l'architettura ridondante adottata (doppio μ processore con circuiterie di watch dog autonome, doppia circuiteria per lo scollegamento del carico in caso di guasto, schede di potenza che disattivano autonomamente le uscite quando manca il rinfresco periodico ecc) garantisce, da un lato, l'esigenza di assicurare la continuità di servizio (minimizzando le false attivazioni e gli interventi di ripristino) e, dall'altro, una elevatissima affidabilità anche in condizioni di scarsa manutenzione. La circuiteria di scollegamento del carico, in particolare, è dotata di feedback per permettere alla logica del regolatore di rilevare eventuali guasti (alla circuiteria stessa) nell'istante in

cui questi si presentano e non quando serve l'intervento del circuito. Tale circuiteria presenta due contatti liberi da tensione (due solid state relay costituenti l'elemento finale di ciascun canale) che possono essere utilizzati in *parallelo* per alimentare un'unica bobina di sgancio oppure, se si ritiene necessario raddoppiare anche il teleruttore, utilizzati per pilotare due teleruttori distinti con contatti in **serie** in modo che il carico **venga alimentato solo** quando esiste il consenso di entrambi i canali. Inoltre il software di regolazione è in grado di verificare lo stato di ciascuno dei due canali per rilevare eventuali discrepanze (autodiagnostica).

Il nucleo è costituito da una scheda PC/104 ovvero da un PC *embedded* (AT o XT) in formato ultracompatto. PC/104 è un marchio di proprietà del *PC/104 Consortium* che include più di 150 costruttori che producono e commercializzano in tutto il mondo schede e accessori prodotti secondo lo standard *IEEE-P996*. Generalmente sono equipaggiate con CPU Intel 80x86, con almeno 512K di DRAM, 256K (oppure 512K) di Flash-EPROM a sola lettura (destinata a contenere il programma), 512K di Flash-EPROM a lettura/scrittura, interfaccia seriale (RS-232/RS-485) e parallela, real time clock e watch dog timer. Le Flash vengono viste come dischi allo stato solido: l'unità A (read only) è boot-abile ed è destinata a contenere il programma, mentre l'unità B è vista come un floppy disk a lettura/scrittura. Le schede di espansione vengono *impilate* sopra il modulo CPU; è disponibile una grande varietà di moduli Add_on quali: schede video, schede di rete, schede PCMCIA, GPS, Modem/Fax, Digital I/O, Analog I/O, GPIB ecc.

La scheda carrier contiene, oltre alla logica necessaria per l'interfacciamento con la PC/104,:

- 32 input digitali optoisolati utilizzabili per impieghi generali
- 4 outputs digitali optoisolati (con leds ripetitori) per impieghi *general purpose*

- 12 leds per impieghi di tipo diagnostico
- Un convertitore A/D per la misura della tensione di rete
- Una E²PROM seriale (a disposizione del *single chip*) per i dati non volatili (da utilizzarsi alla partenza durante il boot della PC/104)
- 32 Kbytes di E²PROM (parallela) per i dati di configurazione della PC/104
- Un microcontrollore RISC ad 8 bit OTP (cioè programmabile una volta sola) protetto contro le duplicazioni abusive.
- Una UART 16550 (COM2)
- Una Dual Port RAM
- Una batteria tampone per il mantenimento dell'ora
- L'interfaccia verso il BUS

Il BUS può ospitare, oltre alla CPU, anche la scheda multifunzione (contenente alimentatore, comandi manuali e circuiteria di watch dog) ed un numero massimo di 12 schede di espansione costituite da schede di potenza e/o schede detectors. Le schede di potenza forniscono 8 uscite cadauna (le uscite sono circuitalmente identiche e ciascuna di esse è configurabile via software come rosso, giallo o verde) mentre ciascuna scheda detector è in grado di gestire 4 spire (versione ridotta) oppure 8 spire (versione enhanced con 2 micro single chip). La caratteristica peculiare della scheda detector è quella di poter essere inserita direttamente sul BUS del regolatore in modo da poter essere campionata direttamente a livello TTL senza necessità di cablaggi esterni; in questo modo, quando le schede di potenza sono meno di 12, il regolatore può gestire un numero cospicuo di spire (fino a 32) senza impegnare alcun input della scheda carrier. Questa soluzione permette un risparmio, in termini di tempo, linearmente crescente con il numero di spire (per via dei cablaggi che non devono essere fatti) ed un risparmio, in

termini di danaro, dovuto al basso numero di inputs necessari (risparmio di optoisolatori e buffer)

Tutte le componenti hardware del regolatore Hydra (cioè scheda multifunzione, scheda carrier, BUS, scheda di potenza e scheda detector) sono state sviluppate ad hoc in funzione dell'applicazione semaforica e sono state ottimizzate per lavorare l'una con l'altra. In tal modo Hydra presenta soluzioni altamente innovative con elaborazioni distribuite su diversi micro: per esempio scheda carrier e schede detectors, costruite attorno al medesimo microcontrollore, si ripartiscono i compiti diagnostici per eseguire un filtraggio dei disturbi sui dati di traffico ed una robusta bufferizzazione dei dati stessi. In tal modo la PC/104, cui è delegato il compito di elaborare i dati ottenuti dal campionamento delle spire, è sollevata dal problema dei filtri nonché dalla necessità di campionare le spire ad intervalli regolari: semplicemente deve leggere i dati dalla RAM condivisa (Dual Port RAM) ed elaborarli dimenticandosi dei problemi legati al tempo reale.

La filosofia di Hydra di distribuire il controllo delle operazioni non è limitata ai soli dati di traffico ma è generalizzata: il tempo reale è confinato il più possibile verso il basso (cioè sulle schede detectors e sulla carrier) per garantire un intervento tempestivo (quando necessario), ma anche per sollevare il software di alto livello da quei problemi che, solitamente, possono essere affrontati e risolti solamente adottando costosi e ingombranti sistemi operativi in tempo reale.

Il microcontrollore presente sulla carrier, dotato della propria memoria non volatile (E²PROM seriale) nonché di RAM ed EPROM interne, esegue un programma sviluppato ed ottimizzato per assolvere a tutte quelle funzioni che richiedono temporizzazioni stringenti: fra i diversi compiti del μ controllore si possono ricordare:

- Accensione e rinfresco periodico delle luci semaforiche

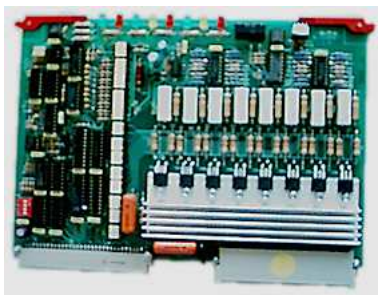
- Diagnostica sullo stato delle uscite (cioè controllo dei ‘*verdi nemici*’)
- Controllo sulla corrente di carico (cioè controllo delle lampade bruciate)
- Trigger della circuiteria di watch-dog
- Diagnostica circuiteria di watch dog
- Misurazione della tensione di rete
- Generazione di un orologio virtuale temporizzato dalla frequenza di rete
- Controllo del corretto funzionamento della PC/104
- Campionamento dei comandi manuali
- Campionamento degli inputs
- Campionamento delle spire
- Campionamento e bufferizzazione delle spire di macroregolazione
- Lettura della frequenza di lavoro di ciascuna spira

Tutte le informazioni di cui sopra sono a disposizione della PC/104: l’accesso a tali informazioni avviene mediante una semplice lettura della Dual Port Ram. La PC/104 risulta isolata completamente dal *livello fisico* dell’applicazione e si occupa solamente del livello logico: decide la temporizzazione delle fasi, la loro sequenza e tutto quanto rientra nella logica del regolatore semaforico senza doversi preoccupare delle particolari caratteristiche dell'hardware destinato ad attuare i comandi. Questo semplifica in modo enorme i compiti del software senza richiedere una configurazione hardware particolare.

Caratteristiche tecniche

- Temperatura di funzionamento: **-20÷80°C**
- Tensione di alimentazione: **230V ±10%**
- Frequenza: **50 o 60Hz**
- Immunità ai buchi di tensione: **maggiore a 100 msec a pieno carico**
- Emissioni elettromagnetiche: **Conformi a quanto fissato dalle vigenti leggi in materia di EMC**
- Immunità ai disturbi: **Conformi a quanto fissato dalle vigenti leggi in materia di EMC**
- Potenza commutabile per segnale: **800W**
- Equipaggiamento massimo: **96 uscite semaforiche disposte su 12 moduli eurocard. Su richiesta sono possibili realizzazioni customizzate.**
- Inputs digitali general purpose: **32 optoisolati di cui 8 utilizzabili per i comandi manuali**
- Inputs dedicati a spire induttive: **fino a 32 (optoisolati) disponibili su moduli eurocard da 4/8 loop cadauno.**
- Outputs: **4 uscite libere da tensione**
- Tecnologia: **Realizzato con componenti allo stato solido**
- Processori: **microprocessore a 16 o 32 bits famiglia 80x86 e µcontrollore RISC OTP 8bits**
- Architettura: **custom a basso livello, DOS compatibile PC/AT ad alto livello**
- Sistema operativo: **MSDOS**
- Espandibilità: **totale verso l'architettura PC/104 (moduli GPS, acquisizione dati, ...)**

Modulo di potenza



La scheda di potenza è stata progettata avendo come obiettivi affidabilità, prestazioni, un'efficace diagnostica e nel contempo un costo contenuto: il tutto nel rispetto dei vincoli imposti dalla compatibilità elettromagnetica.

Le soluzioni progettuali adottate hanno portato alla realizzazione di una circuiteria estremamente semplice e compatta che garantisce costi ridotti e consumi limitati assicurando, nello stesso tempo, prestazioni elevate, sicurezza ed affidabilità. Di particolare rilievo è la misura digitale della corrente di carico che, associata alla misura digitale della tensione di rete realizzata dalla scheda carrier, permette la determinazione della potenza erogata da ciascun canale e consente di discriminare fra le variazioni di carico dovute a fluttuazione della tensione di rete e le variazioni dovute all'usura o a guasti delle lampade. La scheda è tarata per garantire una risoluzione di 7,5 mA/bit ovvero un range di misura compreso fra 0 e 300W, ma la linearità della circuiteria adottata ed il bassissimo livello di rumore presente sul segnale da campionare permettono, se richiesto, l'espansione del campo di misura senza rinunciare alla precisione! Una grande cura è stata dedicata anche alla progettazione di tutta la parte inerente la sicurezza: regolatore Hydra + schede luci assicurano un livello di protezione elevatissimo. Infatti, la sicurezza è garantita da due livelli di intervento: il primo localizzato sulla scheda di potenza ed il secondo localizzato sulla logica di controllo (CPU e alimentatore). Il secondo livello è realizzato con logica ridondante in modo tale da minimizzare la probabilità fallimento.

Caratteristiche tecniche

- Architettura: **basata esclusivamente su componenti allo stato solido**
- Dimensioni: **formato eurocard (6HE), passo 5TE**
- Connettori: **DIN 41612 forma F per le uscite di potenza, DIN 41612 forma B per la connessione con il BUS segnali.**
- Soglie di controllo: **Impostabili via software nel range 0÷300W.**
- Uscite: **8 identiche (configurabili come rossi, gialli o verdi)**
- Potenza max per uscita: **800W**
- Potenza max per scheda: **2400W**
- Dispositivi di commutazione: **8 triac da 16A cadauno con circuiteria di innesco di tipo zero crossing.**
- Dispositivi di sicurezza: **ciascun canale di uscita è dotato di un dispositivo connesso in serie (per il rilevamento della corrente di carico) e di una circuiteria connessa in parallelo (per il rilevamento della tensione tensione)**
- Circoiteria rilevamento corrente di carico: **rilevamento numerico (tramite conversione A/D) del valore massimo istantaneo della corrente di carico. Risoluzione di 7,46 mA/bit e misure nel range [0...1,92A] che, in termini di potenza, equivalgono ad un range di misura [0...300 W]**
- Circoiteria rilevamento tensione di carico: **consente il rilevamento della tensione cui è sottoposto ciascun carico. E' il dispositivo conosciuto come *monitor dei verdi nemici* che, in questa applicazione, è esteso a tutte le luci pilotate. Tensione minima rilevabile attorno agli 80V. Il dispositivo è in grado di filtrare i disturbi dovuti ai buchi di tensione quando questi sono inferiori a 100 msec.**
- Misura tensione di rete: **eseguito dalla scheda carrier. Tale misura**

consente di aumentare l'affidabilità del sistema di rilevamento delle lampade bruciate risolvendo l'incertezza dovute alle variazioni della tensione di rete.

- **Trigger del triac: Zero crossing**
- **Rigidità dielettrica: 2500 Volts**
- **Fail safe: la scheda spegne automaticamente tutte le uscite qualora la configurazione corrente non sia rinfrescata dal regolatore semaforico entro un tempo prefissato ovvero quando il μ controllore dedicato al controllo dell'I/O non funzioni regolarmente. Questo dispositivo di sicurezza ha il compito di impedire l'accensione casuale delle luci alla partenza (quando il microcontrollore non è ancora operativo) ed a garantire un doppio livello di protezione per assicurare lo spegnimento dell'impianto quando la logica di controllo non funziona. Il secondo livello di intervento è assicurato da un dispositivo (detto Watch Dog) in grado di interrompere la fase che alimenta i triac quando la CPU lo richieda o quando cessi il rinfresco periodico.**
- **Visualizzazione: Ogni uscita è dotata di LEDs ripetitori. Tali LED possono essere utilizzati anche per la diagnostica di primo livello: infatti, quando il regolatore è in lampeggio di emergenza, mediante la pressione di un pulsante è possibile (previo scollegamento del carico) visualizzare l'uscita in avaria.**

Detectors veicolari

Si tratta di detectors a spira magnetica dedicati al rilevamento del traffico. Hanno una architettura basata su un singolo microcontrollore (versione 4 loop) o su un doppio microcontrollore (versione 8 loop).

Il principio di funzionamento del detector è basato sul rilevamento delle piccole variazioni di induttanza (delle spire collegate) causate dalla massa metallica del veicolo. Infatti la presenza di un veicolo sopra la spira provoca una riduzione di induttanza che, a sua volta, causa un aumento della frequenza di risonanza del circuito connesso alla spira. Il compito del detector è quello di rilevare le variazioni della frequenza di oscillazione del circuito risonante e, in base a queste, valutare la presenza o l'assenza del veicolo.

Il detector è progettato in modo tale da compensare le derive causate da fattori ambientali (tipicamente la temperatura) e di autotararsi quando le condizioni operative escono dai valori limite. Le spire sono multiplexate a coppie: significa che quando è attiva la spira 1 allora la spira 2 è in standby e viceversa (Lo stesso vale per le coppie 3÷4, 5÷6 e 7÷8). Questa particolarità consente l'installazione ravvicinata delle spire della coppia scongiurando la possibilità di interferenze.

L'adozione di un ritardo fra l'istante in cui il veicolo è rilevato dal detector e l'istante in cui l'uscita del detector diventa attiva (tale tempo è detto *tempo di risposta* del detector e non deve essere confuso con il *tempo di rilevamento* che è il ritardo che intercorre fra l'istante in cui il veicolo occupa la spira e l'istante in cui il detector lo rileva) permette un efficace filtraggio sui rumori. Inoltre un criterio decisionale ad *'isteresi'* garantisce la dovuta stabilità del segnale d'uscita minimizzando i fenomeni di oscillazione.

Il detector consente la variazione della frequenza di risonanza tramite una coppia di jumper che possono assumere 4 configurazioni diverse. Quando il detector è utilizzato sul bus del regolatore Hydra è possibile verificare la corretta installazione direttamente sul terminale: infatti il software nativo del regolatore permette all'operatore di verificare la frequenza di lavoro di ciascuna spira. In questo modo il compito dell'operatore è drasticamente semplificato in quanto è possibile, senza alcuna strumentazione aggiuntiva, verificare che induttanza della spira e del cavo siano tali da far lavorare il detector all'interno della gamma di frequenze ammissibili ed è possibile verificare l'efficacia del settaggio adottato quando si intende differenziare la frequenza di lavoro della generica spira. In casi particolarmente critici si possono realizzare spire con diverse induttanze (variando il numero di giri avvolti nella cava che costituisce la circonferenza della spira), quindi verificare le frequenze ottenute ed aggiustarle agendo sui jumper.

Il detector, quando inserito sul BUS del regolatore Hydra, viene automaticamente riconosciuto dal software del regolatore evitando noiose operazioni di configurazione.

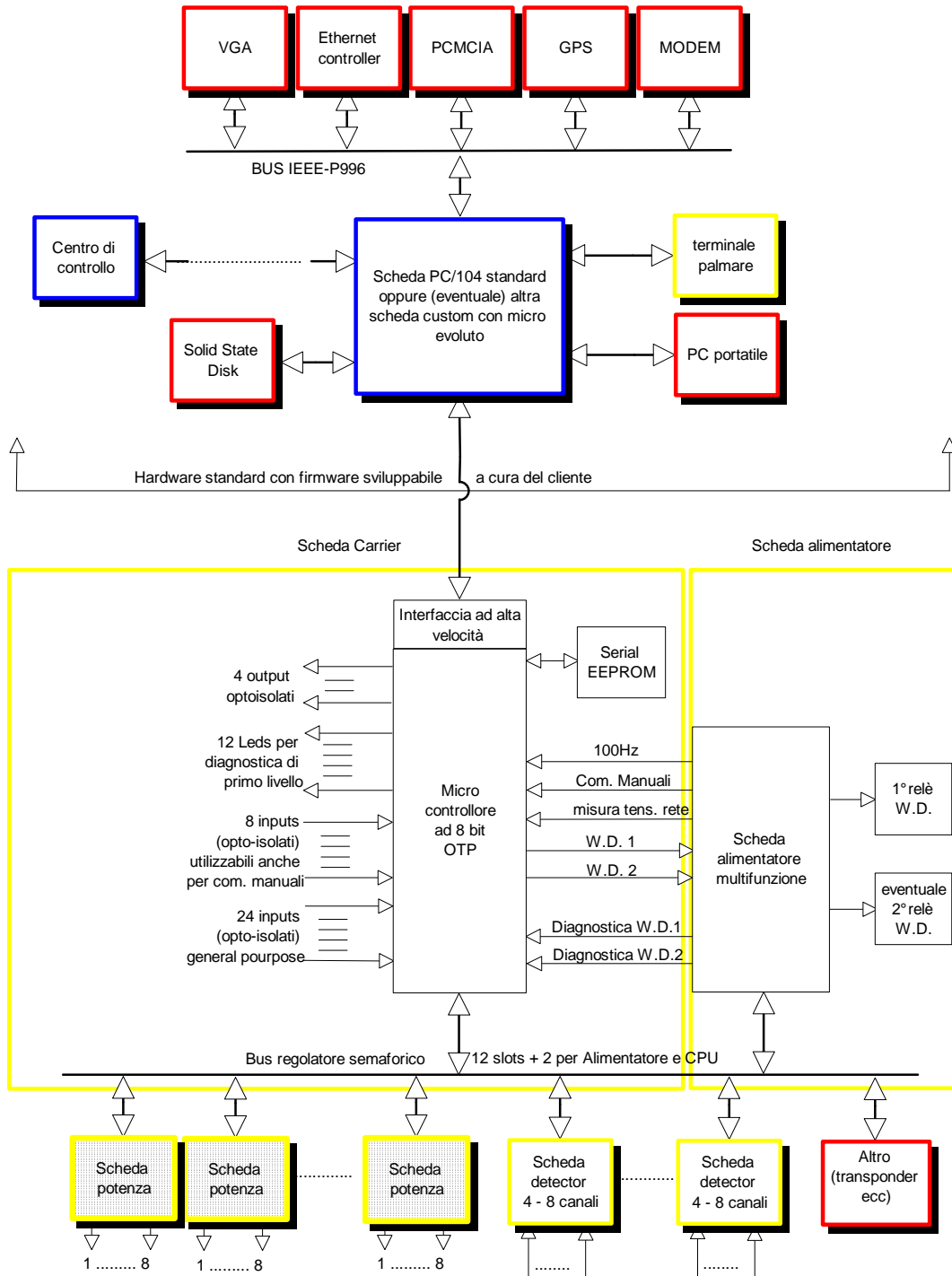
Caratteristiche tecniche

- Temperatura di esercizio: **-20÷80°C**
- Range induttanza spira: **75÷2000μH**
- Sensibilità: **Selezionabile fra 3 livelli (alta, media, bassa)**
- Freq. di oscillazione: **Compresa fra 12.5KHz e 125 KHz.**
- Selezione frequenza: **Attuabile attraverso dip-switch fra 4 possibili valori**
- Tempo di rilevamento: **Dipendente dalla sensibilità. 12msec per sensibilità bassa, 32 msec per sensibilità media, 80 msec per sensibilità alta. I tempi possono essere dimezzati utilizzando solo metà dei canali disponibili**
- Taratura: **Automatica allo start-up e con algoritmo di autotaratura run time. L'autotaratura interviene quando:**
 - La presenza supera il valore massimo (dipendente dal settaggio).
 - La frequenza di oscillazione si scosta di un valore superiore a $\pm 10\%$ rispetto al valore rilevato in fase di taratura.
 - Nel modo impulsivo dopo un secondo di presenza continua.
- Tempo di risposta: **Costante e pari a 100 msec (necessario per il filtraggio dei disturbi).**
- Sicurezza: **Chiamata continua sui canali che non si trovano nelle condizioni operative corrette**
- Emissioni elettromagnetiche: **Conformi a quanto fissato dalle vigenti leggi in materia di EMC**
- Immunità ai disturbi: **Conformi a quanto fissato dalle vigenti leggi in materia di EMC**
- Lunghezza max cavo: **150 metri se la sensibilità è media, oltre 400 metri se la sensibilità impostata è alta.**
- Numero di spire collegabili: **4 sulla versione ridotta, 8 sulla versione**

completa.

- **Uscite: Ciascun canale dispone di un'uscita convenzionale costituita da un optoisolatore con transistor NPN open collector: l'uscita è satura quando il detector è in chiamata. Il detector è predisposto per essere sistemato su un BUS: in tal caso lo stato di ciascun canale può essere rilevato con un ciclo di lettura sul bus**
- **Indicatori: Ciascun canale è dotato di un LED che indica lo stato dell'uscita e di un secondo LED dedicato alle segnalazioni dei guasti.**
- **Alimentazione: 9÷24 Volts non stabilizzata. Tale tensione alimenta le spire e, tramite un jumper, può alimentare anche la logica del detector (per le applicazioni stand-alone). Laddove il detector è inserito su un BUS, invece, l'alimentazione della logica è presa dal BUS, mentre l'alimentazione delle spire (isolate galvanicamente dalla logica) rimane quella di cui sopra.**
- **Formato scheda: Eurocard 6 unità.**
- **Tecnologia: Realizzato con componenti allo stato solido**
- **Processori: Un unico μ controllore RISC OTP ad 8bits sulla versione ridotta, due μ controllori sulla versione ad 8 canali.**
- **Connettori: 2 connettori DIN 41612 forma B: uno per l'inserimento sul BUS ed un secondo per le connessioni con le spire, l'alimentazione e le uscite NPN**

Schema a blocchi regolatore



5 CONTROLLO DEL ROSSO SEMAFORICO: IMPIANTO VISTA RED

5.1 Importanza dei dispositivi di controllo del rosso semaforico

Dai dati forniti dalla Polizia Municipale del Comune di Casalecchio di Reno emerge come, tra le violazioni alle norme di comportamento, statisticamente dal 1 gennaio 2003 ad oggi il primo comportamento illecito più accertato dagli agenti sia la violazione del rosso semaforico. Negli ultimi anni lo sviluppo della tecnologia quale mezzo di supporto agli agenti del traffico ha visto la diffusione di numerosi dispositivi in grado di accertare in modo automatico questo genere di infrazioni. L'impiego di strumenti tecnologici è pensato come complementare alla presenza fisica sul territorio in quanto il controllo di alcune violazioni è semplice e non necessita di particolari conoscenze teoriche o della esperienza professionale di un agente di polizia stradale. Per questo motivo alcune fasi di accertamento possono essere affidate completamente alle macchine, pur

rimanendo fermo il contributo di un agente per il controllo della macchina e la verifica degli accertamenti che la stessa ha proposto all'uomo.

In questo modo l'Agente di Polizia Municipale, che viene impiegato solamente in alcune fasi di verifica, può accertare da solo, in 45 minuti di lavoro, fino a 100-120 violazioni.

Questi impianti consentono inoltre di perseguire, garantendo un controllo continuo delle intersezioni, un miglioramento in termini di sicurezza andando a modificare le abitudini scorrette degli automobilisti, in particolare nelle ore notturne quando le velocità sono mediamente più elevate e le conseguenze delle violazioni più gravi. Questo obiettivo si raggiunge anche mediante l'indicazione dei semafori soggetti a controllo mediante apposita segnaletica.

5.2 Presentazione dei principali dispositivi in commercio

5.2.1 FTR

Il dispositivo FTR, prodotto dalla ELTRAFF SRL, è tra i primi impianti che consente la documentazione fotografica delle infrazioni in area semaforica.

È costituito da un'apparecchiatura molto semplice che può essere installata su qualsiasi impianto in modo fisso o volante; è in grado di produrre esclusivamente due fotogrammi scattati a 1,5 secondi uno dall'altro (distanza regolabile a richiesta), sui quali vengono impresse data e ora dell'infrazione, la denominazione dell'incrocio dove è avvenuta e il tempo, espresso in decimi di secondo, da quando è iniziato il rosso. Il sensore di passaggio è costituito da una o due spire induttive inserite nell'asfalto, e il sensore dello stato semaforico consiste in un trasduttore collegato alla lampada del segnale rosso.



Fig. 5.1 – FTR

5.2.2 TRAFFIPHOT

Prodotto dalla LINDBLAD & PIANA SRL, TRAFFIPHOT è un dispositivo che, analogamente al precedente, fornisce due soli fotogrammi dell'infrazione compiuta. È provvisto di esposimetro automatico che regola il diaframma e inserisce, se necessario, il flash elettronico: ciò lo rende adatto per essere utilizzato anche 24 ore su 24.

La presenza di due spire poste sotto il manto stradale permette sempre di avere anche i valori della velocità dei veicoli.



Fig. 5.2 – TRAFFIPHOT

5.2.3 PHOTORED

Progettata e costruita da ITALTRAFF SRL PHOTORED è un'altra apparecchiatura destinata a documentare fotograficamente le infrazioni commesse dai veicoli al semaforo. Anche questo dispositivo scatta due fotogrammi in cui, oltre alla panoramica dell'intersezione controllata col veicolo in infrazione, riproduce sulle foto le informazioni necessarie per l'identificazione esatta del luogo e del momento esatto dell'infrazione.

Tra le caratteristiche di questo apparecchio, si ricorda che:

- non rileva veicoli che procedono in senso inverso di marcia;
- non rileva veicoli che, procedendo al di sotto di una velocità minima prefissata, si fermano non oltrepassando la lanterna semaforica proiettante luce rossa;
- è predisposto per essere regolato in modo tale che, in funzione delle dimensioni e caratteristiche dell'incrocio, il secondo scatto avvenga quando il veicolo si trova circa al centro dell'intersezione controllata o comunque oltre la palina semaforica;
- entra in funzione dopo un tempo prefissato dall'inizio del segnale rosso.



Fig. 5.3 – Esempio di una schermata fornita da PHOTORED

5.2.4 T-RED

Il dispositivo T-RED, prodotto da Kria SRL, è tra i più evoluti in circolazione in quanto, a differenza delle apparecchiature descritte fino ad ora, effettua un vero e proprio filmato dell'evento.

Dal filmato eseguito il sistema estrae 6 fotogrammi che documentano l'infrazione, 2 dei quali dedicati esclusivamente alla lettura della targa del veicolo coinvolto; il limite dell'apparecchiatura è che, pur lavorando con una videocamera, non fornisce agli operatori il video ma solo i fotogrammi estratti.



Fig. 5.4 – T-RED

5.2.5 VISTA RED

Il dispositivo Vista Red, prodotto da Microrex s.r.l. e commercializzato da Traffic Technology, è l'unico dispositivo in grado di fornire l'intero filmato dell'infrazione e non i singoli fotogrammi; rivelandosi, per questo motivo, la migliore apparecchiatura tra quelle presenti sul territorio nazionale è stata scelta dalla Polizia Municipale del Comune di Casalecchio di Reno per il controllo automatico del rispetto del rosso semaforico in alcune intersezioni critiche della città.

5.3 Caratteristiche dell'impianto Vista Red

5.3.1 Generalità

Come già anticipato nel paragrafo precedente il Vista Red (Video Identification for Security & Traffic Alert – Red Education Disposer) è preferito ad altri dispositivi attualmente in uso poiché effettua un vero e proprio filmato del veicolo nella fase di attraversamento dell'incrocio con semaforo rosso. Non si limita infatti ad eseguire solo alcuni scatti fotografici, e ciò garantisce l'effettiva certezza e completezza dell'evento accaduto.

5.3.2 Struttura del sistema

Il funzionamento del sistema inizia con la rilevazione del veicolo che commette l'infrazione da parte delle spire elettromagnetiche affogate nell'asfalto; le spire utilizzate nel sistema Vista Red sono doppie, sono cioè costituite da una matassa di doppio cavo capace di rilevare, oltre al campo elettromagnetico, anche la velocità e la direzione del passaggio (quest'ultimo aspetto è importante perché si evita che venga inutilmente avviato l'impianto nel caso di passaggio di un veicolo in direzione opposta che transita troppo vicino alle spire).

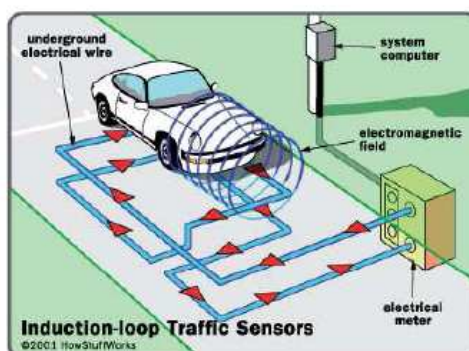


Fig. 5.5 – Schema delle spire impiegate

Collegata elettricamente alle spire si trova la centralina di comando, che controlla costantemente il segnale del semaforo e le stesse spire. Se un veicolo transita sopra le spire nella direzione ammessa quando il semaforo è disposto al rosso la centralina attiva la telecamera, che invia le informazioni anche al videoregistratore digitale collocato in centrale operativa, il quale registra in continuo sull'hard disk residente, permettendo sia una conservazione a bordo sia la connessione in rete per il download e l'archiviazione su unità esterne.



Fig. 5.6 – Centralina di comando

Quando la luce del semaforo è verde la centralina ignora le spire e non attiva le telecamere; il sistema quindi non si attiva fino a quando non riceve il segnale che la luce è rossa. Da quel momento, qualora sia rilevata la presenza di un veicolo sulle spire, la telecamera, oltre a iniziare a registrare, seguirà il veicolo stesso effettuando uno zoom nella zona dove si suppone essere la targa (è possibile farlo poiché la presenza di due spire consente di

rilevare la velocità del veicolo), consentendo di identificare inequivocabilmente l'automezzo che compie l'infrazione.

Se il veicolo è già all'interno dell'intersezione quando la luce diventa rossa il sistema non rileva l'infrazione, poiché infatti questa non rappresenta una violazione alle norme del traffico; inoltre se il veicolo attiva solo la prima spira la centralina riconosce che esso si è fermato all'inizio dell'intersezione senza attraversarla.

Una volta avviata la ripresa delle immagini questa continua con la registrazione dell'evento fino a quando il veicolo ha completamente attraversato l'intersezione; come già ricordato prima la telecamera, contestualmente alla rilevazione dell'infrazione, invia le informazioni al videoregistratore collegato. Quest'ultimo provvede ad imprimere alcune informazioni criptate extra su ogni singolo fotogramma della sequenza filmata, in modo da poter ad esempio conoscere data e ora dell'evento, ubicazione dell'intersezione, direzione del veicolo e numero della telecamera che ha fornito il filmato.

Da ogni filmato vengono estrapolati alcuni fotogrammi singoli che sono in seguito sottoposti al riconoscimento della targa con conversione dell'immagine in dato per la conseguente gestione in database e interfacciamento con software standard per la gestione dei verbali. I dati registrati sono esclusivamente quelli pertinenti le effettive infrazioni e possono essere scaricati come video o fotografie facilmente riproducibili con stampante per l'immediata spedizione insieme al verbale di multa. La conservazione delle singole fotografie e, soprattutto, dell'intero filmato, permette di offrire una documentazione completa e assolutamente attendibile.

Il sistema si completa di un ulteriore modulo software (Vista Report) dedicato alla emissione di report e statistiche gestionali e di utilizzo.

Il funzionamento e la struttura dell'intero sistema è sintetizzato dallo schema in Figura 5.7:

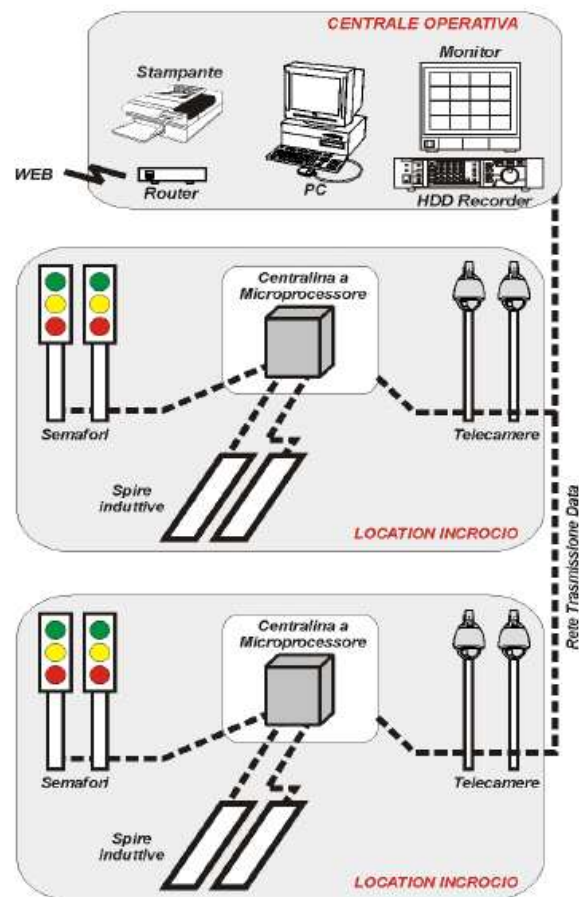


Fig. 5.7 – Struttura dell'impianto Vista Red

5.4 Utilizzo della tecnologia Vista Red nel comune di Casalecchio di Reno

Nel Comune di Casalecchio di Reno l'adozione degli impianti precedentemente descritti è stata decisa all'interno del progetto "Strade sicure", che prevede diverse azioni volte ad aumentare la sicurezza stradale,

tra le quali ad esempio il controllo della velocità e il controllo sullo stato di ebbrezza alcolica ed ebbrezza da stupefacenti.

Gli impianti per il controllo delle infrazioni sono stati installati nei 4 incroci più pericolosi del territorio individuati secondo il criterio del più alto tasso di incidentalità:

- Incrocio via Porrettana – via Michelangelo – via Cimabue (impianto in funzione da maggio 2007)
- Incrocio via Porrettana – via Calzavecchio (impianto in funzione da maggio 2007)
- Incrocio via Bazzanese – via del Lavoro (impianto in funzione da dicembre 2007)
- Incrocio via Porrettana – via Caravaggio (impianto in funzione da dicembre 2007).

In linea con il risultato auspicato dall'applicazione del Vista Red si è passati in pochi mesi da una media giornaliera di 13 violazioni ad incrocio via via fino all'attuale media giornaliera di 4.

Nelle immagini successive si riportano lo schema dell'impianto Vista Red installato nell'intersezione di via Porrettana – via Calzavecchio e i due fotogrammi che documentano un'infrazione commessa nello stesso incrocio.

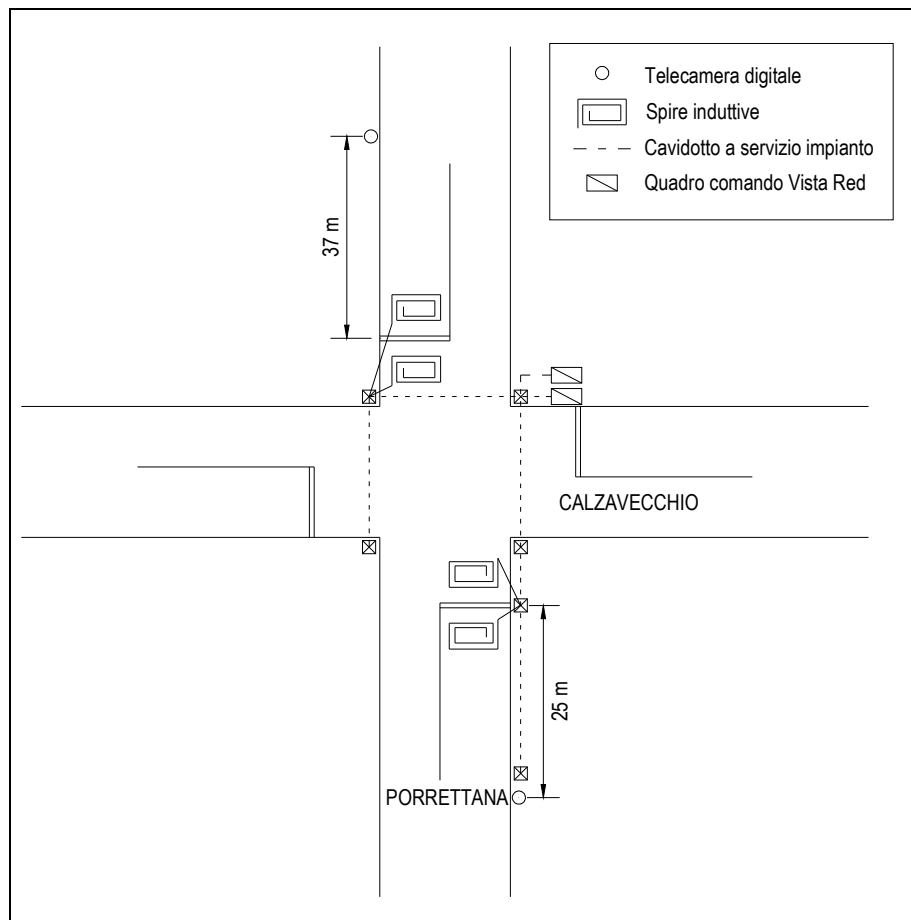


Fig. 5.8 - Schema dell'apparecchiatura installata nell'intersezione Porrettana - Calzavecchio.



Fig. 5.9 – Infrazione all'intersezione via Porrettana – via Calzavecchio.

Nei grafici seguenti sono riportate le elaborazioni dei dati relativi alle infrazioni segnalate dal Vista Red per l'intersezione in esame dall'installazione fino al mese di febbraio 2008.

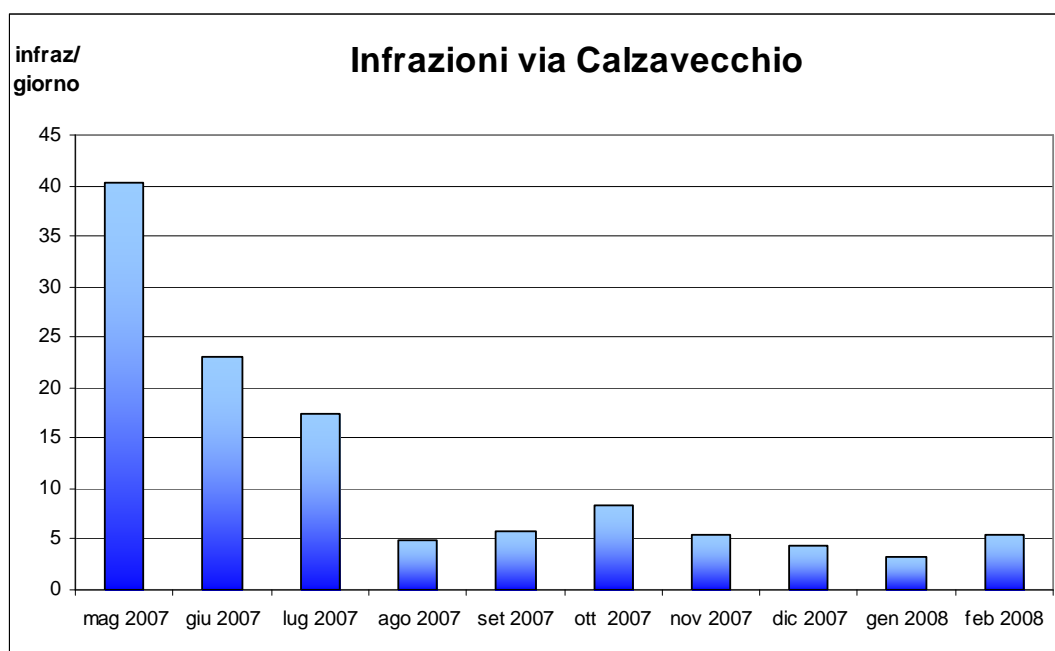


Fig. 5.10 – Infrazioni giornaliere.

Si osserva che dopo i primi mesi, in cui la media di infrazioni registrate dal dispositivo è stata notevole (fino a 40 infrazioni al giorno per il mese di maggio), nei mesi successivi il numero di sanzioni eseguite è calato quasi esponenzialmente, e arriva adesso a fatica ad oltrepassare la soglia delle 5 infrazioni al giorno; questo andamento rispecchia un fatto sicuramente positivo, ossia il calo del numero di passaggi col rosso, dovuto principalmente al fatto che gli utenti abituali sono certamente più attenti a non tenere comportamenti scorretti da quando sono a conoscenza della presenza di un dispositivo di sanzionamento automatico;

Grazie alla presenza di apposita segnaletica anche i guidatori che pur non attraversano usualmente l'intersezione sono messi a conoscenza del fatto che l'incrocio è costantemente videosorvegliato.

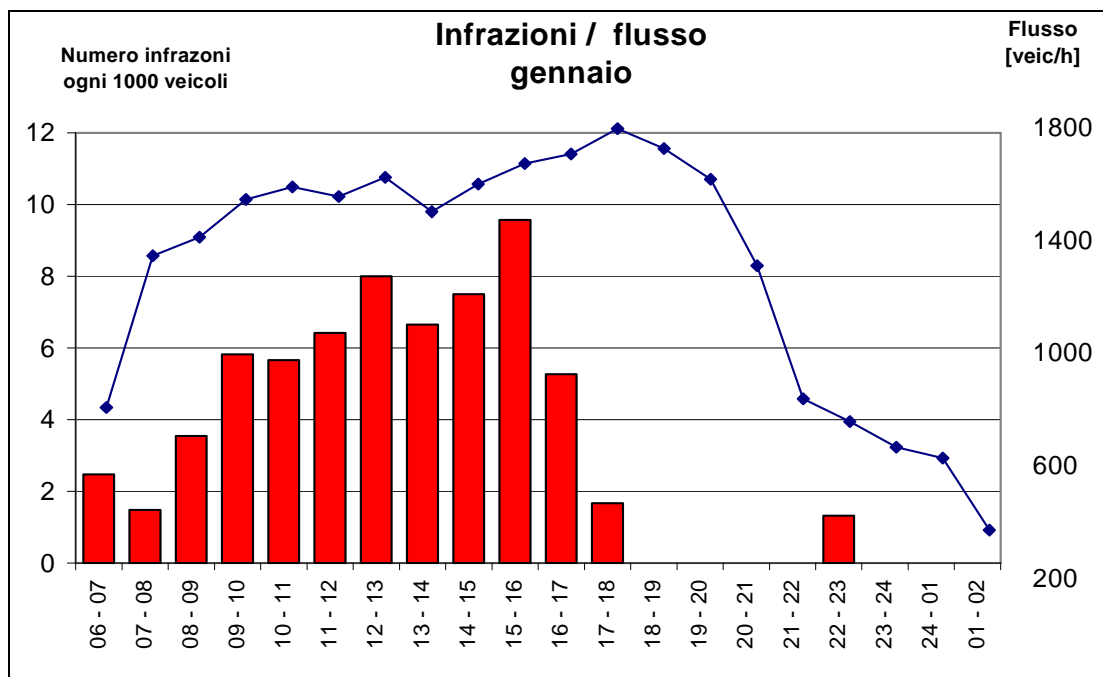


Fig. 5.11 – Numero di infrazioni ogni 1000 veicoli di traffico

Nel grafico in Fig. 5.11 il numero di infrazioni viene rapportato al flusso ed è dunque possibile effettuare un confronto tra i dati relativi ad orari diversi; si vede che i dispositivi registrano il più alto tasso di infrazioni nelle ore centrali della giornata, dove, come si è visto nel capitolo precedente, l'intersezione è caratterizzata da notevoli code e ritardi.

Tuttavia non sarebbe corretto ipotizzare una dipendenza del numero di comportamenti scorretti dal flusso perché, proprio nelle ore più cariche della giornata, come ad esempio dalle 17:00 alle 18:00, le infrazioni calano notevolmente.

Nel grafico seguente si riporta l'andamento orario della composizione veicolare del flusso per ricercare un'eventuale correlazione tra l'andamento delle infrazioni e la tipologia di veicoli presenti su strada; si osserva che, sebbene anche questo grafico mostri un calo nelle ore serali, l'elevato numero di mezzi pesanti non può essere l'unica causa dell'alto numero di

infrazioni poiché, specialmente nelle prime ore della mattina, i due andamenti si discostano notevolmente.

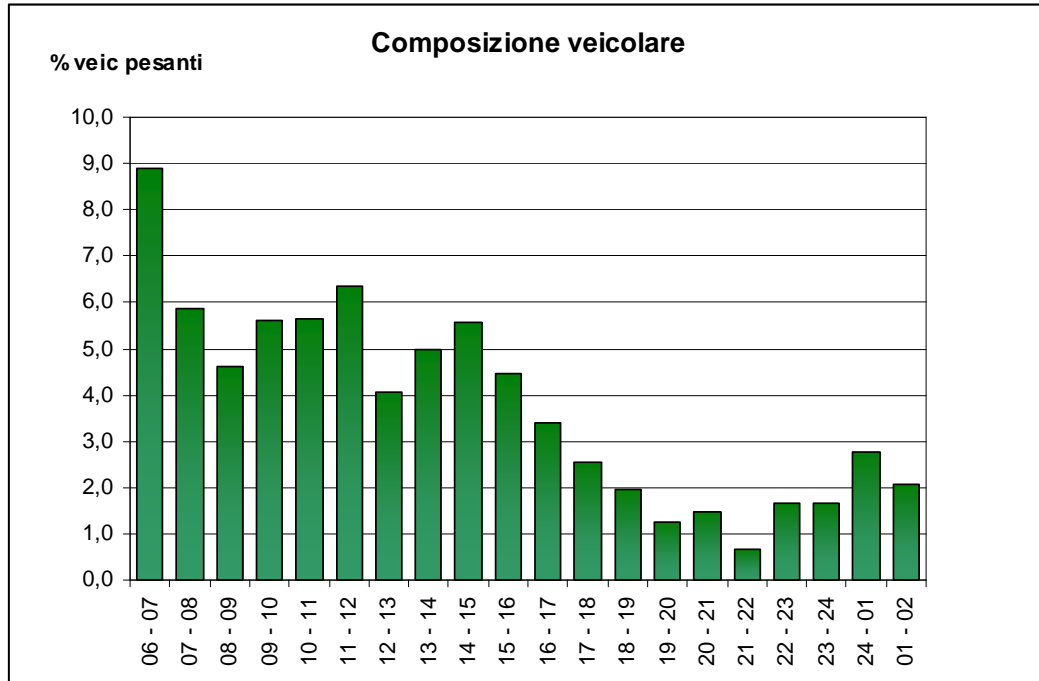


Fig. 5.12 – Composizione veicolare media giornaliera

Un'ulteriore causa sarà dunque da cercare in altri fattori, quali ad esempio la tipologia di utente alla guida o le condizioni ambientali.

5.5 Calcolo del tempo di giallo minimo

5.5.1 Premessa

Correlato alle recenti installazioni di impianti Vista Red (o tecnologie simili) in molte città d'Italia è di forte attualità il tema del calcolo del tempo di giallo minimo G_{min} , ossia quell'intervallo tale da consentire l'arresto dei veicoli in sicurezza prima dello scattare del rosso o lo sgombero dell'intersezione nel caso in cui questi si trovino a una distanza inferiore a quella d'arresto.

5.5.2 Riferimenti normativi

Nella giurisprudenza italiana non esistono leggi o norme a carattere cogente che stabiliscano i criteri per la regolazione delle intersezioni semaforizzate.

Le “Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle intersezioni stradali”, recentemente approvate e rese cogenti con il DM 19/04/2006, non fanno alcun cenno agli impianti di regolazione semaforica.

Negli studi a carattere prenormativo condotti dal Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) e propedeutici alla stesura di tali norme era invece presente un intero capitolo dedicato a tale argomento; nel presente documento si farà dunque riferimento alle prenorme, che pur non avendo valenza di legge cogente contengono indicazioni ragionate e consolidate negli anni.

Possono inoltre essere assunte come linee guida dal punto di vista tecnico le indicazioni contenute nel capitolo 2 delle “Norme sull’arredo funzionale delle strade urbane” redatte dal CNR nel 1992.

5.5.3 Calcolo dei tempi di giallo

L’art. 41 del Codice della Strada (D.Lgs. n.285 del 30/04/1992) asserisce che:

“Durante il periodo di accensione della luce gialla i veicoli non possono oltrepassare gli stessi punti stabiliti per l’arresto (...) a meno che vi si trovino così prossimi, al momento dell’accensione della luce gialla, che non possano più arrestarsi in condizioni di sufficiente sicurezza; in tal caso essi devono sgombrare sollecitamente l’area di intersezione con opportuna prudenza.”

La durata del giallo deve quindi essere calcolata in modo da avvisare dell’imminenza del rosso con un anticipo tale da consentire ai veicoli che si trovano ad una distanza superiore o pari allo spazio di arresto di frenare e

fermarsi senza impegnare l'intersezione, e a quelli che si trovano a una distanza inferiore di sgomberare l'intersezione prima dello scattare del verde antagonista, procedendo la marcia a velocità costante.

Prima di procedere col calcolo del tempo di giallo occorre quindi calcolare i valori dello spazio di frenatura e della distanza di arresto.

Dalle "Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane" si desume la seguente formula, mutuata dalle "Norme sulle caratteristiche geometriche delle strade extraurbane" redatte dal CNR nel 1980:

$$S_f = \frac{v_a^2}{2g \left(f_a \pm \frac{i}{100} \right)}$$

dove

S_f spazio di frenatura [m]

v_a la velocità dei veicoli in arrivo [m/s]

g accelerazione di gravità [m/s²]

f_a coefficiente di aderenza, che per una velocità pari a 50 km/h vale 0,4

i pendenza percentuale del ramo, positiva se in salita verso l'intersezione.

Svolgendo i calcoli si ottiene, per una velocità pari a 50 km/h (13,89 m/s) e considerando la pendenza dei rami dell'intersezione trascurabile:

$$S_f = \frac{13,89^2}{2 \cdot 9,81 \cdot 0,4} = 24,58 \text{ [m]}$$

Per ottenere la distanza di arresto occorre sommare allo spazio di frenatura lo spazio percorso a velocità costante durante il tempo di percezione e reazione:

$$D_a = \frac{V_0}{3,6} \tau + S_f$$

dove

D_a distanza di arresto [m]

V_0 velocità del veicolo all'inizio della frenatura [km/h]

τ il tempo complessivo di reazione (percezione, riflessione, reazione e attuazione) [s]

Per quanto riguarda il valore del tempo complessivo di reazione τ si può fare riferimento a indicazioni provenienti da diverse fonti. Le “Norme sull'arredo funzionale delle strade urbane” (CNR) suggeriscono un valore di τ pari a 1 s; le “Norme sulle caratteristiche geometriche e funzionali per la costruzione delle strade” (approvate con il DM 05/11/2001) ricorrono a una stima del tempo di reazione in funzione della velocità V [km/h] con cui il veicolo arriva all'intersezione, secondo la seguente legge

$$\tau = 2,8 - 0,01 \cdot V$$

che per una velocità pari a 50 km/h fornisce un tempo di reazione di 2,3 s.

Si procede ora al calcolo della distanza di arresto e del conseguente tempo minimo di giallo per i due diversi valori del tempo di reazione.

5.5.4 Tempo di reazione in accordo con le norme CNR

Si assume, come già precedentemente detto, un tempo di reazione complessivo pari a 1 s. Dalle relazioni precedenti si ottiene $D_a = 38,47$ m

Ricordando che il veicolo percorre questa distanza a una velocità ipotizzata costante e pari a 50 km/h si ottiene un tempo di percorrenza di tale tratto di 2,77 s, che corrisponde al valore desiderato di durata minima del tempo di giallo.

5.5.5 Tempo di reazione in accordo con il DM 05/11/2001

Il tempo di reazione in questo caso è pari a 2,3 s (ricordando che è stata assunta una velocità pari a 50 km/h), valore dal quale si ottiene $D_a = 56,52$ m.

In questo secondo caso il giallo minimo risulta essere uguale a 3,77 secondi.

In entrambi i casi ($G_{\min} \approx 3$ sec e $G_{\min} \approx 4$ sec) occorre ricordare che per completare l'analisi della fasatura di un impianto è necessario verificare, in relazione alla geometria del problema, che nel tempo di tutto rosso AR i veicoli riescano a sgomberare completamente l'intersezione prima che si accenda il verde antagonista.

5.5.6 Considerazioni in merito ai diversi tempi di reazione

Si è osservato come la scelta del tempo di reazione sia la variabile fondamentale nella verifica della durata dei tempi di giallo.

Sebbene la formulazione del DM 2001 possa sembrare preferibile in quanto più cautelativa, occorre notare come in realtà la stima più attendibile sia

quella fornita dalle “Norme sull’arredo funzionale delle strade urbane” del CNR. Queste forniscono infatti un valore del tempo di reazione riferito esplicitamente all’approssimarsi del veicolo ad una intersezione, a differenza della relazione fornita dalle “Norme sulle caratteristiche geometriche e funzionali per la costruzione delle strade” del DM 2001 che si riferiscono ad un generico istante della guida. La formula che viene fornita per il calcolo di τ in funzione della velocità ha infatti origine nell’ambito del calcolo delle distanze di visibilità per il sorpasso in contesti extraurbani.

5.5.7 Ipotesi di attraversamento

Nel caso in cui un veicolo si trovi, allo scattare del giallo, a una distanza dalla linea di arresto inferiore allo spazio di frenatura occorre verificare che la somma del tempo di giallo e di tutto rosso sia sufficiente affinché il veicolo possa sgomberare l’incrocio in sicurezza prima dello scattare del verde antagonista.

La distanza che il veicolo dovrà percorrere si ottiene dalla precedente distanza di arresto sottraendo ad essa lo spazio di occupazione medio di un veicolo, assunto pari a 8 metri, e aggiungendovi la dimensione del ramo incrociante;

$$S = D_a - L_v + L_r$$

Nel caso in esame consideriamo la larghezza L_v del ramo incrociante pari a 25 m; ne aumentiamo dunque il valore per tener conto anche della particolare geometria dell’intersezione; dal calcolo si ottiene $S = 56$ m.

Per percorrere questa distanza alla velocità di 50 km/h è necessario un tempo di giallo minimo di 4,03 secondi.

Considerando che al tempo di giallo si somma un tempo di tutto rosso di 2 secondi proprio allo scopo di consentire un completo sgombero dell'intersezione si può concludere che la durata del tempo di giallo pari a 4 secondi è rispettosa della sicurezza degli utenti anche nel caso di attraversamento.

CONCLUSIONI

In questo lavoro di tesi si è cercato di approfondire alcune tematiche chiave nello studio di intersezioni semaforizzate.

L'analisi di un impianto semaforico nel Comune di Casalecchio di Reno e della sua attuale fasatura ha portato al progetto di una nuova strategia per ricercare la soluzione che minimizza il ritardo medio a veicolo.

È apparso da subito evidente che la presenza di un unico piano, in funzione tutti i giorni dell'anno dalle 5:45 fino alle 2:00 era inadeguato a rispondere al flusso che interessa quell'intersezione; si sono ipotizzati vari intervalli orari all'interno della giornata, e lo stesso lavoro è stato fatto sia per un giorno infrasettimanale che, separatamente, per il sabato e la domenica.

Con l'ausilio del Software HCS è stato individuato, per ogni fascia oraria, il piano semaforico più adeguato al flusso; da un confronto tra i valori di ritardo medio attuale e di progetto è emerso un miglioramento generale del Livello di Servizio dell'intersezione; tale miglioramento è particolarmente accentuato nelle ore di minor flusso, quando l'ipotesi progettuale prevede cicli di breve durata per evitare il formarsi di code ad un accesso quando potrebbero non esserci veicoli in arrivo nelle correnti in conflitto.

Per apportare ulteriori benefici alle condizioni di deflusso all'intersezione è stata inoltre ipotizzata l'attuazione della svolta a sinistra protetta (resa possibile grazie alla presenza di spire in grado di rilevare la presenza o meno di veicolo in attesa di effettuare tale manovra), in modo da favorire le altre correnti qualora non vi fossero veicoli nella corsia oggetto di attuazione.

Una parte importante di questo elaborato è stata inoltre dedicata allo studio del funzionamento delle moderne apparecchiature di controllo automatico del rispetto del rosso semaforico; tra i diversi dispositivi che svolgono questa funzione è stato approfondito l'impianto Vista Red, scelto dalla Polizia Municipale del Comune di Casalecchio di Reno per le sue migliori caratteristiche tecniche.

Dopo aver illustrato il funzionamento generale dell'apparecchiatura sono stati elaborati i dati relativi alle infrazioni segnalate dal Vista Red nell'intersezione già oggetto di studio nei capitoli precedenti.

Da questi dati emerge l'efficacia del dispositivo, al quale si deve un calo esponenziale del numero di infrazioni commesse in quell'intersezione dal giorno dell'installazione ad oggi. È doveroso rilevare che gli attraversamenti col rosso non comportano sempre lo stesso rischio per la sicurezza dei veicoli; basti pensare che la stessa infrazione può essere causata dall'alta velocità, per cui il guidatore non riesce a fermarsi in tempo, sorprendendo il veicolo che sopraggiunge nell'altra direzione, oppure può essere dovuta alla congestione, quando i veicoli procedono incolonnati a basse velocità e al guidatore può accadere di seguire il veicolo che lo precede senza accorgersi che intanto il semaforo è diventato rosso.

Indipendentemente dalla natura delle infrazioni è però indubbio che una diminuzione così sostanziale del numero delle infrazioni commesse non può che arrecare un beneficio in termini di sicurezza dei veicoli presenti in strada.

Nel caso particolare dell'intersezione oggetto di studio si è osservato l'andamento orario delle infrazioni nell'arco di una giornata per ricercare eventuali correlazioni con i flussi in gioco e la loro composizione veicolare; da ciò è emerso che le infrazioni non seguono l'andamento del traffico, e il loro alto numero in certi intervalli orari non è quindi dovuto alla congestione, né al tasso di veicoli pesanti.

Sarebbe necessaria un'analisi più approfondita e la conoscenza di dati ulteriori per capire se possa esserci una correlazioni tra il numero di attraversamenti col rosso ed altri fattori, quali ad esempio la tipologia di utenti o di veicoli coinvolti o a caratteristiche legate al luogo.

BIBLIOGRAFIA

- Savino Rinelli – *Intersezioni stradali semaforizzate* – UTET
- *Highway Capacity Manual*
- www.tecnostrada.it
- www.lasemaforica.it
- Webster – *Traffic Signal Settings* – Road Research Technical Paper, 1958.
- ELTRAFF – *Scheda tecnica “FTR”*
- Lindblad & Piana s.r.l. – *Scheda tecnica “TRAFFIPHOT”*
- ITALTRAFF s.r.l. – *Scheda tecnica “PHOTORED”*
- Kria s.r.l. – *Scheda tecnica “T-RED”*
- Codice della Strada (D.Lgs. n.285 del 30/04/1992)