



Ministero dell' Istruzione,
dell'Università e della Ricerca



Università degli Studi
di Palermo

DITRA

Dipartimento di Ingegneria
dei **Trasporti**

Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti

Dottorato di Ricerca in
Tecnica ed Economia dei Trasporti

ICAR/05

*I modelli di simulazione del traffico veicolare per la
stima delle emissioni inquinanti*

Tesi di Dottorato:

Ing. Roberto Marino

Tutor:

Ch.mo Prof. Marco Migliore

Coordinatore del Corso:

Ch.mo Prof. Luigi La Franca

A.A. 2007/2008 – XXII Ciclo – Aprile 2011

Sommario

| | |
|--|-----------|
| INTRODUZIONE | 6 |
| PREMESSA | 9 |
| 1 ASPETTI NORMATIVI | 11 |
| 1.1 PREMESSA | 11 |
| 1.2 IL FENOMENO DELL'EMISSIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI | 12 |
| 1.3 SOSTANZE INQUINANTI IN AMBITO URBANO | 17 |
| 1.4 NORMATIVA IN VIGORE | 19 |
| 2 GLI INQUINANTI ATMOSFERICI | 24 |
| 2.1 PREMESSA | 24 |
| 2.2 LE SOSTANZE INQUINANTI | 25 |
| 2.3 INQUINANTI PRIMARI ED INQUINANTI SECONDARI | 27 |
| 2.4 LO SMOG FOTOCHIMICO | 28 |
| 2.5 FLUSSI VEICOLARI ED EMISSIONI INQUINANTI | 31 |
| 2.6 LA REGOLAMENTAZIONE DELLA QUALITÀ DELL'ARIA | 31 |
| 3 IL PROCESSO DI EMISSIONE DEI VEICOLI | 34 |
| 3.1 PREMESSA | 34 |
| 3.2 EMISSIONI ALLO SCARICO | 35 |
| 3.3 I FATTORI CHE INFLUENZANO L'EMISSIONE | 37 |
| 3.3.1 <i>Le caratteristiche costruttive del veicolo</i> | 39 |
| 3.3.1.1 Tipo di propulsione del veicolo | 39 |
| 3.3.1.2 Caratteristiche di potenza | 41 |
| 3.3.1.3 Dispositivi di controllo delle emissioni | 42 |
| 3.3.2 <i>Lo stato della meccanica dei veicoli</i> | 45 |
| 3.3.3 <i>La dinamica del motore</i> | 46 |
| 3.3.4 <i>Le condizioni termiche del motore</i> | 47 |
| 3.3.5 <i>Evoluzione dei motori in Europa</i> | 49 |
| 4 MODELLI DI EMISSIONE | 53 |
| 4.1 PREMESSA | 53 |
| 4.2 CARATTERISTICHE DEI MODELLI DI EMISSIONE | 53 |
| 4.3 MODELLI STATICI DI EMISSIONE | 57 |
| 5 LA DISPERSIONE DELLE SOSTANZE INQUINANTI IN ATMOSFERA | 61 |
| 5.1 PREMESSA | 61 |
| 5.2 LE DINAMICHE ATMOSFERICHE | 63 |
| 5.3 PARAMETRI METEOROLOGICI E LORO MISURE | 65 |
| 5.4 LA CAPACITÀ AMBIENTALE | 69 |
| 6 MICROSIMULAZIONE DEL TRAFFICO | 71 |
| 6.1 INTRODUZIONE | 71 |
| 6.2 I MODELLI DI DEFLUSSO VEICOLARE | 74 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 6.3 | I MODELLI MICROSCOPICI DI DEFLUSSO | 77 |
| 6.4 | PRINCIPI GUIDA DELLA SCELTE DEL MICRO SIMULATORE | 79 |
| 6.5 | RAPPRESENTAZIONE DEL TRAFFICO VEICOLARE | 80 |
| 6.6 | IL PROCESSO DI MICRO-SIMULAZIONE | 81 |
| 6.6.1 | <i>Generazione dei veicoli</i> | 81 |
| 6.6.2 | <i>Generare le caratteristiche guidatore-veicolo</i> | 82 |
| 6.6.3 | <i>Movimento del veicolo</i> | 83 |
| 6.6.4 | <i>Interazione fra i veicoli</i> | 85 |
| 6.6.4.1 | Il modello car-following | 85 |
| 6.6.4.2 | Il modello Lane Changing | 94 |
| 6.7 | CALIBRAZIONE DEL MODELLO DI MICRO SIMULAZIONE | 103 |
| 6.7.1 | <i>Obiettivi della calibrazione</i> | 104 |
| 6.7.2 | <i>Approccio alla calibrazione</i> | 105 |
| 6.7.3 | <i>Calibrazione in funzione della capacità</i> | 107 |
| 6.8 | IL MODELLO DI MICROSIMULAZIONE VISSIM | 109 |
| 6.9 | IL MODULO DI EMISSIONE IN VISSIM | 115 |
| 6.9.1 | <i>Livelli di emissioni dei veicoli (SCH file *.)</i> | 116 |
| 6.9.2 | <i>Tipo di veicolo</i> | 117 |
| 6.9.3 | <i>Mappe di emissione del motore</i> | 117 |
| 6.9.4 | <i>Valutazioni</i> | 118 |
| 6.9.5 | <i>Motore caldo Map File Format (*. KNF)</i> | 119 |
| 6.10 | INQUINAMENTO IN UN CANYON URBANO | 124 |
| 6.11 | IL MODELLO OSPM (OPERATIONAL STREET POLLUTION MODEL) | 127 |
| 7 | IL CASO STUDIO PER LA CALIBRAZIONE DEL MODELLO | 130 |
| 7.1 | DESCRIZIONE DELL'AREA STUDIO | 131 |
| 7.2 | METODOLOGIA DI RILIEVO DEI DATI DI TRAFFICO | 134 |
| 7.3 | I SENSORI AMBIENTALI | 136 |
| 7.4 | LA RETE DI RILEVAMENTO DELLE CENTRALINE AMIA | 139 |
| 7.5 | VALIDAZIONE DEI SENSORI | 143 |
| 7.6 | DATI RILEVATI DAI SENSORI "MOTE" | 147 |
| 7.7 | L'APPLICAZIONE DEL MODELLO VISSIM AL CASO STUDIO | 148 |
| 7.8 | VALIDAZIONE DEL MODELLO | 151 |
| 7.9 | SCENARI SIMULATI | 153 |
| 7.10 | PREVISIONI DEGLI INQUINANTI E RISULTATI | 154 |
| 8 | IL CASO STUDIO DI CASTELLAMMARE DEL GOLFO | 156 |
| 8.1 | PREMESSA | 156 |
| 8.2 | IL SITO OGGETTO DI STUDIO | 156 |
| 8.3 | LA CAMPAGNA DI RILIEVO | 158 |
| 8.4 | L'APPLICAZIONE DEL MODELLO VISSIM AL CASO STUDIO | 160 |
| 8.4.1 | <i>Modellizzazione delle intersezioni semaforizzate</i> | 161 |
| 8.4.2 | <i>Modellizzazione delle intersezioni non semaforizzate</i> | 161 |
| 8.4.3 | <i>Modellizzazione dei Flussi di traffico</i> | 164 |
| 8.5 | VALUTAZIONE DEI SCENARI SIMULATI | 180 |
| 8.6 | CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E DI PROSPETTIVA | 186 |
| 9 | CONCLUSIONI | 188 |
| 10 | BIBLIOGRAFIA | 193 |

Introduzione

Ognuno di noi ha ogni giorno a che fare con il sistema dei trasporti nei vari modi in cui si compone (strada, ferrovia, navigazione aerea, marittima e fluviale), utilizzando mezzi pubblici o privati. Quindi ognuno di noi è a contatto quotidianamente con i problemi relativi dei trasporti, in primis l'inquinamento dell'aria, causato soprattutto dai veicoli utilizzati nel trasporto stradale (automobili, autobus, veicoli per trasporto merci, motocicli). L'inquinamento dell'aria è responsabile di danni a carico dell'apparato respiratorio, soprattutto nelle persone affette da problemi respiratori (asma, allergie varie), e dell'effetto serra, causato principalmente dall'anidride carbonica, gas largamente presente nelle emissioni dei veicoli per il trasporto stradale.

L'inquinamento atmosferico prodotto dal sistema delle infrastrutture viarie, soprattutto dal trasporto su gomma, sia per la sua predominanza sulle altre modalità di trasporto, sia per il fatto che l'emissione di sostanze inquinanti è diffusa sull'intero territorio ed in particolare all'interno delle aree urbane, costituisce uno dei principali impatti sull'ambiente.

Una caratteristica dell'era moderna è l'incremento della mobilità, direttamente legata ad una sempre più crescente esigenza di spostamento e ad un raggiungimento delle condizioni generalizzate di diffuso benessere, che ha portato, in anni recenti, alle estreme condizioni il problema dell'inquinamento ambientale.

Lo sviluppo demografico, l'espansione delle grandi conurbazioni e l'accentramento dei servizi e attività nei centri urbani hanno favorito l'incremento e la concentrazione veicolare, sia spazialmente che temporalmente. Ciò ha provocato sempre più diffusi fenomeni di congestione e conseguentemente l'accentuarsi del deterioramento della qualità dell'aria.

Il conflitto paradossale tra lo sviluppo del sistema dei trasporti e la salvaguardia dell'ambiente, a partire dalle corrette e necessarie tutele poste a garanzia della salute pubblica, ha portato i dirigenti governativi comunitari a ridefinire i

parametri di tollerabilità degli agenti inquinanti e a promuovere politiche orientate ad una mobilità sostenibile.

La rilevanza del problema è ampiamente riconosciuta dalla Legislazione odierna, che esercita un'attività di controllo a priori sulle emissioni dei veicoli e a posteriori sulla concentrazione massima accettabile di alcuni inquinanti nell'aria.

In condizioni meteorologiche particolari, che possono verificarsi più volte nel corso dell'anno, le concentrazioni degli inquinanti superano le soglie di accettabilità consentite e ciò rende assolutamente necessaria l'utilizzo di provvedimenti di emergenza, quali la chiusura totale o parziale delle città al traffico su gomma privato.

Molto importante è l'obbligo per legge ai Comuni o agli Enti competenti di realizzare una rete di monitoraggio, attraverso l'uso di centraline automatiche situate in punti critici della città, in risposta all'esigenza di monitorare sistematicamente i livelli di inquinamento dell'atmosfera urbana, e quindi certificarne il rispetto, ovvero, il superamento degli standard di qualità dell'aria nel territorio interessato.

Nell'ambito di queste considerazioni di carattere generale, che si confermano anche nelle previsioni future sulla mobilità, lo studio di questa tesi si ripromette di approfondire le correlazioni esistenti tra il traffico veicolare e le concentrazioni di inquinanti nocivi ad esso associato in ambito prettamente urbano utilizzando i software di micro simulazione per la stima di quest'ultimi e cercando, attraverso l'ausilio di centraline messe a disposizione dall'università di Newcastle e testate con la rete di monitoraggio presente nella città, di calibrare il micro-simulatore utilizzato per il seguente lavoro.

La scelta di porre l'attenzione sulla viabilità urbana si deve alla rilevante incidenza che il traffico ha sulle attività umane, sia dal punto di vista connesso all'ambiente che dal punto di vista economico (perdita di tempo e di denaro) e sociale (per quanto concerne gli stili di vita, i comportamenti).

Il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico condotto per mezzo di centraline permette di conoscere in maniera molto precisa la concentrazione delle so-

stanze prese in considerazione e di effettuare confronti tra stazioni anche lontane tra loro.

Tale metodo, tuttavia, viene generalmente applicato per il rilevamento di un ristretto numero di sostanze (CO, SO₂, NO_x, COVNM - Composti Organici Volatili Non Metanici, O₃, polveri), rispetto alla molteplicità dei contaminanti immessi nell'atmosfera (ad es. composti aromatici, metalli pesanti, etc.). Inoltre, per loro natura, le reti non sono in grado di fornire informazioni relative a tutte le aree in cui non sono disponibili i misuratori o di stimare l'approssimarsi dell'evento critico.

In tale contesto si inserisce la problematica urgente di adottare una pianificazione dei trasporti nel solco di una più ampia pianificazione territoriale e urbanistica, volta ad implementare quei sistemi informatizzati di gestione e regolazione del traffico veicolare, al fine di incrementare i livelli di deflusso veicolare e innalzare la sicurezza e la qualità della vita dei soggetti coinvolti. Per un approccio più completo e sintetico della valutazione dello stato di degrado ambientale risulta particolarmente utile affiancare, alle reti suddette, strumenti di simulazione (modelli), che siano in grado di riprodurre l'emissione, il trasporto e la diffusione degli inquinanti in atmosfera.

Pertanto nell'ambito di queste considerazioni di carattere generale, lo studio di questa tesi si ripromette di approfondire e stimare, attraverso l'utilizzo di uno specifico software di microsimulazione, le emissioni inquinanti prodotte dal traffico veicolare in ambito prettamente urbano.

Premessa

Lo studio della tesi si inquadra nell'analisi delle complesse relazioni che regolano la dispersione degli inquinanti in ambito urbano, prodotti prevalentemente dal traffico veicolare, e partendo dal rilievo di dati di flusso veicolare (per un totale di più di 20 ore, nel periodo compreso tra i mesi di giugno e luglio 2009, e con un livello di dettaglio al minuto, nell'arco di intervalli temporali ricadenti prevalentemente nelle ore diurne), meteorologici e all'acquisizione dei dati sulle concentrazioni inquinanti mediante strumenti di misurazione ambientale, si è fatto ausilio di modelli di simulazione di traffico (microsimulazione) attentamente calibrati in un caso studio di Palermo e di modelli di dispersione degli inquinanti per analizzare in dettaglio le variazioni nelle concentrazioni inquinanti.

Nello specifico è stato scelto come area di studio per la calibrazione del software una sezione stradale posta in via Libertà (un asse viario principale della città di Palermo), nelle cui immediate vicinanze sono stati collocati due prototipi di sensori (le centraline dell'università di Newcastle) capaci di comunicare in tempo reale i livelli di inquinanti (monossido di carbonio e biossido di azoto) e rumore, oltre che temperatura ed umidità. L'installazione di tali sensori rientra nell'ambito di un progetto pilota tra l'Università di Newcastle, il Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti di Palermo ed il Comune di Palermo.

La decisione di porre il caso studio per la calibrazione del software nel tratto in esame è stata determinata sia dalla mera opportunità di utilizzare i dati provenienti dai sensori, sia dalla presenza di un attraversamento pedonale regolato mediante un semaforo pedonale a chiamata. Questo ci consentirà di calibrare il software analizzando diversi scenari variando le caratteristiche del semaforo.

L'integrazione dei dati di flusso veicolare e di quelli semaforici ha consentito di mettere in relazione caratteristiche di deflusso veicolare con le concentrazioni registrate dai sensori, in particolar modo per i livelli di monossido di carbonio. . In questo modo è stato possibile calibrare il software di micro simula-

zione sia da un punto di vista trasportistico (code, tempi di attraversamento) che dal punta di vista delle emissioni inquinanti.

1 Aspetti normativi

1.1 Premessa

Lo sviluppo economico, industriale e demografico avvenuto nel corso degli ultimi 200 anni, oltre ad un marcato miglioramento della qualità della vita ha contestualmente provocato dei profondi mutamenti nell'ambiente nel quale l'uomo vive, alterando, in alcuni casi, gli equilibri naturali.

Tutte le matrici ambientali sono state interessate negli ultimi 200 anni da forti pressioni antropiche: si pensi all'uso del suolo, sempre più occupato da insediamenti abitativi ed industriali, all'inquinamento delle acque, nelle quali sono state riversate enormi quantità di sostanze pericolose per la salute e il cui utilizzo indiscriminato ha generato problemi di siccità e, nel caso specifico, all'inquinamento dell'aria. Nell'atmosfera sono state riversate enormi quantità di sostanze inquinanti derivanti dalle attività industriali e residenziali dell'uomo.

Gli effetti dell'inquinamento atmosferico sulla salute umana, in particolare sulla mortalità complessiva, sono ormai conosciuti da anni, specie per l'enorme impatto sanitario di alcuni gravi episodi di inquinamento degli anni 30 – 50.

Emblematico fu il caso di Londra nel 1952, noto come “The Great Smog of London”: dal 5 all'8 dicembre 1952, grazie anche alla presenza di particolari condizioni meteorologiche, la capitale britannica fu avvolta da una coltre di smog (dall'inglese “smoke” = “fumo” + “fog” = “nebbia”) che provocò la morte di 4000 persone in una sola settimana.

Con ogni probabilità un evento di tali dimensioni non si ripeterà mai più nella storia, soprattutto grazie alle normative europee che regolano il fenomeno, ma è anche vero che ad oggi molte metropoli sono a rischio inquinamento soprattutto per le emissioni delle industrie e per l'elevato numero di automobili che quotidianamente emettono sostanze nocive per la salute dell'individuo.

Per questi motivi, ogni paese tenta di attuare una politica che possa contenere il problema, promuovendo iniziative che possono ridurre anche limitatamente gli effetti sulla salute dell'uomo. Una delle proposte più interessanti e curiose, avanzate da fisici e ingegneri di varie istituzioni scientifiche internazionali, è quella di verniciare i tetti delle case di bianco. Secondo un recente studio presentato dal Lawrence Berkeley National Laboratory, infatti, basterebbe dipingere i tetti di bianco in cento delle maggiori città del pianeta per ottenere un massiccio effetto di raffreddamento, politica già attuata nel 2005 dallo Stato della California. Si pensi anche a Città del Messico, una tra le città più inquinate del pianeta, che tenta di limitare gli effetti delle emissioni di gas serra trasformando i tetti degli edifici pubblici in veri e propri giardini in grado di assorbire anidride carbonica. Dunque quello dell'inquinamento atmosferico è un problema che interessa ogni grande città dell'intero pianeta.

1.2 Il fenomeno dell'emissione delle sostanze inquinanti

La tutela dell'ambiente nel suo complesso ed in particolare la corretta gestione della qualità dell'aria, che ne rappresenta uno degli aspetti principali, sono problematiche che sono sensibilmente cresciute di interesse in questi ultimi tempi. Se dapprima erano argomento di discussione per un ristretto gruppo di esperti della materia, con il tempo hanno coinvolto sempre più l'opinione pubblica, le autorità competenti e gli operatori industriali. La corretta gestione di tali problematiche, divenuta una realtà non ulteriormente procrastinabile, ha richiesto la predisposizione di adeguati strumenti di intervento in diversi settori, che vanno dalla normativa, alla strumentazione, alla modellistica. Prima di qualsiasi altra considerazione, è necessario tentare, se possibile, di definire in maniera più precisa alcuni concetti di base, come il concetto di *inquinata*, di *inquinamento* e di *qualità dell'aria*. Facendoci aiutare dal DPR 203/1988, dal DL 351/1999 e dal DM 60/2002 si può definire col termine **inquinamento dell'aria** “ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quanti-

tà e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni pubblici e privati " .

Questa definizione è inevitabilmente basata sugli effetti che la concentrazione delle varie sostanze chimiche ha nei confronti della salute, delle attività umane, della vita degli altri esseri viventi e della conservazione dei monumenti e delle bellezze naturali. Il *pregio* di una tale definizione è la sua *non polarizzazione* su un particolare effetto (non prevale infatti l'aspetto sanitario come nel passato). Il *lato negativo* è la sua *genericità* che rende tale definizione di per sé non operativa. Se la si prende comunque come riferimento, si deduce immediatamente che gli **inquinanti** altro non sono che quelle sostanze che concorrono a questa opera di alterazione del normale stato chimico-fisico dell'aria, anche se è molto vago l'aggettivo *normale*. Viene in soccorso a questo insieme di concetti difficilmente applicabili nella pratica corrente, il concetto di **stato di qualità dell'aria**. In pratica con questo termine si indica la *quantizzazione del concetto di inquinamento*. E' proprio lo stato di qualità dell'aria il tema delle norme che si riferiscono al controllo dell'inquinamento dell'aria ed al suo risanamento e per la sua definizione si parte da una serie di ipotesi *a priori* che l'edificio normativo, tipico di ogni nazione, pone all'inizio di tutto. La definizione di qualità dell'aria parte dalla definizione di un elenco di sostanze chimiche che vengono definite come inquinanti. L'inquinamento atmosferico è un complesso di effetti nocivi che si ripercuotono sulla biosfera e quindi sull'uomo, dipendenti dall'azione di fattori di alterazione (inquinanti) degli equilibri esistenti, liberati per lo più come sottoprodotti dell'attività umana nell'aria.

L'inquinamento atmosferico può essere definito come la presenza in atmosfera di sostanze che nella naturale composizione dell'aria non sono presenti o sono presenti ad un livello di concentrazione inferiore, e che producono un effetto misurabile sull'uomo, sugli animali, sulla vegetazione o i materiali.

L'aria è una miscela eterogenea di gas costituita da particelle che hanno varia natura e dimensione, la cui composizione varia nel tempo e nello spazio secondo fenomeni naturali.

Il susseguirsi di eventi meteorologici rende lo studio della qualità dell'aria altamente aleatorio e impedisce di definire univocamente le proprietà caratteristiche di un ambiente incontaminato.

La concentrazione degli inquinanti nell'atmosfera è determinata non solo dal numero e dall'intensità delle sorgenti di inquinamento, dalla distanza da tali sorgenti e dalle trasformazioni chimico-fisiche cui vengono sottoposti, ma soprattutto dalle condizioni meteorologiche locali (per i fenomeni di inquinamento a scala locale) e dalle condizioni meteorologiche locali e a grande scala (per i fenomeni di inquinamento a grande distanza dalle sorgenti), che spesso costituiscono il parametro chiave per la comprensione della genesi, dell'entità e dello sviluppo nel tempo di un evento di inquinamento atmosferico.

Per i fenomeni di inquinamento a scala locale l'influenza maggiore sul trasporto e la diffusione atmosferica degli inquinanti è dovuta all'intensità del vento, alle condizioni di turbolenza (meccanica e termodinamica) dei bassi strati atmosferici ed ad effetti meteorologici particolari quali le brezze (di mare o di monte), all'incanalamento del vento in valli strette, o nelle strade delle zone urbane, ecc. Per i fenomeni di inquinamento a grande scala, l'influenza maggiore sul trasporto e sulla diffusione degli inquinanti è dovuta alle variazioni del vento con la quota (shear del vento) e alla turbolenza determinata dalle aree cicloniche e anticicloniche.

In genere, a parità di emissione di inquinanti dalle sorgenti, le concentrazioni in aria a piccola scala (zone urbane, zone industriali, ecc.) sono minori quando il vento è moderato o forte e l'atmosfera è instabile nei bassi strati, oppure quando il vento è debole o assente ma vi è forte insolazione con cielo sereno e sole alto sull'orizzonte. Viceversa, le concentrazioni diventano elevate quando vi è inversione del gradiente termico verticale o in condizioni di alta pressione di notte e con vento debole, oppure in condizioni di nebbia persistente che provoca processi di accumulo.

Si introduce pertanto al fine di stabilire uno standard qualitativo convenzionale per la qualità dell'aria, il concetto di inquinamento atmosferico, che trova nel riferimento normativo una validità generale applicabile secondo le attuali disposizioni di legge.

In tal senso si fa riferimento ai limiti nelle concentrazioni di agenti inquinanti i cui effetti possano essere nocivi per l'uomo e gli ecosistemi.

Come definito all'art.2 del DPR 203/88, per inquinamento atmosferico si intende ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni materiali pubblici e privati.

Nel quantificare il "grado di inquinamento" atmosferico è importante distinguere le emissioni dalle concentrazioni di sostanze inquinanti. Per **emissione** si intende la quantità di sostanza inquinante introdotta in atmosfera, da una certa fonte inquinante e in un determinato arco di tempo; generalmente essa viene espressa in tonnellate/anno.

Per **concentrazione** si intende invece la quantità di sostanza inquinante presente in atmosfera per unità di volume; generalmente essa viene espressa in g/mc e viene utilizzata per esprimere valori di qualità dell'aria.

Nell'atmosfera la presenza di tali sostanze è da ricondurre a due fenomeni: l'emissione e la dispersione.

Il primo rimanda alle sorgenti generatrici che sono di tipo artificiale o naturale, tra cui quelle riconducibili all'uomo assumono una rilevanza maggiore, in quanto favoriscono le concentrazioni di inquinanti in ambito ristretto.

La dispersione o diffusione invece riguarda le interazioni tra inquinanti dovute a complessi fenomeni fisico-chimici che ne rideterminano la distribuzione spaziale e l'evoluzione temporale.

Un **inventario delle emissioni** (o banca dati delle emissioni) è un insieme di dati di emissione in atmosfera degli inquinanti provenienti da attività antropiche e da sorgenti naturali, e delle informazioni necessarie per la loro stima e disaggregazione (spaziale e temporale).

Perché un inventario delle emissioni sia efficace, non deve essere semplicemente una fotografia della situazione emissiva di un certo anno in una data unità territoriale (come ad esempio una regione), ma deve essere aggiornabile senza bisogno di cambiare il supporto informatico ad ogni edizione.

L'intensità dell'emissione è definita in termini di quantità di sostanza emessa per unità di spazio e per unità di tempo da una sorgente elementare.

Dal punto di vista della loro intensità ed estensione le sorgenti di emissione si distinguono in: puntuali, lineari ed areali(diffuse).

Le *emissioni areali* sono le emissioni non localizzabili, ma distribuite sul territorio (per questo sono anche chiamate emissioni areali, in inglese area sources). La stima è effettuata tramite una relazione lineare, una volta individuati in modo opportuno gli indicatori e i fattori di emissione.

Le sorgenti areali sono costituite dall'unione di un insieme di sorgenti puntuali o lineari, concentrate nello spazio in un'area circoscritta, la cui intensità è piccola comparata con quella dell'area stessa considerata come sorgente unitaria.

Esempi di sorgenti areali sono i grossi centri industriali, i sistemi di riscaldamento domestico delle città e le reti stradali urbane.

Le *emissioni puntuali* sono sorgenti di inquinamento atmosferico localizzabili geograficamente con precisione (ad esempio tramite coordinate Gauss-Boaga).

La stima è effettuata a partire dai dati misurati in loco e raccolti per mezzo di un apposito censimento. Non sempre un inquinante è soggetto a misure in questi impianti, in tal caso le emissioni corrispondenti vengono stimate per mezzo della stessa formula usata per le emissioni diffuse. Si capisce quindi l'importanza di conoscere anche gli indicatori delle sorgenti puntuali.

Esempi del tipo puntuale sono le industrie e gli impianti di generazione dell'energia che sono caratterizzati dall'aver una dimensione trascurabile ri-

spetto all'intensità della loro emissione e all'area geografica direttamente interessata.

Le *emissioni lineari* sono sorgenti assimilabili a linee, come ad esempio le strade. La stima viene effettuata anche in questo caso tramite l'uso di opportuni indicatori e fattori di emissione, ma si rende necessaria l'applicazione di metodologie dettagliate molto complesse.

Le sorgenti lineari sono costituite da un insieme di sorgenti puntuali e distribuite lungo una linea, la cui intensità è da considerarsi piccola in relazione all'estensione della linea stessa.

Ad esempio il singolo veicolo estrapolato da un contesto viario si può ritenere una sorgente puntuale, diversamente l'insieme dei veicoli che percorrono una strada si considera come una sorgente lineare che agisce da singola unità funzionale.

1.3 Sostanze inquinanti in ambito urbano

Il traffico stradale è una delle principali fonti di inquinamento ed assume un maggiore rilievo in ambito urbano, laddove l'elevata congestione produce emissioni più elevate e l'esposizione della popolazione agli inquinanti è maggiore, data l'elevata densità di popolazione.

Il tenore di vita nei centri abitati è fortemente influenzato dal valore ambientale delle componenti dell'ecosistema urbano: aria, acqua, rumore, disponibilità di verde pubblico.

La qualità dell'ambiente atmosferico nelle nostre città è sicuramente condizionata dalla presenza del **traffico autoveicolare**: è un dato di fatto che molti degli inquinanti presenti nell'aria siano una diretta conseguenza delle emissioni prodotte dal traffico automobilistico urbano.

Le principali sostanze inquinanti emesse dal traffico veicolare sono il monossido di carbonio (formula chimica: CO), il biossido di azoto (formula chimica NO₂), il **benzene** (formula chimica C₆H₆), gli idrocarburi policiclici aromatici

(noti come IPA). Ad essi si aggiunge il Particolato aerodisperso, meglio noto come PM (*Particulate Matter*), costituito da un insieme di particelle molto piccole (liquide, solide e aerosol) presenti nell'atmosfera.

Le particelle vengono classificate secondo il diametro aerodinamico: il PM₁₀ include tutte le particelle di dimensioni molecolari fino a 10 micrometri di diametro e il PM_{2,5} comprende tutte le particelle "fini", di diametro fino a 2.5 micrometri. Si definisce inoltre particolato "primario" quello le cui particelle sono emesse direttamente nell'atmosfera, provenendo da fonti come i veicoli, gli impianti industriali, i cantieri, le combustioni del legno. Le particelle "secondarie", invece, hanno origine da processi di trasformazione chimica e di condensazione delle sostanze gassose primarie e sono costituite principalmente da solfati e nitrati, derivati dalle reazioni di SO₂ e NO_x con l'ammoniaca.

La composizione chimica delle particelle è estremamente variabile e dipende dal luogo, dal periodo dell'anno e dal clima. In generale, il PM grossolano si compone in gran parte di particelle primarie ed il PM fine contiene soprattutto particelle secondarie.

Questi inquinanti sono monitorati quotidianamente nei centri urbani presso alcune stazioni di monitoraggio fisse e mobili, al fine di garantire la salvaguardia della salute pubblica e dell'ambiente.

Le emissioni prodotte dalla combustione interna dei motori rappresentano un grave pericolo per le popolazioni coinvolte, in particolar modo laddove la densità dei veicoli per abitante è considerevole.

Il grado di esposizione è assai elevato a causa della bassa altezza da terra alla quale le sostanze inquinanti vengono rilasciate dai veicoli.

In base alla loro tipologia si hanno tre tipi di emissioni: quelle allo scarico, le evaporative e quelle derivanti dal consumo di materiali (usura dei pneumatici e dei freni).

Una ulteriore precisazione va fatta in relazione alla tipologia di carburante utilizzato: le autovetture alimentate a gasolio emettono prevalentemente ossidi di zolfo (SO₂) e particolato costituito in prevalenza da particelle carboniose e sol-

fati, diversamente dai motori a benzina che emettono monossido di carbonio (CO) ed idrocarburi aromatici.

1.4 Normativa in vigore

“Il sesto programma comunitario di azione in materia di ambiente, adottato con la decisione n. 1600/2002/CE del Parlamento europeo e del Consiglio del 22 luglio 2002, sancisce la necessità di ridurre l’inquinamento a livelli tali che limitino al minimo gli effetti nocivi per la salute umana, con particolare riferimento alle popolazioni sensibili, e per l’ambiente nel suo complesso, di migliorare le attività di monitoraggio e valutazione della qualità dell’aria, compresa la deposizione degli inquinanti, e di informare il pubblico.

Ai fini della tutela della salute umana e dell’ambiente nel suo complesso, è particolarmente importante combattere alla fonte l’emissione di inquinanti nonché individuare e attuare le più efficaci misure di riduzione delle emissioni a livello locale, nazionale e comunitario. È opportuno pertanto evitare, prevenire o ridurre le emissioni di inquinanti atmosferici nocivi e definire adeguati obiettivi per la qualità dell’aria ambiente che tengano conto delle pertinenti norme, orientamenti e programmi dell’Organizzazione mondiale della sanità.”¹

Con riferimento a questi precipui obiettivi la più recente direttiva in vigore è la **2008/50/CE** del Parlamento Europeo e del Consiglio, relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa.

Ai fini di una maggiore semplificazione ed efficienza amministrativa essa riasume e sostituisce le cinque precedenti direttive: la direttiva 96/62/CE in materia di valutazione e di gestione della qualità dell’aria ambiente, la direttiva 1999/30/CE, concernente i valori limite di qualità dell’aria ambiente per il bi-

¹ Fonte: Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 Maggio 2008 relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa.

ossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo, la direttiva 2000/69/CE, concernente i valori limite per il benzene ed il monossido di carbonio nell'aria ambiente, la direttiva 2002/3/CE, relativa all'ozono nell'aria, e la decisione 97/101/CE, che instaura uno scambio reciproco di informazioni e di dati provenienti dalle reti e dalle singole stazioni di misurazione dell'inquinamento atmosferico negli Stati membri.

La normativa fissa dei valori di soglia relativi ai livelli di concentrazione inquinante.

Tra di essi il *livello critico* rappresenta quel fissato livello al di sopra del quale possono insorgere effetti negativi diretti sugli ecosistemi naturali e la flora ad esclusione dell'uomo.

Il *valore limite* rappresenta il massimo livello in termini di accettabilità delle concentrazioni e di esposizione relativi ad inquinanti che deve essere raggiunto entro un termine stabilito e in seguito non deve essere superato.

La *soglia di allarme* costituisce il livello delle concentrazioni tali da determinare uno stato di allarme, ovvero una situazione di inquinamento atmosferico che, qualora persista, determina una potenziale condizione di superamento dei valori limite di qualità dell'aria e quindi, di rischio immediato per la popolazione.

Infine il *valore obiettivo* e l'*obiettivo a lungo termine* rientrano nei *piani per la qualità dell'aria* e fissano i valori delle concentrazioni di inquinante cui si deve tendere nel breve e nel lungo periodo al fine di garantire un efficace protezione della salute umana e dell'ambiente.

Nell'allegato XI, *Valori limite per la protezione della salute umana*, e nell'allegato XII, *Soglie di informazione e di allarme*, si trova conferma di quanto esposto.

B. Valori Limite

| Periodo di mediazione | Valore limite | Margine di tolleranza | Data entro la quale il valore limite deve essere raggiunto |
|--|---|--|--|
| Biossido di zolfo | | | |
| 1 ora | 350 µg/m ³ , da non superare più di 24 volte per anno civile | 150 µg/m ³ (43 %) | — (1) |
| 1 giorno | 125 µg/m ³ , da non superare più di 3 volte per anno civile | Nessuno | — (1) |
| Biossido di azoto | | | |
| 1 ora | 200 µg/m ³ , da non superare più di 18 volte per anno civile | 50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 |
| Anno civile | 40 µg/m ³ | 50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 |
| Benzene | | | |
| Anno civile | 5 µg/m ³ | 5 µg/m ³ (100 %) il 13 dicembre 2000, con una riduzione il 1° gennaio 2006 e successivamente ogni 12 mesi di 1 µg/m ³ fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010 | 1° gennaio 2010 |
| Monossido di carbonio | | | |
| Media massima giornaliera calcolata su 8 ore (2) | 10 mg/m ³ | 60 % | — (1) |

| Periodo di mediazione | Valore limite | Margine di tolleranza | Data entro la quale il valore limite deve essere raggiunto |
|------------------------|--|-----------------------|--|
| Piombo | | | |
| Anno civile | 0,5 µg/m ³ ⁽³⁾ | 100 % | — ⁽³⁾ |
| PM₁₀ | | | |
| 1 giorno | 50 µg/m ³ , da non superare più di 35 volte per anno civile | 50 % | — ⁽¹⁾ |
| Anno civile | 40 µg/m ³ | 20 % | — ⁽¹⁾ |

(¹) Già in vigore dal 1° gennaio 2005.

(²) La massima concentrazione media giornaliera su 8 ore sarà determinata esaminando le medie consecutive su 8 ore, calcolate in base a dati orari e aggiornate ogni ora. Ogni media su 8 ore così calcolata sarà assegnata al giorno nel quale finisce; in pratica, la prima fascia di calcolo per ogni singolo giorno sarà quella compresa tra le ore 17:00 del giorno precedente e le ore 01:00 del giorno stesso; l'ultima fascia di calcolo per ogni giorno sarà quella compresa tra le ore 16:00 e le ore 24:00 del giorno stesso.

(³) Già in vigore dal 1° gennaio 2005. Valore limite da soddisfare soltanto entro il 1° gennaio 2010 nelle immediate vicinanze delle specifiche fonti industriali localizzate in siti contaminati da decenni di attività industriali. In tali casi il valore limite fino al 1° gennaio 2010 sarà di 1,0 µg/m³. L'area in cui si applicano valori limite superiori non deve estendersi per più di 1 000 m da tali fonti specifiche.

SOGLIE DI INFORMAZIONE E DI ALLARME

A. Soglie di allarme per inquinanti diversi dall'ozono

Le soglie devono essere misurate su tre ore consecutive in siti rappresentativi della qualità dell'aria su almeno 100 km² oppure in una zona o un agglomerato interi, se tale zona o agglomerato sono meno estesi.

| Inquinante | Soglia di allarme |
|-------------------|-----------------------|
| Biossido di zolfo | 500 µg/m ³ |
| Biossido di azoto | 400 µg/m ³ |

Nell'allegato XIV denominato *Obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione, valore-obiettivo e valore limite per il PM_{2,5}* si introduce l'indicatore di esposizione media (IEM), espresso in µg/m³, che definisce per anno il valore di concentrazione media ricavato sui tre anni consecutivi precedenti l'anno in questione.

Ad esempio per l'anno 2020 l'IEM è dato dalla concentrazione media su tre anni consecutivi (2018, 2019 e 2020) ricavata dalla media di tutti questi punti di campionamento.

L'IEM è utilizzato per esaminare se l'obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione è raggiunto.

Obbligo di concentrazione dell'esposizione

| Obbligo di concentrazione dell'esposizione | Anno entro il quale deve essere rispettato tale obbligo |
|--|---|
| 20 µg/m ³ | 2015 |

Valore-obiettivo

| Periodo di mediazione | Valore-obiettivo | Data entro la quale dovrebbe essere raggiunto il valore-obiettivo |
|-----------------------|----------------------|---|
| Anno civile | 25 µg/m ³ | 1° gennaio 2010 |

Valore limite

| Periodo di mediazione | Valore limite | Margine di tolleranza | Data entro la quale deve essere raggiunto il valore limite |
|-----------------------|----------------------|--|--|
| FASE 1 | | | |
| Anno civile | 25 µg/m ³ | 20 % l'11 giugno 2008, con riduzione il 1° gennaio successivo e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2015 | 1° gennaio 2015 |
| FASE 2 ⁽¹⁾ | | | |
| Anno civile | 20 µg/m ³ | | 1° gennaio 2020 |

⁽¹⁾ Fase 2 — valore limite indicativo che la Commissione deve verificare nel 2013, alla luce di ulteriori informazioni in materia di conseguenze sulla salute e sull'ambiente, fattibilità tecnica ed esperienza del valore obiettivo negli Stati membri.

2 Gli inquinanti atmosferici

2.1 Premessa

L'aria è una miscela eterogenea formata da gas e particelle di varia natura e dimensioni. La sua composizione si modifica nello spazio e nel tempo per cause naturali e non, cosicché risulta arduo definirne le caratteristiche di qualità. L'inquinamento atmosferico è quel fenomeno per il quale particelle estranee alla composizione naturale dell'atmosfera e nocive per il benessere o la salute umana sono presenti nell'atmosfera con diversi livelli di concentrazione.

L'inquinamento atmosferico può essere sia di origine "naturale", per i fenomeni collegati ad attività vulcaniche, incendi boschivi, attività geotermiche, ecc., che "artificiale", attribuibile ad attività antropiche; questa seconda forma di inquinamento, tranne che in casi eccezionali, è prevalente ed è maggiormente presente laddove maggiore è la concentrazione di residenze ed attività umane. Le attività antropiche principali responsabili dell'inquinamento dell'aria sono le industrie, i trasporti, le attività domestiche e gli impianti per la produzione di energia (centrali termoelettriche).

La misura dell'inquinamento atmosferico avviene generalmente in funzione della concentrazione nell'atmosfera di sostanze inquinanti (ad esempio in ppm o g/mc); i livelli di concentrazione dipendono dal quantitativo di emissione di agenti inquinanti dalle varie sorgenti e dai successivi processi di dispersione in atmosfera delle sostanze inquinanti, funzione delle condizioni meteorologiche (frequenza delle piogge, venti, temperature, ecc.). Il vento, in particolare, influenza sia la dispersione degli inquinanti in atmosfera che il fenomeno della risospensione delle polveri.

L'impossibilità di individuare le proprietà di un ambiente incontaminato di riferimento induce ad introdurre il concetto di *inquinamento atmosferico* stabilendo uno standard convenzionale per la qualità dell'aria. Si ritiene quindi inquinata l'aria la cui composizione eccede limiti stabiliti per legge allo scopo di

evitare effetti nocivi sull'uomo, sugli animali, sulla vegetazione, sui materiali, relative alla caratterizzazione delle diverse "dimensioni" del rischio nelle città. o sugli ecosistemi in generale, e si definiscono *sostanze inquinanti* le sostanze responsabili dell'inquinamento atmosferico. La composizione dell'aria viene descritta in termini di *concentrazione* delle sostanze presenti in atmosfera, dove per concentrazione si intende la quantità di sostanza presente in una porzione unitaria di aria.

I fenomeni di inquinamento sono il risultato di una complessa competizione tra fattori che portano ad un accumulo degli inquinanti ed altri che invece determinano la loro rimozione e la loro diluizione in atmosfera. L'entità e le modalità di emissione (sorgenti puntiformi, diffuse, altezza di emissione, ecc.), i tempi di persistenza degli inquinanti, il grado di mescolamento dell'aria, sono alcuni dei principali fattori che producono variazioni spaziotemporali della composizione dell'aria. I principali meccanismi di rimozione possono essere di tipo fisico (lavaggi dovuti alle piogge, adsorbimento su solidi o nel terreno, assorbimento nei diversi sistemi idrici), di tipo biologico (reazioni prodotte dalla respirazione delle piante e dei batteri presenti nei terreni), e di tipo chimico (reazioni chimiche semplici, catalitiche o fotochimiche). Non sempre l'evoluzione chimica degli inquinati va nel senso di favorire la riduzione dell'inquinamento, talvolta i prodotti delle trasformazioni sono più nocivi di quelli originari.

2.2 Le sostanze inquinanti

Gli inquinanti atmosferici possono essere classificati in diversi modi. Il primo metodo di classificazione riguarda il loro stato fisico: esso può essere gassoso, liquido o solido.

Le sostanze allo stato liquido possono presentarsi sottoforma sia di vapori che di particelle liquide (goccioline), quello allo stato solido unicamente nelle forma di particelle solide. I vapori formano soluzioni in area che in pratica si comportano allo stesso modo dei gas seguendo con buona approssimazione le leggi dei gas ideali. Le sostanze, liquide o solide, presenti nella forma di parti-

celle formano invece sospensioni in area che in generale prendono il nome di sospensioni di particelle o *particolato*.

Un' altra classificazione molto utile delle sostanze inquinanti dell'aria è quella che riguarda la loro genesi. In base alla loro origine, le sostanze inquinanti possono essere distinte in:

- inquinanti primari, se sono emesse direttamente in atmosfera;
- inquinanti secondari, se si formano nell'atmosfera a partire dagli inquinanti primari, in conseguenza di reazioni chimiche.

In base al livello di nocività ed alla durata del fenomeno inquinante, si distinguono due tipologie di inquinamento:

- acuto, se la concentrazione di sostanze inquinanti è elevata per un breve periodo di tempo;
- cronico, se la concentrazione di sostanze inquinanti è più modesta, ma persiste per lunghi periodi di tempo.

Le due tipologie hanno effetti diversi e provocano danni diversi alla salute umana. Le sostanze prese in considerazione saranno esaminate raggruppandole in composti organici e non organici. Per la particolare importanza che rivestono nelle dinamiche di inquinamento dell'aria, questi ultimi saranno a loro volta classificati in fotochimici (reagenti in atmosfera a causa della radiazione) e non fotochimici.

I principali inquinanti prodotti dal funzionamento dei sistemi di trasporto sono, come composti organici, il monossido di carbonio (CO), l'anidride carbonica (CO₂), gli idrocarburi (HC), in particolare quelli non metanici (NMHC) e quelli policiclici aromatici (IPA), i composti organici nella forma di particolato (PTS). I composti non organici fotochimici sono gli ossidi di azoto (NO_x), l'ozono (O₃) ed altri composti fotochimici. I composti non organici non fotochimici sono gli ossidi di zolfo (SO_x), il piombo (Pb) e i suoi composti.

In particolare i veicoli dotati di motore a benzina sono un'importante sorgente di emissioni di idrocarburi e ossidi di azoto, e la causa principale degli alti livelli di emissione di monossido di carbonio nelle aree urbane. I veicoli a moto-

re diesel sono invece importanti sorgenti di emissioni di particolato, idrocarburi e ossidi di azoto.

Uno degli agenti inquinanti responsabile dei maggiori danni alla salute umana è il particolato o polveri sottili, che viene monitorato con apposite centraline in quasi tutte le principali città italiane.

2.3 Inquinanti primari ed inquinanti secondari

La possibilità che gli inquinanti reagiscano porta a distinguere tra **inquinanti primari**, emessi direttamente in atmosfera, ed **inquinanti secondari** che si originano nell'aria per trasformazione chimica. Gli inquinanti primari possono essere di tipo gassoso o particellare. Tra i gas si segnalano in particolare:

- composti dello zolfo (SO_2 , H_2S);
- composti dell'azoto (NO , NH_3);
- composti del carbonio (idrocarburi, HC , CO);
- composti alogenati (HCl , HF , HBr , CFC);

Il particolato si classifica in ragione del diametro delle particelle: si considerano grossolane quelle con diametro maggiore di $2.5 \mu\text{m}$ e fini quelle con diametro minore di $2.5 \mu\text{m}$. Si distinguono, inoltre, come inalabili le particelle con diametro minore di $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}).

I principali inquinanti secondari di tipo gassoso sono:

- NO_2 formato da NO primario;
- O_3 formato per via fotochimica.

Entrambi questi gas intervengono nei complessi meccanismi di reazione che costituiscono il cosiddetto 'smog fotochimico'.

Il particolato secondario può derivare da reazioni chimiche e chimico-fisiche che coinvolgono inquinanti gassosi sia primari che secondari. I più noti processi sono:

- la trasformazione di SO_2 in solfati, SO_4^- ;
- la trasformazione di NO_2 in nitrati, NO_3^- ;

- la trasformazione di composti organici in particelle organiche.

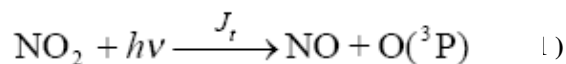
Naturalmente gli inquinanti atmosferici, sia primari che secondari, si caratterizzano per la loro grande mobilità indotta dal trasporto convettivo (avvettivo) e dispersivo. A tale riguardo il particolato inalabile si comporta come un gas, mentre quello di diametro superiore segue traiettorie balistiche dominate dalla forza di gravità.

2.4 Lo smog fotochimico

Il termine “smog fotochimico” indica un insieme di processi che coinvolgono ozono, ossidi di azoto e composti organici volatili. Essenziale per l’innesco delle reazioni è la presenza di radiazione solare.

I primi casi di smog fotochimico vennero segnalati negli anni ‘40 a Los Angeles, ma è solo negli ultimi tempi che l’attenzione rivolta ai problemi di inquinamento secondario è andata aumentando, essendosi resa sempre più manifesta la loro importanza da un punto di vista sanitario e la loro larga diffusione territoriale. Lo smog fotochimico si manifesta con una leggera foschia di colore giallo-marrone che può provocare irritazione agli occhi e disturbi respiratori. Altri effetti sull’ambiente riguardano possibili danni alla vegetazione (riduzione della produttività delle colture) ed alle cose (rapido deterioramento delle superfici e dei materiali). La formazione degli inquinanti secondari che compongono lo smog fotochimico è complessa perché la loro evoluzione temporale e la loro distribuzione spaziale dipendono dalle masse d’aria che contengono gli inquinanti precursori e che sono sede dei processi di trasformazione. Gli episodi critici possono perciò non essere circoscritti alle zone e ai tempi prossimi alle emissioni dei precursori, ma interessare aree e periodi molto ampi. Lo smog fotochimico è generalmente importante d’estate, quando, a causa del ruolo assunto dalla radiazione solare nel sistema di reazioni chimiche di base, più frequentemente si superano i limiti di legge per l’ozono, principale tracciatore del processo.

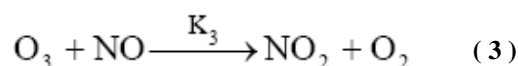
La produzione di ozono in troposfera ha inizio dalla fotolisi del biossido d’azoto in monossido di azoto e ossigeno atomico:



seguita dalla combinazione di quest'ultimo con ossigeno atmosferico:



L'ozono e il monossido di azoto così prodotti si combinano rapidamente per riformare biossido di azoto:



In un'atmosfera non inquinata le reazioni (1-3) costituiscono il ciclo giornaliero di base dell'ozono: durante le ore diurne la fotolisi dell' NO_2 corrisponde alla produzione di O_3 e di NO , mentre, non appena la radiazione solare diminuisce nel tardo pomeriggio, si riforma l' NO_2 . Lo stato pseudo-stazionario che viene raggiunto dalle tre specie è espresso dalla relazione:

$$\frac{J_t}{K_3} = \frac{[\text{NO}][\text{O}_3]}{[\text{NO}_2]} \quad (4)$$

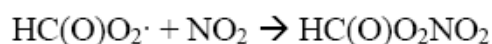
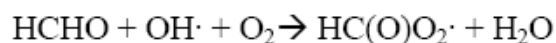
In atmosfere inquinate il ciclo (1-3) non è in grado di giustificare le quantità di ozono che effettivamente si misurano. La fotolisi dell' NO_2 è comunque l'unico meccanismo noto per la produzione di ozono; una crescita netta di quest'ultimo può quindi avvenire solo se NO_2 è formato in eccesso rispetto al ciclo (1-3). D'altra parte l' NO_2 è un inquinante secondario, gli ossidi di azoto emessi durante i processi di combustione sono infatti per il 95% costituiti da NO (Seinfeld, 1986). L'eccesso di NO_2 è dunque originato da una serie di reazioni a catena che coinvolgono radicali liberi, soprattutto il radicale ossidrilico ($\text{OH}\cdot$), idroperossido ($\text{OH}_2\cdot$) e alchilperossido ($\text{RO}_2\cdot$), che sono responsabili della conversione di NO in NO_2 senza il consumo di ozono e dunque in violazione dell'equilibrio (4). Questi radicali, a loro volta, hanno origine dalla scis-

sione di idrocarburi, rilasciati in atmosfera come solventi, carburanti incombusti o da altre sorgenti inquinanti.

I meccanismi delle reazioni coinvolte nel fenomeno dello smog fotochimico sono molto complessi e risulta molto difficile individuare l'evoluzione delle numerose sostanze che entrano in gioco.

I fenomeni di maggior rilievo nel sistema sono la conversione di NO in NO₂, la formazione di una varietà di composti contenenti azoto, come l'acido nitrico e i nitrati perossiacilici (tra cui il PAN, cioè il perossiacetilnitrato) e l'accumulo di O₃. NO₂ funge sia da iniziatore che da terminatore della catena di reazioni che porta alla conversione di NO in NO₂ e alla sintesi di O₃. La terminazione della catena di reazioni produce acido nitrico e nitrati organici (Seinfeld, 1986).

Negli ultimi tempi, un altro indicatore di smog fotochimico, più specifico dell'ozono, è stato individuato nel PAN. Il perossiacetilnitrato, infatti, possiede il vantaggio, rispetto all'ozono, di non essere prodotto in quantità significative da sorgenti naturali. Il PAN proviene dalla reazione tra biossido d'azoto e l'acetilperossido, a sua volta derivato dalla reazione dell'acetaldeide con il radicale OH·:



La pericolosità ambientale del PAN è associata alla sua persistenza: esso tende ad accumularsi nelle zone più alte e fredde della troposfera da dove diffonde verso le zone sottostanti più calde, dissociandosi termicamente con produzione di radicali e NO₂. Tale comportamento è dovuto al fatto che la costante di dissociazione del PAN dipende fortemente dalla temperatura e che i processi di rimozione del PAN, alternativi alla decomposizione termica, sono molto lenti. Pertanto il PAN costituisce una riserva stabile negli strati più freddi della media e alta troposfera sia di NO_x, sia di radicali iniziatori di reazioni secondarie (Mohnen *et al.*, 1993).

2.5 Flussi veicolari ed emissioni inquinanti

Le emissioni di agenti inquinanti prodotte dal traffico veicolare sono correlate alle caratteristiche del flusso di traffico che impegna una determinata infrastruttura stradale; le caratteristiche fondamentali sono:

- la composizione del parco veicolare, in quanto le diverse tipologie di veicoli producono diverse emissioni specifiche al variare della cilindrata, del tipo di veicolo e delle normative europee sulle emissioni che rispettano (Euro 0, ..., Euro 5);
- l'entità del flusso di traffico;
- le condizioni del deflusso, in particolare rappresentate dalla velocità media del flusso di traffico su un determinato arco stradale.

I modelli di stima delle emissioni di agenti inquinanti dal traffico veicolare maggiormente utilizzati a livello internazionale sono i modelli Corinair (2007), che stimano le emissioni per veic-km di diverse tipologie di agenti inquinanti e di gas serra per numerose categorie di veicoli suddivisi per tipologia, cilindrata, tipologia di alimentazione (benzina, gasolio, GPL) e per tipologia di norma anti inquinamento. Prendendo in esame l'andamento delle funzioni di emissione per veic-km al variare della velocità media del flusso, si può notare che le emissioni maggiori si registrano a velocità basse, laddove prevale l'effetto della congestione, e a velocità elevate, laddove prevale il maggior consumo di carburante. Si noti pure come in ambito urbano, dove le velocità medie non superano generalmente i 50 km/h, la funzione di emissione sia decrescente con la velocità, per cui la fluidificazione del traffico, con conseguente aumento della velocità media è l'obiettivo da raggiungere per poter ridurre le emissioni, insieme con la riduzione dell'uso dell'autovettura.

2.6 La regolamentazione della qualità dell'aria

Gli interventi normativi sulla qualità dell'aria sono mirati a limitare i livelli di rischio connessi alla presenza di concentrazioni inquinanti

nell'ecosistema. Rispetto ai vincoli sull'emissione sanciti dalle normative di omologazione dei veicoli, i regolamenti sulla qualità dell'aria agiscono quindi in un modo prettamente mirato a controllare i livelli reali di inquinamento. La definizione delle norme sulla qualità dell'aria dovrebbe tener conto, per ogni sostanza considerata, dei legami esistenti tra le entità delle concentrazioni inquinanti presenti nell'atmosfera e gli effetti da esse prodotti sulla salute umana e sull'ecosistema in generale. Tali legami sono tuttavia estremamente complessi ed allo stato attuale scarsamente conosciuti, per cui l'approccio normativo si limita alla specifica, per ogni sostanza inquinante, di uno o più *livelli di concentrazione ammissibili* (o *standard di qualità dell'aria*). Il livello ammissibile di una certa sostanza inquinante è definibile come quel livello di concentrazione al di sotto del quale si può presumere che la sostanza stessa non causi effetti sufficientemente dannosi da giustificare azioni correttive, ed allo stato attuale viene determinato sulla base delle conoscenze scientifiche in campo medico oltre che da misure ed indagini sperimentali.

In Italia il problema della tutela della qualità dell'aria in relazione ai contributi inquinanti dovuti al traffico stradale è stato affrontato dal punto di vista legislativo a partire dagli anni '80.

Gli atti normativi, inizialmente finalizzati esclusivamente alla individuazione dei livelli di concentrazione ammissibili delle sostanze dannose nell'atmosfera, hanno recentemente affrontato in maniera organica anche il problema della pianificazione della qualità dell'aria e dell'istituzione di reti di monitoraggio delle sostanze inquinanti.

Le normative italiane sono, in molti casi, state ispirate dalle direttive della Comunità Europea sulla materia.

Le normative europee ed italiane per la tutela della qualità dell'aria prevedono diversi livelli ammissibili di concentrazione, specificati come segue:

1. *i valori limite di qualità dell'aria*, costituiti dai limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni a cui si ritiene possa essere sottoposto l'uomo all'esterno degli edifici e dai corrispon-

denti limiti massimi di durata di esposizione [Pres. Rep. It., 1988].

2. *i livelli di allarme*, definiti come quei valori di concentrazione tali da determinare condizioni di inquinamento che, se persistenti, determinano il rischio di superamento dei valori limite della qualità dell'aria e, quindi, un rischio sanitario per la popolazione [Min. Amb., 1991].
3. *i livelli di attenzione*, definiti come quei valori di concentrazione tali da determinare condizioni di inquinamento che, se persistenti, determinano il rischio di raggiungimento dello stato di allarme [Min. Amb., 1991].
4. *i livelli per la protezione della vegetazione*, definiti come quei valori della concentrazione oltre i quali la vegetazione può subire danni, attualmente validi solo per l'ozono [Min. Amb., 1991].
5. *i livelli per la protezione della salute*, definiti come quei valori della concentrazione che non devono essere superati ai fini della protezione della salute umana in casi di episodi prolungati di inquinamento, attualmente validi solo per l'ozono [Min. Amb., 1991].
6. *i valori guida di qualità dell'aria*, che specificano i limiti di concentrazione ed esposizione nell'ambiente esterno agli edifici e sono sia finalizzati alla prevenzione a lungo termine della salute umana e dell'ambiente, sia atti a costituire parametri di riferimento per l'istituzione di zone specifiche di protezione ambientale per le quali è necessaria una particolare tutela della qualità dell'aria [Pres. Rep. It., 1988].

3 Il processo di emissione dei veicoli

3.1 Premessa

Le attività di motori a combustione utilizzati da veicoli terrestri, navi e aerei determinano le emissioni atmosferiche da sorgenti mobili. La quota più rilevante è associata al traffico autoveicolare terrestre che produce di norma tre distinte tipologie di emissioni: le **emissioni allo scarico**, le **evaporative** e quelle derivanti dal **consumo di materiali** (pneumatici e freni). Emissioni indirette del traffico possono essere considerate le polveri risospese e quelle derivanti dal consumo di manto stradale.

Le prime, quantitativamente più rilevanti, sono una diretta conseguenza del processo di combustione e, come tali, risultano dipendenti, in maniera molto complessa e di difficile valutazione pratica, da una serie di fattori legati al tipo di veicolo, al ciclo di funzionamento ed alla configurazione del motore, al suo regime di utilizzo e stato di usura ed infine al carburante utilizzato. Le presenze più consistenti (macroinquinanti) sono quelle tipiche della combustione (monossido di carbonio, CO, ossidi di azoto, NO_x, composti organici volatili, COV, materiale particolato, anidride solforosa, SO₂). La caratterizzazione chimica dei COV e del particolato evidenzia sostanze d'interesse per la particolare tossicità e, rispettivamente, nei COV benzene, 1-3-butadiene, aldeidi e nel particolato, di norma molto fine e di granulometria inferiore ai 10 μm (PM₁₀), gli IPA (idrocarburi policiclici aromatici).

Le emissioni evaporative si giustificano con la volatilità del combustibile e risultano così costituite unicamente dalla frazione leggera degli idrocarburi presenti nel carburante. Esse si verificano sia durante la marcia che nelle soste a motore spento e mostrano, oltre ad un'ovvia correlazione con il tipo di combustibile e con le condizioni ambientali esterne, dipendenze piuttosto complesse anche con la configurazione del motore.

3.2 Emissioni allo scarico

I principali inquinanti presenti allo scarico dei motori a combustione interna sono il monossido di carbonio (CO), composti organici volatili (COV), ossidi di azoto (NO_x, miscela di NO e NO₂) e, particolarmente per i motori diesel, anidride solforosa (SO₂) e materiale particolato, quest'ultimo di granulometria inferiore a 10 μm (PM₁₀), costituito in prevalenza da particelle carboniose e da idrocarburi pesanti adsorbiti. L'emissione di CO, COV ed NO_x è conseguenza diretta del processo di combustione e delle condizioni in cui esso si sviluppa. L'equilibrio termodinamico delle numerose reazioni coinvolte nell'ossidazione stechiometrica con aria del carburante prevede che, nelle condizioni di temperatura e pressione allo scarico del motore, i gas siano costituiti unicamente da CO₂ ed H₂O, prodotti dalla combustione, e da N₂ ed altri componenti inerti contenuti nell'aria comburente. Tuttavia, lo studio della combustione all'interno dei cilindri di un motore mette in evidenza come, nelle distinte fasi che ne caratterizzano il ciclo di funzionamento (aspirazione, compressione, accensione ed espansione, scarico), si verificano variazioni locali di temperatura molto intense, con velocità tali da non garantire tempi di permanenza sufficienti al raggiungimento dell'equilibrio. Anche se possibile dal punto di vista termodinamico, la completezza della combustione non viene in pratica mai raggiunta all'interno del motore per motivi di ordine cinetico: la composizione delle miscele gassose prodotte risulta quindi dal "congelamento" degli equilibri chimici a temperature superiori a quelle di scarico.

All'incompletezza delle reazioni attivate dal processo di combustione, dovuta al brusco raffreddamento dei gas durante l'espansione e lo scarico della miscela dai cilindri, sono da imputarsi le emissioni di CO e di idrocarburi, tipici prodotti di ossidazioni solo parziali.

Per gli idrocarburi incombusti, la cui ossidazione procede piuttosto rapidamente entro ampi intervalli di temperatura, secondo meccanismi di reazione a catena che coinvolgono atomi e radicali liberi estremamente attivi, l'ipotesi del blocco cinetico non è tuttavia sufficiente a spiegarne da sola l'emissione.

L'arresto della combustione da cui essi traggono la loro origine è prevalentemente da attribuirsi agli intensi gradienti di temperatura che si verificano in zone di spessore limitato lungo le pareti del cilindro (zona di "quenching") o all'interno di microfessure presenti sulla parete stessa, in corrispondenza delle quali si verificano brusche riduzioni locali della temperatura.

Un ulteriore fattore legato alle modalità di combustione nel motore che esercita una notevole influenza sulle emissioni è costituito dal rapporto A/F fra l'aria ed il carburante alimentato nei cilindri. In condizioni stechiometriche, tale rapporto vale, in termini di peso e per i carburanti di più comune utilizzo (benzina e gasolio), tra 14,5 e 15: valori inferiori danno luogo ad un eccesso di carburante rispetto all'aria (miscele ricche) mentre valori superiori indicano un eccesso d'aria rispetto a quella richiesta dalla stechiometria della combustione (miscele povere). La carenza di ossigeno che si verifica nelle miscele ricche favorisce la presenza di CO ed idrocarburi, prodotti di incompleta combustione, mentre riduce quella degli NOx, la cui formazione è strettamente dipendente dalla disponibilità dell'ossigeno stesso. Per miscele prossime ai rapporti stechiometrici, le emissioni di CO ed idrocarburi si riducono sensibilmente mentre gli NOx raggiungono le massime concentrazioni, in virtù della presenza di O₂ e delle alte temperature caratteristiche della combustione in tali condizioni. Per miscele povere, l'ampia disponibilità di O₂ minimizza le emissioni di CO e quelle di idrocarburi che, tuttavia, presentano un successivo incremento per miscele estremamente povere, in seguito alle difficoltà di combustione per la massiccia presenza di aria; le concentrazioni di NOx subiscono invece una costante riduzione, in virtù della progressiva diminuzione di temperatura con l'impoverimento della miscela, legata all'effetto diluente dell'aria in eccesso.

Contrariamente al caso dei composti sin qui considerati, la presenza o meno di SO₂ e particolato nelle emissioni dei motori risulta fortemente dipendente dal tipo di carburante utilizzato. L'SO₂ deriva totalmente dall'ossidazione dello zolfo contenuto nel carburante, mentre il materiale particolato è legato alle difficoltà di combustione dei carburanti contenenti frazioni idrocarburiche

pesanti: ambedue i composti sono pertanto caratteristici dei gas di scarico dei motori alimentati a gasolio, e risultano praticamente assenti in quelli a benzina.

L'entità e le caratteristiche qualitative delle emissioni dagli autoveicoli risultano pertanto determinate dalle modalità di combustione e dal tipo di carburante, diverso a seconda del tipo di motore utilizzato: benzina nei motori ad accensione comandata (ciclo Otto) o gasolio in quelli ad accensione spontanea (ciclo Diesel). I due tipi di motore presentano anche condizioni di combustione assai diverse, che risultano inoltre variabili con il regime di funzionamento del motore stesso, con la sua età e con il suo stato di manutenzione.

3.3 I fattori che influenzano l'emissione

La difficoltà di spiegare analiticamente i processi fisico-chimici che governano la produzione degli inquinanti in seno al fluido evolvente che viene combusto nel motore consiglia di assumere come variabili indipendenti dei modelli alcuni parametri relativi alle caratteristiche e alle condizioni di funzionamento dei veicoli nel loro complesso [Nuzzolo et al.1993]

Tali parametri sono molteplici e reciprocamente correlati; è pertanto conveniente raggrupparli a seconda della loro natura. In un primo gruppo si possono individuare i parametri rappresentativi delle *caratteristiche costruttive del veicolo*, distinte in:

- *caratteristiche generali del veicolo* (peso a vuoto, efficienza aereodinamica, ecc.)
- *caratteristiche dell'apparato di propulsione*.

Sono quest'ultime a esercitare il ruolo più importante nella determinazione del tipo e dell'entità delle emissioni delle sostanze inquinanti.

I principali parametri che descrivono l'apparato di propulsione sono il tipo di motore (ad accensione comandata o ad accensione spontanea), il tipo di combustibile utilizzato, le caratteristiche del fluido evolvente, il tipo di dispositivo di controllo delle emissioni, le caratteristiche di cilindrata e potenza.

Una seconda categoria di parametri comprende quelli che influenzano

lo *stato della meccanica del veicolo*, come ad esempio lo stato di usura, lo stato di manutenzione, le condizioni di regolazione. Anche in questo caso lo stato della meccanica dell'apparato di propulsione è di gran lunga più importante, nell'influencare le emissioni, dello stato delle altre componenti del veicolo.

In un terzo gruppo possono essere individuati i parametri che rappresentano le *condizioni operative del veicolo* nelle condizioni reali di traffico. Essi riguardano essenzialmente le caratteristiche di funzionamento dell'apparato di propulsione. Queste ultime possono essere a loro volta descritte da due categorie di variabili, fra loro dipendenti: quelle legate alla *dinamica del motore*, le più importanti delle quali sono la velocità di rotazione del motore e l'entità del carico a esso fornito; e quelle che descrivono lo stato termodinamico del fluido evolvente all'interno del cilindro, stato il quale a sua volta determina le caratteristiche della combustione (temperatura del motore, umidità e densità dell'aria, etc.).

Le variabili che descrivono la dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione sono peraltro legate ai parametri cinematici del moto del veicolo nel suo complesso (velocità, accelerazione, ecc.).

Le caratteristiche costruttive, di stato della meccanica e operative del veicolo sono influenzate a loro volta dalle *condizioni dell'ambiente esterno*, sia da quelle di tipo storico - riguardanti cioè la vita passata del veicolo - che da quelle operative ovvero attuali. Fra le prime sono importanti i *vincoli di produzione*, ovvero le condizioni tecnologiche, decisionali e legislative in essere al momento della produzione del veicolo e quindi ne influenzano le caratteristiche costruttive. Il tipo di *uso storico del veicolo* determina invece lo stato della meccanica.

Le caratteristiche dell'ambiente esterno, che condizionano le caratteristiche operative del veicolo, possono essere raggruppate in diversi sottoinsiemi: lo *stato dell'aria esterna*, (temperatura ambiente, pressione atmosferica, umidità relativa dell'aria..), le *caratteristiche della via* (pendenza longitudinale, sinuosità, caratteristiche della pavimentazione..), le *condizioni di traffico* (caratteristiche di deflusso..), il *tipo di uso attuale del veicolo* (massa trasporta-

ta, lunghezza degli spostamenti, comportamento del guidatore).

3.3.1 Le caratteristiche costruttive del veicolo

Come accennato, l'influenza delle caratteristiche costruttive, e in particolare del loro apparato di propulsione, sull'entità delle emissioni inquinanti è di primaria importanza. I parametri rappresentativi delle caratteristiche dell'apparato di propulsione sono molteplici, ma essi possono essere raggruppati in tre diversi sottoinsiemi.

3.3.1.1 Tipo di propulsione del veicolo

In un primo gruppo possono essere considerati tutti i parametri legati al *tipo di propulsione del veicolo*, che nella maggior parte dei casi può essere classificato in motore ad *accensione comandata* o ad *accensione spontanea*. Dal tipo di propulsione dipendono, eccezion fatta per alcuni casi particolari, il tipo di combustibile utilizzato (benzina o diesel rispettivamente) e le proprietà del fluido evolvente.

Nei motori ad accensione comandata l'innesco della combustione avviene tramite una scintilla, prodotta dalla candela durante la fase di compressione della miscela nel cilindro. La combustione, nelle diverse condizioni di carico del motore, avviene praticamente sempre in fase omogenea: la benzina viene infatti miscelata con l'aria comburente nel carburatore, ove evapora prima di essere immessa nei cilindri. Le condizioni di combustione del motore, e quindi le emissioni di CO, COV ed NO_x, sono influenzate da una serie di parametri costruttivi e di esercizio, correlati tra di loro in maniera molto complessa e con effetti spesso divergenti sui singoli inquinanti.

Caratteristica essenziale dei motori ad accensione comandata è quella di utilizzare rapporti aria/combustibile leggermente ricchi o stechiometrici, con conseguenti elevate emissioni di CO e COV.

Oltre che dalle variabili motoristiche, le emissioni presentano una dipendenza anche da talune caratteristiche del combustibile, in particolare dal contenuto di idrocarburi aromatici, per ciò che riguarda l'emissione di benzene, e dal contenuto di composti ossigenati, per ciò che riguarda l'emissione di aldeidi e altri composti carbossilici. Sia gli aromatici che gli ossigenati hanno funzioni antidetonanti in sostituzione dei derivati alchilici del piombo.

Nei motori ad accensione spontanea (Diesel), le reazioni di combustione si autoinnescano quando la miscela raggiunge le condizioni di temperatura e pressione che ne determinano l'accensione. L'iniezione del combustibile avviene qualche istante prima del punto morto superiore per cui, per gran parte della fase di compressione, nei cilindri è presente solo aria: la conseguente assenza dei rischi legati all'insorgere di fenomeni di detonazione consente di utilizzare rapporti di compressione più spinti, e quindi di ottenere di conseguenza rendimenti più elevati rispetto ai motori a ciclo Otto. Operando in tal modo, la combustione avviene in fase eterogenea: il combustibile non viene infatti evaporato e miscelato con l'aria prima dell'alimentazione e le reazioni di combustione si innescano in fase liquida. A tale eterogeneità, ed alle conseguenti maggiori difficoltà nell'adottare condizioni ottimali di combustione, sono imputabili in particolare le emissioni di materiale particolato, caratteristiche di questo tipo di motore, e di idrocarburi incombusti.

Una delle caratteristiche più importanti del motore Diesel è costituita dal suo funzionamento nell'intervallo di rapporti aria/combustibile estremamente poveri. Le conseguenti emissioni di CO sono, pertanto, molto contenute, soprattutto al minimo ed ai carichi parziali. Il rapporto aria/combustibile influenza anche le emissioni di COV che, come già illustrato, presentano un minimo in condizioni prossime allo stechiometrico (carichi massimi) e crescono con l'impovertimento della miscela. Gli intermedi di ossidazione allo scarico sono anche fortemente influenzati, come già per i motori ad accensione comandata, dalla presenza di condizioni locali che limitano il processo di ossidazione (effetti parete, brusche riduzioni di temperatura), e risultano quindi dipendenti dalla configurazione della camera di combustione e del sistema di i-

niezione. L'ottimizzazione della turbolenza all'interno dei cilindri e l'adozione di sistemi di iniezione completamente nuovi (indiretta a precamera, diretta con iniezione a pompa o common rail), rappresentano elementi molto qualificanti per il controllo di tutti gli inquinanti ed in particolare per le polveri, nell'ultima generazione di motori Diesel.

Anche per i motori Diesel le emissioni risultano influenzate da alcune caratteristiche del combustibile. La presenza di SO_2 allo scarico è, in particolare, totalmente imputabile al contenuto di zolfo del carburante, e cresce linearmente con esso. Parte dello zolfo contribuisce, sia pure in misura modesta, anche alla formazione del particolato, tramite l'ossidazione in SO_3 e la successiva idrolisi in acido solforico e solfati. L'incremento della densità del combustibile o della sua temperatura di distillazione comportano, in genere, aumenti nelle emissioni di particolato, in virtù di una maggiore presenza delle frazioni idrocarburiche pesanti che bruciano con più difficoltà.

Uno studio sperimentale condotto dall'INRETS ha mostrato che il rapporto tra le emissioni rilevate su 8 campioni di veicoli a benzina e quelle rilevate su campioni di veicoli diesel risulta, per ciascun inquinante salvo gli NO_x e gli IPA, praticamente costante. In particolare le emissioni dai veicoli diesel sono, rispetto a quelle dai veicoli a benzina, circa 30 volte più basse per il CO e circa 16 volte per gli HC. Le emissioni di CO_2 risultano del 14% minori per i veicoli a benzina con partenza a caldo (ma solo del 4% per quelli con partenza a freddo), le emissioni di IPA sono per i veicoli a benzina maggiori del 21% a caldo e del 210% a freddo, il consumo del 9% a caldo e del 52% a freddo. Le emissioni di NO_x mostrano invece un andamento generalmente crescente con la velocità media per i veicoli a benzina, decrescente per quelli diesel.

3.3.1.2 Caratteristiche di potenza

Un secondo gruppo di parametri costruttivi del veicolo è composto da tutte le variabili connesse alle *caratteristiche di potenza* dell'apparato di propulsione. Fra queste la cilindrata, oltre a essere un parametro distintivo per la

normativa più recente della Comunità Europea, è anche un parametro ben correlato alla massa e alla potenza dei veicoli in commercio. Lo stesso studio sperimentale condotto dall'INRETS ha mostrato una certa correlazione tra la cilindrata e le emissioni di NO_x e CO_2 per i veicoli a benzina, a parità di velocità media del moto [Jourmard et al., 1990]. Tali emissioni aumentano infatti con l'aumentare della cilindrata per tutte le velocità medie studiate. Le emissioni di CO dei veicoli diesel aumentano invece con la cilindrata solo per velocità inferiori a circa 50 Km/h. Anche le emissioni di IPA sono più alte quando la cilindrata è maggiore. La potenza massica di un veicolo è un parametro generalmente correlato con l'accelerazione massima. La dipendenza delle emissioni di IPA dalla potenza massica è stata mostrata dall' INRETS [Jourmard et al., 1990]. Tali emissioni sono infatti una funzione decrescente della potenza massica, in maniera più accentuata nei veicoli a benzina che in quelli diesel. L'emissione di particolato dai veicoli diesel è anch'essa ben correlata alla potenza massica del veicolo.

3.3.1.3 Dispositivi di controllo delle emissioni

Un terzo gruppo di parametri costruttivi è costituito da tutte le variabili legate al tipo di dispositivi di controllo delle emissioni impiegati dal veicolo, fra i quali si includono anche quegli accorgimenti motoristici che implicano la riduzione delle emissioni dal motore. La tipologia di quest'ultimi dispositivi e la loro efficacia nella riduzione delle emissioni sono frequentemente legate alla disponibilità tecnologica e alle norme legislative di omologazione in vigore nell'anno della loro produzione. Per questa ragione l'anno di produzione, o gli estremi delle normative corrispondenti, sono spesso adoperate come parametro distintivo della tipologia veicolare.

Le possibilità di controllare le emissioni risiedono in larga misura nelle fasi di formazione dell'emissioni stessa e si sviluppano essenzialmente su grandi direttrici:

- interventi primari centrati su modifiche motoristiche più o meno avanzate fino all'uso di propulsori completamente diversi dai convenzionali (motori ibridi ed elettrici);
- interventi secondari che puntano a migliorare i sistemi di trattamento dei gas di combustione (marmitte catalitiche) e delle perdite evaporative (trappole di adsorbimento) ed a predisporre di nuovi (trappole per il materiale particolato dei diesel);
- modifiche dei carburanti fino all'impiego di prodotti del tutto diversi da quelli convenzionali (idrogeno);
- motori alternativi (motori ibridi, motori elettrici, motori elettrici in linea con pile a combustibile).

Gli interventi primari si possono includere in alcune grandi linee di tendenza che recentemente convergono, oltre che verso la riduzione delle emissioni, verso l'effettiva riduzione dei consumi a parità di prestazioni. La riduzione dei consumi è una richiesta perentoria dei problemi di effetto serra, che dovrà avere la dovuta attenzione non avuta in passato .

Lo sviluppo di sistemi di iniezione diretta del carburante, che si avvale già di importanti esperienze di applicazione nei motori diesel, l'estensione di schemi di combustione compatibili con il riciclo dei gas di scarico (EGR) e il controllo elettronico delle valvole possono essere considerati i percorsi principali che consentiranno di raggiungere gli obiettivi indicati dall'Unione Europea per i nuovi motori.

Sullo sfondo delle soluzioni motoristiche rimane ancora, con aspettative ridimensionate rispetto a quanto prospettato in passato, l'impiego di motori elettrici e soprattutto ibridi con batterie ricaricabili. Questi ultimi possono contare di qualche realizzazione sul piano industriale. L'impiego attuale, ma anche in prospettiva a breve e medio termine, sembra confinato a nicchie tipicamente rappresentate da alcuni centri urbani ed altre zone circoscritte, sia per i costi che per le prestazioni ancora non competitivi. Il rilancio del motore elettrico,

invece, appare ormai affidato all'alimentazione con pile a combustibili alimentate con idrogeno.

Interventi secondari

Alla seconda direttrice appartengono soluzioni già abbondantemente sperimentate, quali le marmitte catalitiche, ma ancora suscettibili di sostanziali miglioramenti. Le marmitte catalitiche attualmente in uso sono strutture monolitiche a nido d'ape di ceramica o metallo, rivestite da sostanze attive, tipicamente rodio e platino. Il dispositivo è indicato anche con il termine a tre vie, perché realizza contestualmente l'ossidazione di CO e idrocarburi (preferibilmente sul platino) e la riduzione degli ossidi di azoto (in prevalenza sul rodio). Si tratta quindi di reazioni di riduzione degli ossidi di azoto NO_x ad azoto molecolare, che utilizzano come riducenti le altre due forme inquinanti (CO ed idrocarburi), a loro volta ossidate a CO₂ e acqua.

Un cattivo controllo del processo del processo può portare a reazioni indesiderate che, ad esempio, riducono poco l'NO.

Aspetti ancora suscettibili di sostanziosi miglioramenti sono in primo luogo il problema del funzionamento a freddo, il deterioramento e l'impiego di materiali meno costosi e meno tossici. Il fatto che il processo catalitico richieda una temperatura minima per attivarsi (300-350 °C), esclude il funzionamento della marmitta nei primi minuti dopo una partenza a freddo.

L'effetto è particolarmente negativo in aree urbane, dove i percorsi sono brevi e le partenze a freddo concentrate in alcune ore della giornata.

Per quanto riguarda le emissioni evaporative gli strumenti di controllo si basano, su trappole con sostanze adsorbenti, rigenerate automaticamente da flussi di aria calda e avviate successivamente alla combustione nel motore. Un'altra possibilità di attenuare le perdite risiede nella riduzione della volatilità del carburante, normalmente espressa in termini di RVP (Reid Vapor Pressure).

Il particolato dei diesel è costituito prevalentemente da carbonio elementare, da una frazione organica solubile in solventi (SOF), adsorbita sulla parte carboniosa e da microgocce di idrocarburi condensati, acqua e solfati. La

composizione dipende fortemente dalle condizioni operative del motore. Nella SOF si individuano le specie più pericolose per la salute, tipicamente IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e nitro-IPA. Il controllo di questa emissione a valle degli interventi motoristici si realizza allo stato attuale con l'impiego di trappole filtranti, rigenerate periodicamente per combustione catalitica dei residui. Si tratta di filtri in grado di bloccare con grande efficienza le particelle. Si osservano efficienze di rimozione del particolato dell'ordine dell'80-90%.

3.3.2 Lo stato della meccanica dei veicoli

Rilievi sperimentali hanno mostrato come l'entità delle emissioni inquinanti di un veicolo a motore siano fortemente influenzate dallo stato della meccanica del veicolo in generale e del suo apparato di propulsione in particolare. Lo stato della meccanica dipende a sua volta dalla storia di funzionamento del veicolo durante la sua vita utile, che si traduce in due diversi parametri dagli effetti contrastanti: l'uso a cui il veicolo è stato sottoposto e gli interventi di manutenzione effettuati. L'uso a cui il veicolo è stato sottoposto è esprimibile in termini di chilometri percorsi, anche se spesso è utile specificarlo in funzione degli anni di vita, supponendo che ad ogni anno corrisponda un certo numero medio di chilometri percorsi. L'entità dell'uso di un veicolo influenza lo stato di invecchiamento a causa di fattori esclusivamente meccanici, consistenti nel deterioramento delle parti meccaniche, determinando generalmente un aumento dell'entità delle emissioni.

Le attività di manutenzione effettuate sul veicolo contrastano invece il processo di invecchiamento delle parti meccaniche, e quindi tendono a ridurre l'entità media delle emissioni inquinanti. Per i veicoli non catalizzati gli interventi di manutenzione consentono, in gran parte dei casi, di ottenere significative riduzioni nelle emissioni di CO, più contenute nel caso dei COV, mentre non paiono in grado di modificare apprezzabilmente gli NO_x, che comunque sono poco influenzati dal grado di manutenzione. Per i veicoli catalizzati il cat-

tivo funzionamento della marmitta influenza significativamente l'emissione di tutti gli inquinanti.

La letteratura tecnica non è prodiga di studi sulla correlazione tra emissioni inquinanti e stato della meccanica dei veicoli stradali. In aggiunta, i relativi dati sperimentali sono di difficile interpretazione sia a causa dell'interazione degli effetti contrastanti dell'usura e degli interventi manutentivi, sia dalla dipendenza di questi ultimi da un gran numero di fattori di non facile schematizzazione.

3.3.3 La dinamica del motore

Le variabili legate alla dinamica del funzionamento del motore che influenzano maggiormente le emissioni inquinanti sono la velocità di rotazione del motore (generalmente espressa in numero di giri per minuto) e la quantità di combustibile immessa per ciclo (carico di combustibile). Dal punto di vista del veicolo nel suo complesso la dipendenza delle emissioni dalle condizioni operative del motore può anche essere esaminata in termini di relazione tra la quantità della sostanze emesse e le principali variabili del moto, ovvero la velocità e l'accelerazione del veicolo. Gli stati d'accelerazione sono ad esempio potenzialmente favorevoli ad una maggiore emissione in quanto coincidono con un aumento sia del carico combustibile che del numero di giri del motore. Nella stessa maniera si può rilevare che, poiché il prodotto tra la velocità v e accelerazione a rappresenta un'energia per unità di massa, l'energia persa dal veicolo durante una accelerazione è direttamente correlata al valore di tale prodotto. Maggiore è l'energia fornita dall'apparato di propulsione, maggiore è anche il valore di $v \times a$; e minore è in generale anche l'efficienza della combustione nei cilindri, tanto più quanto il motore è prossimo alle condizioni limite di funzionamento. All'aumentare del prodotto $v \times a$ quindi, risultano maggiori le emissioni di CO e di idrocarburi [Griffin, 1980].

La dipendenza delle emissioni inquinanti dall'accelerazione è stata recentemente rilevata dal laboratorio francese INRETS comparando le emissioni

rilevate a motore caldo su cicli di guida a velocità variabile con quelle rilevate su cicli a velocità stabilizzata (costante), per analoghi valori della velocità media [Jourmard et al., 1990]. Le emissioni rilevate a velocità costante sono per, per tutti gli inquinanti, minori di quelle rilevate a velocità variabile, con differenze più accentuate nel caso di veicoli a benzina e velocità più basse. L'aliquota di emissione attribuibile all'accelerazione risulta notevole.

Per ciò che concerne la relazione tra emissioni e velocità media del moto, si hanno relazioni differenti per le diverse sostanze inquinanti. Per il monossido di carbonio e gli idrocarburi incombusti si ha in generale una diminuzione delle emissioni a partire dalla velocità nulla fino a un certo valore della velocità; al di là di questo le emissioni cominciano ad aumentare. Per gli ossidi di azoto si ha invece che le emissioni variano poco con la velocità media; in alcuni casi presentando un valore massimo intorno al valore minimo delle emissioni di CO e di HC, in altri continuando ad aumentare con la velocità.

3.3.4 Le condizioni termiche del motore

Le emissioni inquinanti di un veicolo sono influenzate dalla temperatura del sistema di propulsione quando questa è inferiore a quella del suo funzionamento a regime termico. Tale evenienza si verifica durante la fase di riscaldamento del motore, ovvero, nel caso in cui la sua temperatura iniziale sia inferiore a quella di funzionamento di regime, dal momento in cui esso viene messo in funzione fino a quando non raggiunge il regime termico. Una volta raggiunto quest'ultimo, la temperatura si mantiene pressoché costante, intorno a un valore notevolmente maggiore di quello della temperatura esterna, durante tutto il successivo funzionamento del motore [Andrews et al., 1989].

A causa delle difficoltà pratiche di misurazione della temperatura all'interno dei cilindri, la definizione della temperatura di funzionamento a regime termico di un motore a combustione interna viene generalmente specificata attraverso un valore di riferimento assunto dal liquido di raffreddamento. Tale valore è convenzionalmente fissato in 70 °C per l'acqua oppure di 80 °C

per l'olio [OCSE, 1982]; [Joumard e Andre 1990]; [Eggleston et al., 1991].

Si definisce pertanto fase di *funzionamento a caldo* (o fase di funzionamento a regime termico, o fase termica stabilizzata) di un motore a combustione interna quella fase in cui il motore funziona a regime termico in quanto la temperatura dell'acqua di raffreddamento ha raggiunto i 70 °C (o dell'olio di 80 °C). A queste condizioni ci si riferisce generalmente quando vengono determinate le emissioni inquinanti senza far riferimento alla temperatura del motore.

Analogamente si definisce fase di *funzionamento a freddo* (o fase di funzionamento in transitorio termico) di un motore a combustione interna quella fase in cui il motore funziona in transitorio termico in quanto la temperatura dell'acqua di raffreddamento è inferiore a 70 °C (o quella dell'olio a 80 °C). In queste condizioni le emissioni inquinanti e il consumo di combustibile sono maggiori di quelli medi della fase a regime, e ciò è dovuto a diverse cause. La causa principale consiste nella bassa qualità della combustione conseguente alla bassa temperatura: il combustibile non vaporizza nella maniera migliore e sono pronunciati nel cilindro i fenomeni di combustione parziale o mancata. Un'altra causa dell'aumento delle emissioni durante il funzionamento a freddo è l'arricchimento della miscela determinato dalla diminuzione del rapporto aria/combustibile per consentire la messa in moto a motore freddo.

Infine, maggiori emissioni e consumi sono determinati, nei veicoli dotati di catalizzatore, dal cattivo funzionamento dei convertitori catalitici con temperature dei gas di scarico troppo basse. Secondo alcune misure sperimentali condotte negli USA su automobili a benzina dell'anno di produzione 1978 e relative alle fasi del test FTP condotto con il ciclo di guida US-75, il rapporto tra le emissioni medie misurate nelle due fasi di transitorio dopo una partenza a freddo (*cold transient*) e funzionamento a caldo (*hot stabilized*) è pari a circa 3 per gli HC incombusti e il CO, 1,5 per gli ossidi di azoto. Il consumo di combustibile non varia invece in maniera apprezzabile (meno del 20%). Nella fase di transitorio dopo la partenza a motore caldo (*hot transient*) del test FTP si registrano inoltre immissioni di CO e HC più basse e di NO_x più alte rispetto alla

fase *hot stabilized*: questo fenomeno è giustificato dal fatto che la velocità media della fase *hot stabilized* è minore [Horowitz, 1982],

In un più recente studio sperimentale, condotto dall'INRETS (Francia), sono stati determinati i rapporti medi fra le emissioni a freddo e a caldo su diversi cicli di guida [Joumard et al., 1990].

Il test statistico di Student, applicato alla differenza tra le emissioni a freddo e quelle a caldo, si è rilevato molto significativo eccetto che per gli NO_x. I risultati mostrano che i veicoli a benzina sono più sensibili alla temperatura del motore di quelli diesel.

Le sovraemissioni a freddo sono di entità importante per tutti gli inquinanti, in particolare per gli HC e gli IPA, con l'eccezione degli NO_x. Per gli IPA le emissioni a freddo mostrano inoltre una certa dipendenza dall'età e dalla cilindrata del veicolo.

La determinazione delle emissioni inquinanti in funzione della temperatura del motore presenta notevoli difficoltà teoriche. L'approccio generalmente usato per determinare l'influenza della temperatura del motore sulle emissioni e sui consumi consiste nel determinare sperimentalmente un fattore di emissione a freddo, oppure un rapporto fra le emissioni medie a caldo e a freddo per ogni inquinante. Tali quantità sono evidentemente funzioni della temperatura esterna dell'aria, come mostrato da vari Autori fra cui Eccleston e Hurn (1974), Larson (1989), Laurikko (1989), Stump et al. (1989) e (1990). Inoltre, la lunghezza e le caratteristiche dello spostamento che viene effettuato da un veicolo influenzano notevolmente le sovraemissioni a freddo, come si può rilevare in Ellis et al. (1978), Eccleston et Hurn (1979) e Horowitz e Tobin (1979).

3.3.5 Evoluzione dei motori in Europa

Fin dal 1970 la Comunità Europea ha sentito l'esigenza di dettare normative sui carburanti e sull'omologazione dei veicoli, più che per una spinta ecologica, considerando innanzitutto gli aspetti legati alla necessità del mercato unico, per agevolare gli scambi e la competitività internazionale delle in-

dustrie europee automobilistiche e della raffinazione.

D'altra parte, anche le iniziative in materia di salute e di protezione dell'ambiente divenivano sempre più legate all'instaurazione e al funzionamento del mercato interno, basandosi su uno standard europeo di protezione per tutti i cittadini.

Anche queste richiedevano interventi nel settore dei combustibili e delle emissioni dei veicoli, principali sorgenti di sostanze altamente pericolose per la salute della popolazione e dell'ambiente.

Nel 1970 viene così emanata la Direttiva 70/156 sulle procedure di omologazione e nel 1971 la Direttiva 70/220 sui limiti di emissione dei veicoli. Da allora si sono succedute molte norme comunitarie sui limiti delle emissioni di inquinanti dei veicoli a motore.

I gruppi di norme stabilite dall'Unione Europea sulle emissioni di gas di scarico dei veicoli e le corrispondenti diverse caratteristiche tecniche che i motori devono avere al momento dell'immatricolazione e dell'omologazione, sono noti con il termine "Euro", che va da 1 a 4 a seconda della direttiva a cui fanno riferimento; il numero è progressivo perchè indica le tappe imposte ai costruttori per realizzare veicoli con minori emissioni: così l'Euro 1 corrisponde ai limiti della Direttiva 91/441 e l'ultima, l'Euro 4, corrisponde all'ultima fase della Direttiva 69 del 1998.

Vengono quindi previste norme per i veicoli sia di nuova omologazione che di nuova immatricolazione. Qui di seguito faremo riferimento alle norme per l'immatricolazione, che avviene al momento dell'acquisto presso il concessionario, quando viene assegnata la targa al veicolo, perché più corrispondente alla realtà del parco circolante.

Dal momento dell'entrata in vigore della direttiva, quindi, tutte le auto di nuova immatricolazione devono rispettare i limiti dettati (a parte una minima quota del 10 per cento che la casa può vendere entro l'anno per smaltire le scorte), limiti che le auto già in circolazione non sono obbligate a rispettare.

Analizziamo le direttive:

- Euro 1: è entrata in vigore nel 1993. Indica le autovetture con-

formi alla direttiva 91/441 o i "veicoli commerciali leggeri" conformi alla direttiva 93/59. Ha introdotto, a grandi linee, l'obbligo dell'uso della marmitta catalitica e dell'alimentazione a iniezione. Inoltre ha stabilito dei primi valori limite alle emissioni in atmosfera da rispettare in fase di omologazione (sulle carte di circolazione Euro 1 è individuata dalla scritta "rispetta la direttiva 93/59 CEE con marmitta catalitica").

- Euro 2: in vigore dal 1996. Indica le autovetture conformi alla direttiva 94/12 o i "veicoli commerciali leggeri" conformi alla direttiva 96/69. Ha imposto dei più severi limiti, rispetto a Euro 1, di emissione dagli autoveicoli e ha costretto le Case a interventi importanti anche sui motori diesel. Le emissioni inquinanti dei motori, in base a quest'ultima normativa, sono però ancora tollerate a motore freddo, ma debbono ridursi ai valori limite consentiti a motore caldo (sulle carte di circolazione Euro 2 è individuata dai numeri 94/12, 96/69 o 98/77).
- Euro 3: in vigore dal 2000 per le nuove omologazioni e dal 2001 per le nuove immatricolazioni, indica i veicoli conformi alla direttiva 98/69. Riduce ulteriormente i limiti di emissione, aggiungendo però che la quantità di sostanze nocive emesse dal veicolo debbono rientrare nei valori consentiti sia a motore freddo, sia a motore caldo. Inoltre il costruttore deve garantire che i valori di inquinamento massimi consentiti sia mantenuti per almeno 80.000 km e deve installare sull'auto una centralina elettronica (denominata EOBD) che riveli e segnali tramite una spia le anomalie. Infine detta centralina deve registrare i chilometri percorsi inquinando più del consentito (sulle carte di circolazione individuate dai numeri 98/69, 98/77 RIF 98/69 o 99/102).
- Euro 4: indica i veicoli conformi con la direttiva 98/69B. È la normativa che entrerà in vigore per le nuove omologazioni dal

2005 e per le nuove immatricolazioni dal 2006. Essa ridurrà ulteriormente i limiti di emissioni inquinanti consentiti ed introdurrà ulteriori vincoli di mantenimento nel tempo dei limiti di emissione.

La maggior parte degli autoveicoli con motore diesel costruiti dal Gruppo Volkswagen sono già oggi – anzi, in parte già da qualche anno – conformi ai requisiti della norma Euro 4.

Di seguito si riportano le tabelle in cui si riassumono i valori limite di emissione imposti dalla normativa comunitaria.

Tabella 1: Valori limite di emissione imposti dalle normative comunitarie per autovetture a benzina e diesel

| classe di riferimento per la normativa e date di applicazione | EURO 1 1993 | EURO 2 1997 | EURO 3 2001 | EURO 4 2006 |
|---|----------------|----------------|----------------|----------------|
| AUTO PASSEGGERI BENZINA | | | | |
| CO | 2,72 | 2,2 | 2,3 | 1 |
| Idrocarburi | - | - | 0,2 | 0,1 |
| Nox | - | - | 0,15 | 0,08 |
| Idrocarburi + NOx | 0,97 | 0,5 | - | - |
| AUTO PASSEGGERI DIESEL | | | | |
| CO | 2,72 | 1 | 0,64 | 0,5 |
| Idrocarburi | - | - | - | - |
| Nox | - | - | 0,5 | 0,25 |
| Idrocarburi + NOx | 0,97 | 0,7 | 0,56 | 0,3 |
| Particolato (PST) | 0,14 | 0,08 | 0,05 | 0,025 |

4 Modelli di emissione

4.1 Premessa

La simulazione del processo dell'emissione di sostanze inquinanti da parte dei veicoli stradali ed in particolare dei veicoli con motori a combustione interna, i quali rappresentano il sistema propulsivo di gran lunga più diffuso nel trasporto stradale, costituisce uno dei passi fondamentali per la valutazione degli effetti che conseguono al processo di inquinamento dell'aria atmosferica. Oggetto di questo capitolo è il problema della descrizione matematica del processo di emissione delle sostanze inquinanti.

La descrizione analitica del fenomeno dell'emissione sarà basata su variabili relative alle caratteristiche e alle condizioni operative medie dei veicoli nel loro complesso.

4.2 Caratteristiche dei modelli di emissione

I modelli di emissione consistono nella formulazione matematica delle relazioni esistenti tra le emissioni inquinanti dei veicoli a motore e le variabili da cui tali emissioni sono influenzate (caratteristiche costruttive, stato della meccanica e condizioni di funzionamento dei veicoli, condizioni dell'ambiente esterno) [Horowitz 1990].

Un primo problema da risolvere nello sviluppo di un modello di emissione consiste nella determinazione delle variabili indipendenti significative. Come risulta da studi sperimentali proposti in letteratura, le variabili che maggiormente influenzano l'entità delle emissioni riguardano le caratteristiche costruttive dei veicoli [Jost et al., 1992] [Simmon et al., 1981]. La loro influenza sull'entità delle emissioni è tale da consigliare lo sviluppo di modelli di emissione diverse per tipologie veicolari.

La dipendenza delle emissioni dalle caratteristiche dinamiche di funzionamento del motore riveste anch'essa grande importanza. Tale dipendenza può essere analizzata dal punto di vista teorico se si ipotizza che tutti gli altri parametri che influenzano il processo si mantengano costanti. In tal modo può essere determinata la relazione tra le emissioni e la dinamica del motore in condizioni di regime quantificando separatamente l'influenza degli altri fattori. Le variabili che descrivono la dinamica di funzionamento della propulsione sono peraltro legate ai parametri cinematici del veicolo nel suo complesso.

Lo stato termodinamico del fluido evolvente influenza anch'esso l'entità delle emissioni in maniera significativa. In particolare, identificato lo stato termodinamico di riferimento dei gas contenuti nel cilindro corrispondente al regime termico (motore caldo), si ammette che condizioni differenti (motore freddo) provochino un aumento delle emissioni inquinanti.

La variabile rispetto alla quale la variazione di emissione è più sensibile è quindi la temperatura del fluido evolvente.

Lo stato della meccanica influenza l'entità delle emissioni provocando maggiori quantità di inquinanti emessi al crescere dell'usura dei sottosistemi del veicolo e al diminuire della frequenza degli interventi di corretta manutenzione e regolazione.

Fra i parametri che descrivono le condizioni dell'ambiente esterno, è necessario individuare quelli di cui è utile tener conto in maniera esplicita nei modelli. Essi sono, in prima approssimazione, la temperatura dell'aria esterna (che influenza la temperatura dei gas contenuti nel motore) e la pendenza longitudinale della via (la quale influenza la dinamica di funzionamento del motore).

Data la complessità che consegue dall'influenza contemporanea delle variabili elencate, i modelli di emissione sono innanzitutto sviluppati in maniera indipendente per ciascun tipo di inquinante e per ciascuna categoria veicolare di caratteristiche costruttive date. Essi sono inoltre costruiti come somma di diversi sottomodelli ognuno dei quali descrive la relazione tra le emissioni e un gruppo significativo di parametri. La dipendenza delle emissioni dalla dinami-

ca di funzionamento del motore (o meglio dalla cinematica del moto del veicolo) in determinate condizioni di regime – termico, di stato della meccanica e ambientale – costituisce il modello di base: le emissioni che in tal caso vengono calcolate saranno quindi indicate come *emissioni di base*. Le variabili indipendenti del modello sono quindi soltanto quelle relative alla dinamica di funzionamento dell'apparato di propulsione.

Le variazioni indotte da condizioni non di regime vengono invece computate come funzioni correttive del modello di emissione. Alle emissioni di base si aggiungono quindi le aliquote di emissioni dovute ai transitori termici del motore (emissioni a freddo), alla pendenza della via e allo stato non di regime della meccanica.

Lo sviluppo dei modelli può a questo punto essere condotto sia secondo un approccio dinamico, volto alla simulazione delle caratteristiche istantanee del fenomeno, sia secondo un approccio statico, che permette invece soltanto il calcolo dei valori medi delle emissioni nell'intervallo temporale al quale si riferisce l'analisi (*fattori di emissione*). È evidente che nel primo caso anche le variabili indipendenti devono essere descritte in maniera istantanea, mentre nel secondo è sufficiente riferirsi ai loro valori medi.

L'approccio dinamico conduce alla formulazione di quelli che saranno denominati *modelli dinamici di emissione*. Essi consentono il calcolo delle emissioni istantanee di una determinata sostanza inquinante sulla base dell'andamento in funzione del tempo delle variabili indipendenti scelte. I modelli costruiti secondo questo approccio permettono di descrivere il fenomeno nel dettaglio, ma necessitano di una quantità notevole di informazioni sul comportamento istantaneo delle variabili esplicative. Essi trovano quindi campi ottimali di applicazione da un lato nella simulazione di configurazioni di complessità limitata, dove sia possibile esplicitare informazioni di dettaglio sulle variabili indipendenti, dall'altro in tutti quei problemi in cui la dipendenza del fenomeno dal tempo non possa essere trascurata. Esempi sono l'analisi delle emissioni di singoli veicoli, di singoli tronchi stradali, di intersezioni stradali.

L'approccio statico alla simulazione conduce a quelli che verranno indicati come *modelli statici di emissione*. Essi sono volti alla determinazione delle emissioni medie in un certo intervallo di tempo funzione dei valori medi assunti dalle variabili indipendenti nell'intervallo considerato. Sono quindi adatti al calcolo delle emissioni in condizioni stazionarie di funzionamento del sistema di trasporto. Esempi di campi di applicazione dei modelli statici sono l'analisi delle emissioni dovute a veicoli in condizione di moto uniforme o di moto non uniforme ma ben caratterizzato dal valore della velocità media, come è il caso di traffico in condizioni di flusso ininterrotto (tronchi stradali extraurbani, direttrici di traffico, ecc.), oppure l'analisi delle reti di trasporto in condizioni di equilibrio. In quest'ultimo caso il ricorso a modelli di tipo statico è giustificato anche dal fatto che per i sistemi stradali di notevoli dimensioni non è sempre possibile ottenere – in tutti i punti della rete – informazioni di dettaglio sulla velocità e sulle accelerazioni istantanee dei veicoli circolanti. Risulta invece più semplice conoscere le velocità medie e i flussi sugli archi della rete, sia per mezzo di stime dirette che con l'uso di modelli di simulazione quantitativa del funzionamento del sistema di trasporto.

L'andamento delle variabili che descrivono il moto dei veicoli è determinato da algoritmi di calcolo indipendenti che, sulla base dell'entità dei flussi di traffico e della geometria del sistema viario, determinano le caratteristiche quantitative del moto (*modulo di deflusso*) [Nuzzolo et al., 1993]. Nel caso più generale, un modello di emissione fa quindi parte di un sistema di modelli comprendente un modulo di interazione domanda/offerta di trasporto (ripartizione modale, assegnazione dei flussi di traffico), un modulo di deflusso e infine il vero e proprio modello di emissione. Questo fornisce le quantità totali di inquinante emesse da un generico flusso di veicoli nell'unità di spazio percorso o nell'unità di tempo, denominate fattore lineare di emissione e fattore temporale di emissione rispettivamente.

4.3 Modelli statici di emissione

Le descrizione dinamica del fenomeno delle emissioni, essendo finalizzata alla stima istantanea della quantità di sostanze inquinanti emesse nell'atmosfera, non è adatta ad essere utilizzata in un processo di simulazione di tipo stazionario. Si rende pertanto necessario un approccio di tipo statico alla simulazione delle emissioni attraverso modelli che permettano il calcolo delle emissioni medie (fattori di emissione) nell'intervallo di tempo di riferimento. Queste ultime possono essere espresse, rispetto a tale intervallo, nella forma di emissioni totali o di emissioni per unità di lunghezza percorsa.

Il principale problema che deve essere risolto per operare questo tipo di approccio è l'individuazione delle variabili indipendenti di tipo statico da utilizzare nei modelli matematici per il calcolo delle emissioni, che può essere operato a partire dai risultati ottenuti nella precedente analisi dei modelli dinamici. Il passaggio dalle variabili indipendenti di tipo dinamico a quelle di tipo statico riguarda ovviamente solo quei gruppi di parametri che nell'approccio dinamico erano stati considerati dipendenti dal tempo. Essi sono le caratteristiche cinematiche del moto che determino le emissioni di base e le condizioni termiche del fluido evolvente.

Il calcolo delle emissioni statiche di base si fonda sulla dimostrazione che, sebbene l'influenza sui profili istantanei di emissione delle proprietà puntuali dei cicli di guida sia notevole, i fattori totali di emissione sono invece esprimibili – con una certa approssimazione – in funzione dell'unico parametro rappresentato dalla velocità media del moto [Tartaglia, 1995b]. La notevole correlazione che esiste tra l'entità delle emissioni globali e la velocità media dei veicoli è senza dubbio una proprietà importante del fenomeno dell'emissione. Essa permette infatti di esprimere con buona approssimazione, una volta fissate le caratteristiche del parco veicolare e le condizioni al contorno, un legame funzionale tra le entità delle emissioni inquinanti e le variabili che descrivono il comportamento medio del flusso di traffico.

I modelli statici esprimono le emissioni medie relative a un certo intervallo di tempo di riferimento in funzione dei valori medi delle variabili indi-

pendenti esplicative. Queste ultime sono analoghe a quelle relative ai modelli di tipo dinamico, ma si riferiscono alle caratteristiche medie del fenomeno anziché a quelle istantanee.

Le aliquote di emissione che vengono generalmente computate in un modello statico comprendono le emissioni di base, le emissioni dovute al transitorio termico corrispondente agli spostamenti con partenza a freddo, gli incrementi di emissione dovuti ai cambiamenti della livelletta o altre variazioni della resistenza al moto, quelli dovuti allo stato della meccanica e, solo per gli idrocarburi volatili, le emissioni evaporative.

Le emissioni medie δE saranno nel seguito espresse, per ogni veicolo considerato, in massa per unità di lunghezza percorsa, a esempio in $g \times \text{veic}^{-1} \times \text{Km}^{-1}$.

L'algoritmo di calcolo delle emissioni possiede caratteristiche diverse a seconda dell'inquinante considerato e della tipologia veicolare. Fissati questi due parametri, le emissioni di base vengono computate in funzione delle caratteristiche del moto le quali vengono rappresentate dalla velocità media dello spostamento. Ciò equivale, come detto, ad accettare l'ipotesi che la velocità media del moto sia sufficientemente rappresentativa delle caratteristiche di dettaglio dei cicli di guida rispetto al fenomeno globale delle emissioni. Per ogni sostanza inquinante i di riferimento e ogni gruppo veicolare g considerato, le emissioni di base sono dunque funzione della sola velocità media dello spostamento, e sono eventualmente espresse in maniera diversa per fasce di velocità. Esse saranno indicate con:

$$\delta E_{base}^{i,g}(v_m)$$

Le aliquote di emissione dovute alle variabili che compaiono nel modello di base sono poi computate come funzioni correttive. L'incremento di emissione dovuto al funzionamento in transitorio termico può essere invece espresso in funzione della velocità media e di un certo numero di altre variabili x_1, \dots, x_n fra cui la frazione di spostamento mediamente percorsa con motore freddo, la temperatura ambiente, la lunghezza media degli spostamenti, ecc. Si indichi tale incremento con:

$$\delta E_T^{i,g}(v_m, x_1, \dots, x_n)$$

Fra le cause dell'esistenza di emissioni aggiuntive rispetto a quelle di base vanno annoverate le variazioni della resistenza esterna al moto dovute alla pendenza longitudinale positiva p della via. Le sovraemissioni corrispondenti possono essere espresse in funzione della pendenza stessa ed indicate con:

$$\delta E_p^{i,g}(p)$$

L'esistenza di uno stato della meccanica non di regime per il veicolo considerato determina una aliquota aggiuntiva di emissioni indicata da:

$$\delta E_M^{i,g}$$

Un ultimo contributo di cui si può tener conto è rappresentato, solo per gli idrocarburi volatili, dalle emissioni evaporative. Esse sono in genere considerate funzioni di altre variabili y_1, \dots, y_n fra cui la temperatura ambiente media, le variazioni termiche, la volatilità del combustibile.

Si indicano queste emissioni con:

$$\delta E_{ev}^{HC,g}(y_1, \dots, y_n)$$

Le emissioni totali di inquinante i per unità di lunghezza, dovute ad un flusso di traffico composto da N veicoli ripartiti in n_g gruppi di diverse caratteristiche costruttive secondo le percentuali c_g , sono quindi eguali a:

$$E^i(v_m, x_1, \dots, x_n) = N \sum_{g=1}^{n_g} c_g \cdot (\delta E_{use}^{i,g}(v_m, x_1, \dots, x_n) + \delta E_p^{i,g}(p) + \delta E_M^{i,g} + \delta E_{ev}^{HC,g}(v_m, x_1, \dots, x_n))$$

Si ricorda che le emissioni evaporative sono diverse da zero solo se la sostanza inquinante è costituita da idrocarburi volatili.

L'emissione per unità di lunghezza dovuta ad un veicolo con caratteristiche costruttive medie pesate fra tutti i gruppi appartenenti al parco veicolare, detto fattore di emissione composito, è infine dato da:

$$\delta E^i(v_m, x_1, \dots, x_n) = E^i(v_m, x_1, \dots, x_n) / N$$

I modelli di tipo statico non consentono la stima puntuale delle variazioni dei tassi di emissione durante un generico spostamento; in compenso necessitano di informazioni sulle caratteristiche evaporative del traffico che si

limitano alle caratteristiche ed allo stato medio dei veicoli, ai parametri medi del moto ed alla lunghezza degli spostamenti considerati.

I modelli di tipo statico proposti dalla letteratura specifica che rivestono un certo interesse, sono in particolare i modelli statunitensi MOBILE e FREQ ed il modello CORINAIR, sviluppato nell'ambito di un progetto promosso dalla comunità Europea.

5 La dispersione delle sostanze inquinanti in atmosfera

5.1 Premessa

I più importanti fenomeni che determinano la dispersione sono il *trasporto* delle sostanze nell'aria, la loro partecipazione ai processi di *reazione chimica* e infine la loro deposizione al suolo o, più in generale, la loro *rimozione*.

Il fenomeno del trasporto è puramente fisico e consiste nel movimento delle particelle inquinanti causato dai moti dell'aria normalmente esistenti nell'atmosfera.

Le sostanze inquinanti, una volta emesse nell'aria, vanno a causa di questi moti, ad occupare volumi sempre più vasti facendo sì che in linea generale la loro presenza, massima in corrispondenza della sorgente, decresca progressivamente allontanandosi da questa. Al fenomeno fisico del trasporto si aggiunge quello causato dalle reazioni chimiche. Esse possono avvenire, nelle condizioni fisiche e termodinamiche tipiche dell'atmosfera, sia fra gli stessi componenti della sostanza considerata che fra questi e altre specie chimiche presenti nell'aria. Il risultato può essere una modifica della composizione dell'aria con un aumento o una diminuzione della specie inquinante. Il fenomeno della deposizione al suolo di una sostanza presente in atmosfera può avere diverse cause. Fra queste sono rilevanti l'azione della gravità e l'azione delle piogge che dilavano la sostanza verso il basso.

Il risultato dell'azione contemporanea dei fenomeni accennati dà luogo alla presenza, in un certo punto dello spazio e in un certo istante di tempo, di una determinata quantità della generica sostanza inquinante che altera la naturale composizione dell'aria atmosferica. La misura di queste quantità viene normalmente effettuata in termini di *concentrazione*, ovvero specificando l'entità dell'inquinante presente in una porzione unitaria di aria. Questo parametro è strettamente legato agli effetti che l'inquinante produce su quelle componenti

dell'ecosistema che ne vengono a contatto. Le variabili dimensionali più frequentemente usate per esprimere le concentrazioni inquinanti sono il rapporto massa/volume (rapporto fra la massa inquinante presente in una certa porzione di atmosfera e il volume della porzione stessa). Mentre il primo parametro è usato in riferimento sia agli inquinanti presenti in aria sottoforma di particelle solide che a quelli gassosi, il secondo viene adoperato esclusivamente per questi ultimi. Le unità di misura generalmente usate per esprimere i rapporti massa/volume sono i grammi per metro cubo (g/m^3) oppure, per sostanze le cui concentrazioni in aria sono tipicamente più basse di questa scala, i milligrammi, microgrammi o nanogrammi per metro cubo (mg/m^3 , $\mu\text{g/m}^3$, ng/m^3). I rapporti volume/volume sono generalmente espressi in parti di inquinante per milioni di parti di aria (parti per milione, ppm). Per il modo in cui la concentrazione è stata definita, la sua misura dipende dalle condizioni termodinamiche dell'atmosfera. Per uniformare la scala di misura è pertanto necessario rapportare le misure a condizioni di riferimento, che generalmente sono definite da una temperatura di 25°C e una pressione di 1 atm. In queste condizioni la relazione che intercorre tra due misure della stessa concentrazione, l'una ($c^{(M)}$) espressa in g/m^3 e l'altra ($c^{(V)}$) espressa in ppm, è la seguente:

$$c^{(M)} = \frac{M}{24500} c^{(V)}$$

dove M è il peso molecolare della sostanza inquinante considerata.

Come accennato in precedenza, il valore della concentrazione di una determinata sostanza nell'atmosfera dipende sia dal punto dello spazio che dall'istante di tempo in cui essa viene misurata. I fenomeni che danno luogo all'esistenza delle concentrazioni sono tuttavia estremamente rapidi, così che le variazioni nel tempo delle concentrazioni inquinanti sono di tale entità da rendere estremamente difficoltosa la misura istantanea e problematica l'interpretazione del significato fisico di quest'ultima. Per ovviare a queste difficoltà, la misura delle concentrazioni viene in pratica espressa come media temporale su intervalli di tempo sufficientemente lunghi da permettere di specificare una tale media.

Indicando con $T = [t_1, t_2]$ l'intervallo di tempo di riferimento e con $c(t)$ il valore istantaneo della concentrazione all'istante di tempo t , il valore medio di concentrazione c al quale si riferisce è dato da:

$$\frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} c(t) dt$$

L'intervallo T è detto tempo di media della misura ed è generalmente maggiore o uguale ad 1 h; valori delle concentrazioni corrispondenti a tempi di media minori sono di significato fisico incerto a causa della variabilità dei fenomeni in gioco e di minor interesse pratico poiché gli effetti delle sostanze inquinanti sull'ambiente si manifestano solo in seguito ad una loro apprezzabile persistenza. Poiché tutti i valori di misura delle concentrazioni sono in pratica mediati su un tempo T , esso deve essere sempre specificato per chiarire il senso della misura, che dal valore di T dipende in maniera sensibile.

5.2 Le dinamiche atmosferiche

Pressoché la totalità dei fenomeni di inquinamento atmosferico avviene nella porzione più bassa dell'atmosfera chiamata “*Planetary Boundary Layer*” (Strato Limite Planetario), o PBL. Il PBL comprende la parte di troposfera nella quale la struttura del campo anemologico risente dell'influenza della superficie terrestre e si estende fino a oltre 1 Km di altezza.

I più importanti fattori meteorologici che interessano i fenomeni di inquinamento atmosferico sono (Zannetti, 1990):

- il vento orizzontale (velocità e direzione), generato dalla componente geostrofica e modificato dal contributo delle forze d'attrito del terreno e da effetti meteorologici locali, come brezze marine, di monte e di valle, circolazioni urbano-rurali, ecc.;

- la stabilità atmosferica, che è un indicatore della turbolenza atmosferica alla quale si devono i rimescolamenti dell'aria e quindi il processo di diluizione degli inquinanti;
- la quota sul livello del mare;
- le inversioni termiche che determinano l'altezza del PBL;
- i movimenti atmosferici verticali dovuti a sistemi baroclini od orografici.

L'importante ruolo assunto dalla **stabilità atmosferica** nella dispersione degli inquinanti induce alcuni cenni su questo concetto.

Nella troposfera la temperatura normalmente decresce all'aumentare dell'altitudine. Il profilo di temperatura di riferimento per valutare il comportamento delle masse d'aria è quello osservato per una particella d'aria che si innalza espandendosi adiabaticamente. Quando il profilo reale coincide con quello di riferimento, una particella d'aria – a qualsiasi altezza venga portata – si trova in equilibrio indifferente, cioè non ha alcuna tendenza né a salire né a scendere (*atmosfera neutra*). Quando la temperatura decresce con l'altezza più velocemente del profilo di riferimento, le particelle d'aria ad ogni quota si trovano in una condizione *instabile* perché se vengono spostate sia verso il basso che verso l'alto continuano il loro movimento nella medesima direzione allontanandosi dalla posizione di partenza. Se, invece, la temperatura decresce con l'altezza più lentamente del profilo adiabatico, o addirittura aumenta (situazione detta di “inversione termica”), le particelle d'aria sono inibite sia nei movimenti verso l'alto che verso il basso e la situazione è detta *stabile*.

Condizioni neutre sono dunque caratterizzate dalla presenza di un gradiente di temperatura adiabatico ($\frac{\Delta T}{\Delta z} \approx 9.86 \text{ }^\circ\text{C/Km}$) e si verificano tipicamente durante le transizioni notte-giorno, in presenza di copertura nuvolosa, o con forte vento.

Condizioni instabili si verificano quando il trasporto di calore dal suolo verso l'alto è notevole, come accade nelle giornate assolate.

Le condizioni stabili, che si verificano tipicamente nelle limpide notti continentali con vento debole, sono le più favorevoli ad un ristagno ed accumulo degli inquinanti.

I più gravi episodi di inquinamento si verificano in condizioni di inversione termica; in questi casi, infatti, gli inquinanti emessi al di sotto della quota dell'inversione (a meno di possedere un'energia meccanica sufficiente a forare l'inversione), non riescono ad innalzarsi poiché risalendo si trovano ad essere comunque più freddi e dunque più pesanti dell'aria circostante.

Concetto connesso a quello di stabilità atmosferica, e di diretto interesse nella previsione degli inquinanti atmosferici, è la **diffusione turbolenta**. Il rapido ed irregolare movimento di macroscopiche porzioni di fluido che caratterizza questo fenomeno avviene a scale molto più grandi di quelle coinvolte nella diffusione molecolare, e perciò il contributo di quest'ultima nella dispersione di inquinanti è trascurabile. Il livello di turbolenza nel *Planetary Boundary Layer* cresce al crescere della velocità del vento, della rugosità della superficie terrestre e dell'instabilità atmosferica. La turbolenza, infatti, è indotta sia da componenti meccaniche che da componenti termiche (forze di galleggiamento dovute alla differenza tra la forza gravitazionale e la spinta di Archimede).

5.3 Parametri meteorologici e loro misure

La determinazione del tipo di clima fornisce importanti indicazioni sul tipo di inquinamento a cui può essere soggetta un'area geografica. A tal fine è necessario studiare il campo di temperature, il campo anemologico, la turbolenza atmosferica nonché la frequenza delle precipitazioni e delle nebbie.

Questi fenomeni meteorologici vengono usualmente definiti tramite la caratterizzazione dei seguenti parametri: temperatura, pressione, umidità, piovosità, radiazione solare, direzione e velocità del vento.

La **temperatura** dell'aria viene espressa in °C; secondo le norme dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale il sensore si deve collocare tra 1,25 e 2,00 m dal suolo (WMO, 1983).

Per stimare l'altezza dello strato di rimescolamento e per verificare la presenza o meno di strati di inversione termica, valutandone lo spessore e l'altezza dal suolo, è necessario rilevare il profilo verticale di temperatura. La misura del gradiente verticale della temperatura può essere condotta in continuo mediante sensori situati su "torri meteorologiche", o in maniera discontinua con lanci di palloni a perdere, o ancora con sensori al suolo per il telerilevamento, come il *Radio Acoustic Sounding System* (RASS).²

La **velocità** e **direzione del vento** sono misurate rispettivamente in metri/secondo e in gradi sessagesimali rispetto al Nord. La quota standard per le misure al suolo è 10 m (WMO, 1983). Per il calcolo della direzione di provenienza del vento vengono utilizzati prevalentemente tre metodi:

1. la direzione prevalente, cioè il settore nel quale si verifica la massima frequenza di eventi durante l'intervallo di tempo dell'osservazione;
2. la media vettoriale della velocità vento;
3. la media aritmetica della direzione del vento.

Condizioni di *calma* e di *vento variabile* vengono attribuite rispettivamente quando l'intensità del vento è molto bassa e quando la deviazione standard della direzione del vento risulta molto elevata.

² Il RASS è costituito da un generatore di onde acustiche e da un ricetrasmittitore radio. Il generatore acustico invia verso l'atmosfera un treno di onde sinusoidali (*burst*) ed il trasmettitore radio invia in continuo un'onda elettromagnetica nella banda VHF. La pressione dell'onda acustica produce una variazione dell'indice di rifrazione dell'aria che genera una riflessione parziale dell'onda radio verso il radiorecettore. Per effetto Doppler, la frequenza radio di ritorno è spostata rispetto a quella inviata di una quantità che è proporzionale alla velocità dell'onda acustica. La misura della frequenza radio di ritorno, eseguita in successione dal radar Doppler in corrispondenza ad ogni pacchetto di impulsi audio, permette di tracciare il diagramma delle velocità di propagazione dell'onda acustica alle diverse quote. Poiché tale velocità è funzione della radice quadrata della temperatura dell'aria, il RASS fornisce, in definitiva, il profilo della temperatura in quota.

Le distribuzioni congiunte del valor medio della direzione e della velocità del vento vengono sintetizzate nei caratteristici diagrammi della "rosa dei venti", di cui in figura 4 si riporta un esempio.

Per il rilevamento del profilo del vento in quota è possibile utilizzare sistemi di telerilevamento, come il *Sound Detection System And Ranging* (SODAR)³.

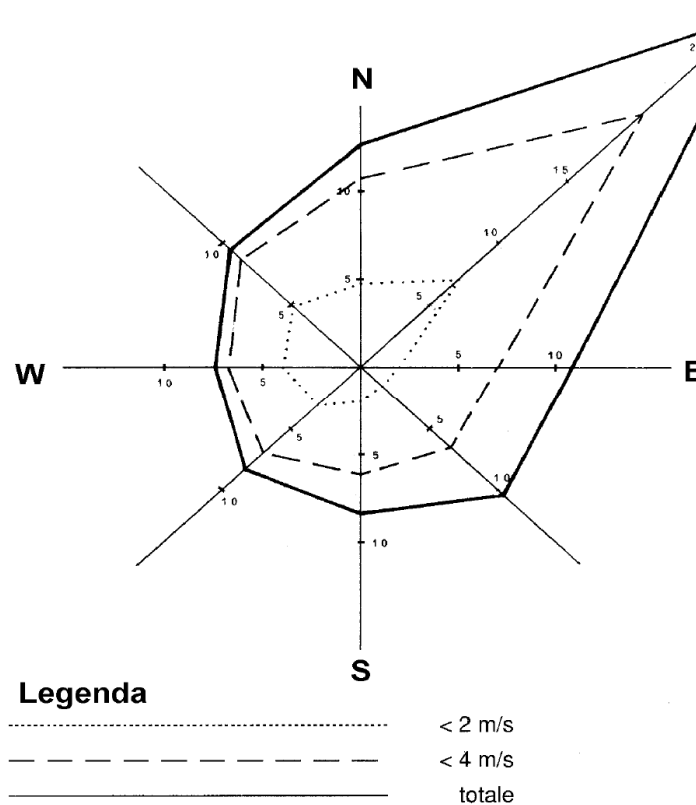


Figura 5.1 – Esempio di Rosa dei venti

³ Il funzionamento del SODAR è basato su di un generatore di onde acustiche che emette nell'atmosfera un treno d'onde sinusoidali (*burst*), con frequenze di 1-2 kHz. L'interazione con l'atmosfera produce una diffusione delle onde. Una parte dell'energia ritorna al trasduttore che l'ha generata, il quale la trasforma in segnale elettrico. Per effetto Doppler, il segnale di ritorno ha frequenza diversa dal segnale di partenza. La differenza di frequenza fra impulso emesso ed impulso ricevuto dà la velocità della massa d'aria che l'ha riflesso, mentre il tempo di ritardo dell'eco fornisce la quota alla quale è avvenuta la riflessione. Operando con trasmettitori acustici in tre direzioni si ricostruisce il vettore velocità del vento.

La **stabilità atmosferica** può essere caratterizzata con diversi metodi, fra questi in particolare quelli basati su :

- il numero di Richardson dei flussi, Rf , ovvero il rapporto tra il tasso di dissipazione (o produzione) di turbolenza termica e il tasso di turbolenza dovuta a sforzi tangenziali di scorrimento (rispettivamente $Rf < 0, = 0$ e > 0 per condizioni instabili, neutre e stabili);
- la lunghezza di Monin-Obukhov, L che può definirsi come l'altezza sopra il livello del suolo per cui la produzione di turbolenza meccanica eguaglia quella termica ($1/L < 0, = 0$ e > 0 rispettivamente per condizioni instabili, neutre e stabili);
- metodi empirici, tra cui il più famoso è lo schema di Pasquill, presentato nella tabella 1, i cui parametri di riferimento sono l'intensità del vento al suolo, la radiazione solare e la copertura del cielo.

Metodi alternativi a quello di Pasquill utilizzano il valore della deviazione standard σ della direzione orizzontale del vento, il cosiddetto “*sbandieramento*”, oppure la valutazione del gradiente termico verticale, $\Delta T/\Delta z$, grandezza direttamente connessa al significato fisico di stabilità atmosferica (tabella 1).

| <i>Velocità del vento al suolo (m/s)</i> | <i>Insolazione (W/m²)</i> | | | <i>Stato del cielo notturno</i> | |
|--|--------------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| | <i>Forte > 700</i> | <i>media 350 - 700</i> | <i>debole < 350</i> | <i>copertura > 4/8</i> | <i>copertura < 4/8</i> |
| < 2 | A | A - B | B | | |
| 2 - 3 | A - B | B | C | E | F |
| 3 - 5 | B | B - C | C | D | E |
| 5 - 6 | C | C - D | D | D | D |
| > 6 | C | D | D | D | D |

A = INSTABILITÀ FORTE, B = INSTABILITÀ MEDIA , C = INSTABILITÀ DEBOLE,
D = NEUTRALITÀ, E = STABILITÀ DEBOLE, F = STABILITÀ FORTE

Tabella 2 – Definizione delle classi di stabilità di Pasquill.

Le diverse definizioni, in effetti, non sono del tutto coincidenti (soprattutto perché le grandezze che individuano le classi hanno significati diversi) per cui

può accadere che la medesima situazione atmosferica venga attribuita, a seconda del metodo utilizzato, a due classi di stabilità distinte.

5.4 La capacità ambientale

Un ulteriore fattore legato alla dispersione delle sostanze inquinanti è rappresentato dalle caratteristiche geometriche della via, in particolare la larghezza della strada e l'altezza degli edifici prospicienti su di essa. Questi due parametri (larghezza della strada ed altezza degli edifici) hanno un'influenza notevole sulle concentrazioni di inquinanti nell'aria. Strade larghe con edifici di modesta altezza difatti favoriscono il processo di dispersione; al contrario strade strette con edifici molto alti ostacolano la dispersione ed in queste strade è facilitato l'accumulo degli inquinanti. Quindi assume particolare rilievo il rapporto altezza degli edifici/larghezza della strada.

Più è alto questo rapporto maggiormente ostacolata sarà la dispersione delle sostanze inquinanti, in particolare si parla di strada "canyon" quando l'altezza degli edifici è almeno pari alla larghezza della strada.

Un concetto legato alle caratteristiche della strada è quello di *capacità ambientale*. La *capacità ambientale* di un tronco stradale è il massimo flusso K che può percorrerlo senza che la concentrazioni di inquinanti nell'atmosfera ad esso dovuto superi una soglia di tolleranza(in genere si considera tale soglia coincidente con il livello di attenzione).

Come già osservato in questo capitolo la concentrazione di monossido di carbonio è alta in prossimità delle fonti di emissione e si va rapidamente riducendo quando ci si allontana da esse, per cui la concentrazione di CO misurata in prossimità di una strada è in gran parte dovuta al flusso che percorre quella strada: proprio per questo è possibile stabilire una relazione fra le concentrazioni di CO ed il flusso veicolare che ne è la causa, mentre gli altri inquinanti NO₂ e di O₃ sono secondari e quindi dipendono marginalmente dalle condizioni di traffico.

Per questo motivo sembra opportuno, nel calcolo della capacità ambientale, riferirsi alle sole concentrazioni di CO, ritenendo che, se i flussi veicolari sui vari archi di una rete di trasporto non danno luogo a pericolose concentrazioni di CO, anche le concentrazioni di NO₂ e di O₃, delle quali tali flussi sono responsabili, si manterranno al di sotto delle rispettive soglie di tolleranza

6 Microsimulazione del traffico

6.1 Introduzione

La microsimulazione del traffico è uno degli strumenti di valutazione degli effetti di scelte progettuali; fornisce tutti gli elementi per una dettagliata analisi e consente di visualizzare in maniera realistica il movimento dei singoli veicoli e l'evoluzione del traffico sulla rete stradale. Il vantaggio di questa metodologia di studio è la possibilità di conoscere anticipatamente le variazioni dei flussi di traffico già in fase di progetto, e quindi di validare/invalidare le diverse scelte progettuali (sia di tipo costruttivo che di tipo organizzativo). Utilizzare questo strumento riduce notevolmente il rischio di scelte progettuali/organizzative che si potrebbero rivelare errate una volta messe in atto. L'approccio è di tipo micro poiché, durante tutto l'intervallo di analisi, il comportamento di ogni singolo veicolo viene simulato sulla base di algoritmi decisionali di tipo comportamentale che stabiliscono di volta in volta il cambio di corsia, regolano la distanza dal veicolo che precede, l'immissione nelle corsie di accelerazione e decelerazione, i sorpassi, ecc. Ad ogni veicolo sono associate caratteristiche dimensionali e comportamentali; le prime riguardano lunghezza, larghezza, velocità massima, accelerazione, ecc. dei veicoli mentre le seconde sono relative alla guida dei conducenti (rispetto dei limiti di velocità, aggressività, ecc). Rispetto ai classici modelli di assegnazione, che sono basati su formulazioni matematiche nelle quali il traffico degli autoveicoli è trattato astrattamente come un fluido che si incanala nei possibili percorsi, i modelli di microsimulazione del traffico simulano il comportamento di ogni veicolo con le sue specifiche caratteristiche di guida. La microsimulazione utilizza un tipo di approccio psico-fisiologico, basato sullo studio dei fattori del comportamento umano. Tale approccio si basa sul modello di percezione psicofisica di Wiedemann da cui seguono le logiche di car-following e di lane changing (questi modelli verranno illustrati nei prossimi paragrafi). Di fatto particolari algoritmi

impongono il comportamento uomo-vettura determinandone il movimento longitudinale e trasversale. Il modello dei flussi di traffico utilizzato è un modello microscopico, stocastico e discreto che considera le unità conducenti/veicolo come singoli elementi. La simulazione dei flussi di traffico attraverso la rete avviene tenendo conto del movimento delle singole unità conducenti-veicolo. Ogni veicolo inoltre possiede le proprie caratteristiche relative alle prestazioni dei mezzi (es. l'accelerazione massima o la velocità) o alle caratteristiche dei guidatori (es. il tempo di reazione o la velocità desiderata). La coppia veicolo/guidatore viene considerata come un unico elemento e non viene quindi separato il processo decisionale dal controllo del veicolo. Ogni conducente viene assegnato, con i parametri che descrivono il suo comportamento, ad uno specifico veicolo. Il comportamento del conducente si trova quindi in accordo con le prestazioni tecniche del veicolo. Di seguito verrà descritto il modello di Wiedemann, uno dei più usati oggi.

Lo studio delle problematiche connesse al deflusso veicolare è oggetto di ricerca sin dalla metà dello scorso secolo. Lo sviluppo del sistema dei trasporti stradali ha infatti da sempre messo in evidenza il problema del mantenimento e miglioramento delle condizioni di sicurezza di guida. Un vasto filone di ricerca si è quindi concentrato sulla modellizzazione del deflusso veicolare, con lo scopo di creare strumenti che permettessero di gestire e di progettare adeguatamente il sistema dei trasporti.

Tra gli approcci modellistici sviluppati nel corso degli anni quello della simulazione microscopica del deflusso veicolare riveste un ruolo particolarmente importante. Tale approccio permette di descrivere il moto dei singoli veicoli e di simulare il traffico nel suo complesso mediante la loro interazione. Questo tipo di modelli viene utilizzato sia come strumento per realizzare analisi di traffico che per rappresentare, ad esempio all'interno di un simulatore di guida, l'evoluzione di veicoli virtuali e la loro interazione col veicolo pilotato.

La corretta rappresentazione delle dinamiche di evoluzione dei veicoli e di conseguenza del traffico è tuttavia una problematica complessa. In particolare la simulazione del moto longitudinale dei veicoli è un aspetto cruciale dei

modelli microscopici. Sono stati seguiti molti approcci per sviluppare gli strumenti di microsimulazione. Nel settore dell'ingegneria sono state messe a punto strutture che riproducono alcuni comportamenti propri della coppia veicolo/guidatore e che cercano di rispecchiare le proprietà globali (macroscopiche) del deflusso veicolare. Nel campo dei fattori umani sono stati invece modellizzati alcuni dei processi decisionali propri del soggetto umano (guidatore) come, ad esempio, la percezione del moto dei veicoli.

Uno dei dibattiti principali riguardo ai modelli microscopici di deflusso veicolare concerne il livello di astrazione col quale devono rappresentare il fenomeno reale in relazione allo scopo per cui devono essere utilizzati. Al di là di ciò, è possibile definire alcuni comportamenti di base che dovrebbero essere correttamente rappresentati per far sì che il modello sia sufficientemente coerente con la realtà.

Il comportamento reale dei guidatori è molto eterogeneo e dipende non solo dall'ambito di guida (es. urbano o extra-urbano) e dalla quantità di veicoli presenti (es. traffico scarso o congestionato) ma anche dalle caratteristiche dei soggetti umani. La disomogeneità di comportamento dei guidatori è inoltre alla base dei fenomeni di instabilità del deflusso veicolare verificabili nel sistema reale per valori della portata prossimi alla congestione dell'infrastruttura.

I modelli presenti in letteratura non sono sempre in grado di simulare adeguatamente tutti gli aspetti relativi al comportamento del singolo guidatore e del traffico nel suo complesso (esempi di analisi di validità dei modelli non sono infatti frequenti). Un aspetto spesso trascurato, a causa delle difficoltà connesse alla raccolta ed elaborazione dei dati, concerne ad esempio la calibrazione e validazione dei modelli microscopici, ovvero la verifica della loro capacità di riprodurre le traiettorie reali dei veicoli.

Nell'ambito dello svolgimento della tesi, ha rivestito un ruolo chiave l'uso dei modelli di microsimulazione veicolare, che sono progettati per riprodurre il comportamento del traffico in una rete di trasporti nel tempo e nello spazio per

predire il rendimento/performance dell'intero sistema osservato in vera grandezza.

Il risultato è di rappresentare le condizioni attuali e/o future di traffico a partire dalle ipotesi di partenza.

Tali modelli includono l'astrazione matematica e logica dei sistemi reali implementati attraverso un software, che tiene conto delle regolamentazioni di circolazione, del comportamento dell'utente, delle velocità commerciali delle varie categorie dei veicoli e delle configurazioni geometriche dei percorsi.

Il modello di simulazione che "gira" può essere osservato come performance di un esperimento come reale condizione che si può verificare sul campo, descrivendo la variazione dello stato di un sistema attraverso intervalli temporali discreti.

Ci sono generalmente due tipi di modelli classificati a seconda che gli intervalli di tempo di aggiornamento siano fissi o variabili:

Modelli Discrete Time (Time-Scan): il sistema è aggiornato ad intervalli di tempo fissi. Per esempio il modello calcola la posizione del veicolo, velocità e accelerazione ad intervalli di un secondo. La maggior parte dei modelli di microsimulazione impiegano una risoluzione di 0,1 secondi di risoluzione per aggiornare il sistema. I sistemi di traffico sono solitamente modellati usando modelli "time-scan", che esplorano il tempo, perché questi producono un continuo cambio di stato.

Modelli Discrete Event (Event-Scan): in questi modelli l'intervallo temporale varia in lunghezza e corrisponde all'intervallo tra due eventi. Per esempio, una prestabilita fase semaforica (es. verde) rimane costante per 30 secondi fino a che il suo stato cambia improvvisamente a giallo.

6.2 I modelli di deflusso veicolare

La simulazione del deflusso veicolare ha inizio durante gli anni '50 con lo scopo di rappresentare in maniera realistica i fenomeni connessi al traffico veicolare, di prevederne l'evoluzione e quindi di fornire un ausilio alla ge-

stione del sistema dei trasporti.

Le prime ricerche si basavano sull'assunzione che il moto dell'insieme dei veicoli presenti su un tronco stradale potesse essere rappresentato assimilandolo al moto di un fluido continuo mono-dimensionale. Questa assunzione permise di definire alcune variabili di stato, funzioni del tempo e dello spazio, quali il flusso, la densità e la velocità veicolare. La rete stradale viene considerata come una rete di canalizzazioni percorsa dai flussi di traffico. Le caratteristiche dei tronchi della rete (capacità, velocità medie, ecc.) e la domanda di mobilità (volume di traffico, origine/destinazione dei veicoli, ecc.) determinano il modo con cui la rete viene percorsa da tali flussi. L'evoluzione nel tempo delle variabili di stato vengono modellizzate attraverso un'equazione differenziale che include sia la conservazione della massa che la relazione sperimentale stazionaria tra flusso e densità.

Questo tipo di modelli, detti **macroscopici**, possono essere classificati in base alla loro rappresentazione dello spazio, assumendo che il tempo sia rappresentato in maniera continua (Cascetta, 2006). I modelli a spazio continuo si basano su variabili definite in ogni punto dello spazio; soluzioni analitiche di questi modelli sono state fornite per schemi molto semplici mentre situazioni più complesse richiedono una soluzione numerica attraverso una discretizzazione spazio/temporale. I modelli a spazio discreto sono invece più prossimi ai modelli statici: le variabili di base che influenzano la prestazione del ramo (densità e velocità) sono definite a livello dell'intero ramo; la loro soluzione richiede solitamente una discretizzazione temporale.

La ricerca ha successivamente portato alla definizione di modelli, detti **mesoscopici**, in cui viene simulato il moto del singolo veicolo (oppure pacchetti di veicoli). In questi modelli, il flusso di traffico è discreto mentre il moto dei veicoli dipende da leggi aggregate che descrivono la relazione tra le variabili del deflusso (es. la velocità media in funzione della densità) o da funzioni probabilistiche (es. i cosiddetti modelli gas-cinetici che descrivono le dinamiche delle distribuzioni di velocità).

Una quantità significativa di lavori sono stati anche realizzati per au-

mentare la qualità e l'accuratezza dei modelli di simulazione del deflusso veicolare. Molti di questi lavori si sono concentrati sui modelli **microscopici** che nascono dalla necessità di rappresentare l'interazione tra i singoli veicoli. Il moto dei veicoli si ottiene come risultato di scelte disaggregate individuali e delle interazioni con gli altri mezzi presenti sulla rete. La scelta del percorso, le decisioni di accelerare o di cambiare corsia, il comportamento alle intersezioni di ogni singolo veicolo vengono esplicitamente modellizzate. Ogni veicolo inoltre possiede le proprie caratteristiche relative, ad esempio, alle prestazioni dei mezzi (es. l'accelerazione massima o la velocità) o alle caratteristiche dei guidatori (es. il tempo di reazione o la velocità desiderata).

I modelli microscopici solitamente considerano la coppia veicolo/guidatore come un unico elemento e non separano quindi il processo decisionale del guidatore dal controllo del veicolo. La ragione principale alla base di questa scelta è dovuta al fatto che questi modelli sono stati messi a punto e vengono tuttora utilizzati principalmente con lo scopo di analizzare i sistemi di traffico. Di solito il comportamento dei flussi di traffico viene riprodotto come risultato dell'interazione tra i guidatori, in maniera tale da ottenere una rappresentazione realistica delle dinamiche del deflusso veicolare. Anche se i modelli sono disaggregati, in quanto riproducono il moto dei singoli veicoli, sono spesso utilizzati per analisi aggregate (flussi, lunghezze di coda, tempi di percorrenza, ecc.).

I campi di applicazione degli approcci appena descritti possono cambiare sensibilmente. I modelli macroscopici e mesoscopici sono utilizzati per simulare il sistema con lo scopo di progettare e testare le misure di controllo. Anche se ciò dipende dalle dimensioni della rete e dalle capacità di calcolo, di solito i tempi di computazione di questi modelli sono sensibilmente inferiori al tempo reale. Ciò li rende quindi adatti anche per applicazioni in tempo reale. Al contrario, quando si utilizzano dei modelli microscopici, i tempi di calcolo aumentano con l'avvicinarsi della congestione della rete (cioè col numero di veicoli che devono essere elaborati), il che di solito restringe il loro uso ad applicazioni off-line.

La scelta del modello da utilizzare dipende naturalmente dal livello di dettaglio richiesto dall'applicazione. L'utilizzo di un modello microscopico si rende necessario, ad esempio, quando è richiesta una rappresentazione dettagliata del comportamento degli individui. Bisogna comunque notare che la corrispondenza tra livello di dettaglio e livello di accuratezza non può essere garantita; essa è infatti fonte di dibattito in letteratura.

6.3 I modelli microscopici di deflusso

I modelli microscopici di deflusso veicolare cercano di riprodurre comportamenti aggregati descrivendo le dinamiche dei singoli elementi (veicoli). Per questa ragione sono considerati il fondamento della teoria del deflusso. Alcuni modelli macroscopici dinamici derivano infatti da considerazioni microscopiche (es. il modello di Payne), così come l'insieme dei modelli (stazionari) di flusso di traffico possono essere ottenuti dall'integrazione di leggi microscopiche (es. il modello della GM). Inoltre, i modelli microscopici di deflusso sono il principale componente degli strumenti di microsimulazione del traffico.

La simulazione microscopica del traffico permette di riprodurre le diverse fasi della guida: moto longitudinale, cambio corsia, moto sulle rampe di accesso, ecc. Nel proseguo della tesi, tuttavia, verranno considerati solo i modelli che rappresentano il moto longitudinale dei veicoli. Anche questa fase dell'attività di guida può essere suddivisa in sotto-fasi: guida libera (ovvero non condizionata dalla presenza di altri veicoli), avvicinamento ad un veicolo più lento, inseguimento di un veicolo, frenata, arresto e ripartenza, ecc.

I primi modelli di moto longitudinale messi a punto cercavano di simulare i diversi regimi di guida mediante l'uso di un'unica formulazione matematica. Tali modelli, detti di "car-following" in quanto si riferivano principalmente alla simulazione del processo di inseguimento di un veicolo, non erano però adatti a rappresentare correttamente la variabilità dei comportamenti di guida relativi alle diverse sotto-fasi. Nel corso degli anni, la ricerca si è quindi orien-

tata alla definizione di modelli multi-regime che fanno uso di più formulazioni matematiche per simulare le principali fasi del moto longitudinale dei veicoli.

In funzione dell'approccio su cui si basano i modelli, è possibile distinguere due categorie di modelli di moto longitudinale:

- *approccio ingegneristico*, basato principalmente su funzioni matematiche di trasferimento;
- *approccio psico-fisiologico*, basato sullo studio dei fattori umani.

I modelli che seguono l'approccio ingegneristico cercano di simulare le dinamiche reali, da un punto di vista fenomenologico, basandosi su poche semplici assunzioni. I primi modelli supponevano, ad esempio, che la risposta del veicolo inseguitore (follower) dipendesse direttamente dalla velocità relativa tra il veicolo e il suo leader. Altri modelli si basavano sull'assunzione che i guidatori cercano sempre di mantenere una distanza di sicurezza rispetto al veicolo che li precede. Secondo Newell (2002) invece il moto dei veicoli su un tronco può essere modellizzato semplicemente traslando la traiettoria del veicolo leader.

I modelli basati sull'approccio psico-fisiologico, prendendo in considerazione variabili come la percezione del guidatore o alcune regole comportamentali, cercano di sopperire ad alcuni dei limiti dei modelli appartenenti alla prima categoria riguardo al realismo della simulazione. Questi modelli sono generalmente orientati a riprodurre il processo decisionale umano (o almeno alcuni suoi aspetti) alla base dell'attività di guida.

I modelli che fanno parte dell'approccio ingegneristico sono utilizzati principalmente nell'ingegneria dei trasporti, per studi di traffico. Gli altri sono utilizzati quando i comportamenti dei guidatori devono essere analizzati in maniera approfondita; ad esempio, quando l'introduzione nella corrente veicolare di veicoli equipaggiati con sistemi avanzati di ausilio alla guida deve essere valutata. I modelli basati sull'approccio psico-fisiologico potrebbero anche sembrare più appropriati per rappresentare il moto dei veicoli virtuali nei simulatori di guida; in tal caso si richiede infatti un elevato realismo dei comporta-

menti simulati dei guidatori. Ad oggi, tuttavia, non esistono riferimenti a riguardo; la scelta del giusto compromesso tra realismo e semplicità modellistica è oggetto di ricerca.

6.4 Principi guida della scelte del micro simulatore

La microsimulazione può fornire al ricercatore valide informazioni sulla performance dei sistemi di trasporto esistenti e i miglioramenti potenziali. Tuttavia, la microsimulazione può anche richiedere un impegno temporale considerevole e un'intensa attività. La chiave per ottenere un'analisi di microsimulazione efficace è l'osservazione di alcuni principi guida:

- *utilizzare lo strumento appropriato.* Comprendere i limiti dello strumento e assicurarsi che questo rappresenta accuratamente le teorie operative del traffico. Accertarsi che il modello possa essere applicato al fine di supportare e raggiungere gli obiettivi della ricerca e possono essere indirizzati e risolti i problemi e le domande;
- *Traffic Analysis Toolbox, Volume II: Decision Support Methodology for Selecting Traffic Analysis Tools* (Federal Highway Administration (FHWA), presenta una metodologia per la selezione e scelta appropriata del tipo di strumento di analisi del traffico;
- non utilizzare il microsimulatore se non sono disponibili il tempo e le risorse. Le mancate applicazioni possono ridurre la credibilità e possono essere al centro di controversie e polemiche;
- buoni dati sono critici per buoni risultati dei modelli di simulazione;
- gli output di un microsimulatore sono differenti da quelli dell'Highway Capacity Manual (HCM). Le definizioni dei termini chiave, come "i ritardi", e "le code", sono differenti al livello microscopico (modelli di microsimulazione) rispetto al livello macroscopico tipico dell'HCM;
- prima di intraprendere lo sviluppo di un modello di microsimulazione, stabilire gli scopi tenendo in considerazione le aspettative, i compiti e

comprendere come lo strumento sarà supportato dalle decisioni ingegneristiche. Identificare le limitazioni conosciute;

- per ridurre i disaccordi fra i soggetti interessati, includere delle revisioni periodiche con obiettivi (milestones) prudenti nel processo di sviluppo e calibrazione.

6.5 Rappresentazione del traffico veicolare

I modelli di simulazione sono generalmente classificati rispetto al livello di dettaglio con cui essi rappresentano i flussi di traffico. Tale classificazione è abbastanza diretta ed inequivocabile.

In generale occorre distinguere i modelli per lo studio dei flussi veicolari in:

- *modelli microscopici*, che si concentrano sulla descrizione dinamica del singolo veicolo,
- *modelli macroscopici*, che sono basati su equazioni che tengono conto di quantità mediate come densità dei veicoli e flussi medi.

Esiste una terza classe di modelli, spesso definita o riferita ai *modelli mesoscopici*.

Modelli di microsimulazione: questi modelli simulano le caratteristiche ed interazioni dei singoli veicoli. Essenzialmente essi producono le traiettorie dei veicoli descrivendo come questi si muovono attraverso la rete. Il processo logico include algoritmi e regole descrivendo come i veicoli si muovono, interagiscono, comprese l'accelerazione, la decelerazione, il cambio di corsia e le manovre di sorpasso.

I modelli di microsimulazione sono potenzialmente più accurati dei modelli di macrosimulazione.

Tuttavia, questi impiegano molti più parametri che richiedono una calibrazione. Inoltre, i parametri dei modelli di macrosimulazione (es. la capacità) sono osservabili sul campo. La maggior parte dei parametri dei modelli di microsi-

mulazione non possono essere osservati direttamente sul campo (es. la minima distanza tra i veicoli nelle situazioni di car-following).

6.6 Il processo di micro-simulazione

I modelli di microsimulazione impiegano vari sub-modelli, relazioni analitiche e logiche per modellare e rappresentare il flusso veicolare in ogni sua condizione e in tutte le sue caratteristiche.

Per focalizzare quanti aspetti chiave del processo di simulazione probabilmente influenzeranno la scelta dell'uso di un particolare strumento e l'accuratezza dei risultati, i modelli di simulazione includono algoritmi e logiche per:

- *generare i veicoli all'interno del sistema che si vuole simulare*
- *muovere i veicoli all'interno del sistema*
- *modellare le interazioni tra i veicoli*

6.6.1 Generazione dei veicoli

All'inizio della simulazione il sistema si ipotizza vuoto, ciò vuol dire che al suo interno non si considera la presenza di veicoli interferenti.

I veicoli che vengono presi in esame sono soltanto quelli generati nei nodi considerati origine della rete, basandosi sui volumi di traffico di input (corrispondenti ai valori rilevati in una data sezione stradale) e su una distribuzione degli intervalli temporali ipotizzata a priori.

Per esempio, supponendo che il volume previsto sia di 600 veic/h per un periodo di 15 min e che il modello utilizzi una distribuzione uniforme degli intervalli temporali tra i veicoli, si avrebbe un veicolo generato con sequenza temporale pari a:

$$H = \text{media degli intervalli temporali} = 3600/V = 3600/600 = 6 \text{ sec}$$

Se il modello usasse, invece, una distribuzione esponenziale negativa per simulare gli arrivi dei veicoli nei nodi generatori della rete anziché utilizzare una distribuzione uniforme, allora i veicoli sarebbero generati con sequenza temporale pari a:

$$h = (H - h_{\min}) [-\ln(1 - R)] + H - h_{\min}$$

dove:

h = intervallo (in secondi) che intercorrono tra una coppia di veicoli generate

h_{\min} = minimo intervallo (es. 1 sec)

R = numero casuale (da 0 a 1)

6.6.2 Generare le caratteristiche guidatore-veicolo

Quando un veicolo viene generato agli ingressi della rete, il modello di simulazione assegna delle caratteristiche guidatore-veicolo, tenendo conto delle caratteristiche elencate di seguito:

Veicolo: Tipologia (auto, autobus, veicolo pesante), lunghezza, larghezza, accelerazione e decelerazione massima, velocità massima, raggio massimo di sterzata, ecc.

Guidatore: aggressività di guida, tempo di reazione, velocità desiderata, intervalli temporali o spaziali critici (per stazionare, inserirsi o attraversare una corsia, destinazione (percorso), ecc.

Occorre evidenziare che differenti modelli possono impiegare attributi aggiuntivi per ciascuna unità guidatore-veicolo per garantire una maggiore corrispondenza tra la simulazione e le condizioni reali.

Ciascun attributo può essere rappresentato nel modello da costanti (es. tutti i veicoli hanno una lunghezza di 4,90 m.), da relazioni funzionali (es. la massima accelerazione del veicolo è una funzione lineare della sua velocità), o distribuzioni probabilistiche (es. la velocità desiderata è ottenuta da una distribuzione normale).

La maggior parte dei modelli di microsimulazione utilizzano delle distribuzioni statistiche per rappresentare gli attributi veicolo-guidatore. Le distribuzioni statistiche impiegate per rappresentare la variabilità degli attributi guidatore-veicolo e i loro parametri dovranno essere calibrati per riflettere le condizioni specifiche del contesto analizzato.

Ai guidatori viene associato in modo casuale un “indice di aggressività” variabile da 1 (molto aggressivo) a 10 (estremamente prudente), disegnato da una distribuzione uniforme per rappresentare la variabilità del comportamento del guidatore.

I valori assegnati al modello di simulazione sono ricavati dall’analisi reale su campo del comportamento di un campione rappresentativo di utente stradale, che tiene conto delle variabili tipologie di utente, delle varie necessità per le quali effettuare lo spostamento, dei tempi di percezione e reazione delle varie categorie di utenti, ecc.

6.6.3 Movimento del veicolo

Questa sezione descrive brevemente il processo per la simulazione del movimento del veicolo e come questo impatta con l’ambiente fisico.

L’ambiente fisico – la rete di trasporti in studio – è generalmente rappresentata in maniera schematica da nodi e archi. Gli archi possono essere uni o bidirezionali con fissate caratteristiche geometriche, mentre i nodi rappresentano le intersezioni o i punti dove le caratteristiche geometriche o progettuali degli archi si modificano (restringimento di carreggiate, inizio di un doppio senso di circolazione, ecc).

I modelli di simulazione possono avere differenti limiti in termini di estensione dell’area da rappresentare o massimo numero di nodi e archi, e ciò avviene sia per motivi di licenza software ma anche, a volte, per garantire comunque una certa velocità di elaborazione ed efficienza del modello.

I veicoli, in assenza di condizioni esterne di disturbo (es. altri veicoli), viaggiano alla loro velocità desiderata o velocità di flusso libero sui rami della rete. Tuttavia tale velocità può essere modificata da specifiche caratteristiche geometriche della rete e dalla segnaletica orizzontale e verticale.

Tuttavia, non tutti i modelli di microsimulazione lavorano nella modellazione della velocità del veicolo in termini di caratteristiche geometriche del tracciato. I veicoli procedono attraverso la rete fino a che non fuoriescono dal sistema giungendo alla loro destinazione.

Generalmente, è possibile individuare due tipologie di modelli di simulazione: basati sulle percentuali di veicoli in svolta e basati sulla matrice Origine-Destinazione.

Nei modelli basati sulla matrice O-D, l'input è la matrice stessa, e quando un veicolo è generato da una origine, automaticamente viene anche assegnata la sua destinazione. Così il veicolo dovrà necessariamente uscire dalla rete da quella pre-assegnata destinazione.

Nei modelli basati sulle percentuali di svolta, la destinazione del veicolo è assegnata in modo casuale ogni qualvolta questo si inserisce in un nuovo arco della rete, con l'unico vincolo di assicurare alla fine della simulazione il flusso veicolare totale o la frazione di questo, a valle di ogni singolo arco.

Per esempio, per un veicolo che si inserisce in una intersezione semaforizzata, la sua destinazione (andare dritto o svoltare) è determinata in modo casuale, tenendo conto soltanto del valore di flusso o di percentuale del flusso totale, assegnato a ciascuna manovra, come dato di ingresso della simulazione per quello specifico arco.

Questo implica anche che i modelli basati su percentuale di svolta non sono adatti a seguire la performance dei singoli veicoli all'interno della rete e di valutare l'efficacia di alcune scelte degli ITS (es. una frazione di veicoli che viene equipaggiata con dei sistemi di informazione in tempo reale).

I modelli di simulazione impiegano vari approcci per guidare i veicoli all'interno della rete. Questi generalmente adottano segnali di allarme per segnalare al veicolo simulato il cambio di corsia perché ciò è necessario per usci-

re alla fine della rampa di uscita, perché la loro corsia sta terminando o c'è un ostacolo/blocco alla fine della strada. La localizzazione dei segnali di allarme può influire significativamente sulla accuratezza e precisione della simulazione. Per esempio, i veicoli che procedono in una strada libera alla velocità di 97 km/h (27 m/s) potrebbero mancare o non essere in grado di imboccare la loro uscita in mancanza di questo avviso nel caso stiano procedendo nella corsia mediana di una strada multicorsia e richiedere una successione di cambi di corsia per uscire alla fine di un arco di lunghezza ridotta.

6.6.4 Interazione fra i veicoli

I modelli di microsimulazione simulano le interazioni dei singoli veicoli quando questi si spostano nella rete usando il car-following, il lane-changing e gli algoritmi per la delocalizzazione delle code.

Adesso analizziamo brevemente e più in dettaglio i modelli sopra menzionati:

6.6.4.1 Il modello car-following

Il modello di car-following descrive il comportamento del connubio conducente/veicolo (in seguito semplicemente veicolo) longitudinalmente, posa le sue basi su misurazioni e indagini del comportamento di guida umana, rappresenta la percezione delle distanze e delle velocità del conducente nonché le sue reazioni alle situazioni percepite. La teoria di car-following si basa sul seguente principio: il conducente di un veicolo più rapido comincia a frenare nel momento in cui raggiunge la sua soglia individuale di percezione. Dal momento che non sa stimare in maniera esatta la velocità del veicolo che lo precede, la velocità del suo veicolo diminuisce al di sotto di questa, e ciò ha per conseguenza un'accelerazione dopo il superamento della fase di percezione. Ne ri-

sulta una successione di lievi azioni di accelerazione e decelerazione. L'influenza sul proprio movimento è caratterizzata dalla percezione del movimento relativo del veicolo davanti, cambiamenti a distanza e differenza di velocità. I cambiamenti sono solo percepiti se l'impulso fisico eccede un certo valore minimo, chiameremo questo valore soglia. In questo caso, l'impulso fisico è la percezione del veicolo davanti. La percezione di un cambiamento dipende da quanto velocemente cambia l'immagine del veicolo davanti, che è una funzione della differenza di velocità e distanza. Le misurazioni e le osservazioni sono state fatte con lo scopo di trovare i limiti della percezione umana, ossia di determinare la cosiddetta soglia. Queste ricerche gettano la base del modello car following sviluppata da **Wiedemann**. Il comportamento di guida umano è distribuito naturalmente; in questo modo si vuole tenere conto delle diverse abilità di guida, diverse percezioni, diverse necessità di sicurezza, diverse velocità desiderate e diversi valori massimi di accelerazione e decelerazione accettati. Lo stesso si ritiene per alcuni parametri che caratterizzano le capacità del veicolo come la velocità minima e l'accelerazione e decelerazione massima. Questo fenomeno naturale può essere rappresentato attraverso distribuzioni normali, ma l'esatta conoscenza sulle distribuzioni non è disponibile. Per questo motivo, per il calcolo dei valori di soglia e per le funzioni di guida sono usati all'interno del modello parametri casuali. La percezione e la reazione umana sono rappresentate da un insieme di soglie e distanze desiderate. Queste soglie delimitano le diverse aree definendo differenti situazioni di interazione tra due veicoli in coda:

1. il veicolo non è influenzato da alcun veicolo davanti;
2. il veicolo è consapevolmente influenzato perché il conducente ha percepito un veicolo davanti più lento;
3. il veicolo è inconsapevolmente influenzato essendo in un processo che segue o in una situazione di emergenza.

Diverse procedure di guida sono associate alle diverse aree che rappresentano la guida umana sotto le condizioni date.

Vediamo di descrivere ora tutte quelle grandezze significative e le loro relazioni che nel loro insieme definiscono matematicamente il modello car-following:

- *Distanza desiderata per veicoli fermi*

$$A_X = L + A_{X,add} + RND_I(I)A_{X,mult}$$

Dove:

A_X è la distanza desiderata per veicoli fermi (misurata davanti-davanti);

L è la lunghezza del veicolo anteriore;

$A_{X,add}$ e $A_{X,mult}$ sono entrambi parametri di calibratura e rappresentano la distanza anteriore e posteriore;

$RND_I(I)$ è un parametro distribuito normalmente con valori compresi fra 0 e 1.

- *Distanza minima desiderata a bassa velocità*

$$AB_X = A_X + B_X$$

Dove:

B_X è un termine che dipende dalla velocità (i conducenti tendono a sottostimare le distanze di sicurezza alle alte velocità e guidano più rischiosamente alle velocità più alte rispetto a quelle più basse; questo fenomeno è rappresentato dal parametro B_X). Si determina dalla:

$$B_X = (B_{X,add} + B_{X,mult} \cdot RND_I(I)) \cdot \sqrt{v}$$

$B_{X,add}$ e $B_{X,mult}$ sono parametri di calibratura che definiscono il campo della variazione;

$RND_I(I)$ è un parametro distribuito normalmente con valori compresi fra 0 e 1; v è la velocità del veicolo davanti per le decelerazioni (se il veicolo in esame si avvicina al veicolo che lo precede) o la propria velocità per i processi di accelerazioni (se il veicolo in esame si allontana da quello che lo precede).

- *Soglia di percezione della differenza di velocità a lunghe distanze*

Questa soglia segna il punto al quale il conducente realizza consapevolmente che egli si sta avvicinando ad un veicolo più lento. Se il cambio di corsia è impossibile, allora il conducente reagirà riducendo la propria velocità rispetto alla

velocità del veicolo davanti che prova a mantenere una distanza maggiore del AB_X . Le misurazioni effettuate mostrano che più velocemente il veicolo si avvicina più grande è la percezione della distanza; ancora oggi si fa uso di una distribuzione normale dei valori:

$$SDV = \left(\frac{\Delta X - A_X}{C_X} \right)^2$$

ΔX è la distanza reale;

SDV è la soglia di percezione della differenza di velocità a lunghe distanze;

C_X è un parametro che tiene conto della distribuzione normale, si determina dalla:

$$C_X = C_{X,cons} \cdot \{ C_{X,add} + C_{X,mult} \cdot [RND_1(I) + RND_2(I)] \}$$

Dove:

$C_{X,cons}$, $C_{X,add}$ e $C_{X,mult}$ definiscono i campi della soglia;

$RND_2(I)$ è, come $RND_1(I)$, un parametro distribuito normalmente anch'esso con valori compresi fra 0 e 1.

C_X è rappresentativo di un campo compreso fra 25 e 75.

- *Soglia di percezione della distanza crescente nella fase d'inseguimento.*

Questa soglia descrive che il conducente riconosce che sta permettendo al veicolo che segue di allontanarsi. Egli reagirà accelerando per raggiungere la marcia in avanti ideale. Le misurazioni risultano nella variazione tra 1,5 e 2,5 volte la distanza minima di chi segue per questo parametro. Tale valore è calcolato tramite la:

$$SD_X = A_X + E_X \cdot B_X$$

SD_X è la soglia di percezione della distanza crescente nella fase d'inseguimento;

E_X è un parametro casuale indipendente del conducente, si determina dalla relazione:

$$E_X = E_{X,add} + E_{X,mult} \cdot [NRND - RND_2(I)]$$

$E_{X,add}$ e $E_{X,mult}$ definiscono i campi del parametro;

$NRND$ è un parametro casuale indipendente del conducente;

Per i conducenti che hanno buone abilità, $RND_2(I)$ è vicino a 1.0, l'elemento E_X avrà un valore medio più piccolo e da qui SD_X sarà più piccolo. Il conducente riconosce presto che egli sta terminando la fase d'inseguimento. Piccole oscillazioni di distanza saranno il risultato.

- *La soglia percettiva per riconoscere piccole differenze di velocità subito, decrescendo le distanze*

Nel seguire il veicolo davanti a piccole differenze di velocità il conducente percepisce che egli si sta avvicinando. Egli dovrà decelerare per evitare un incidente. Questo parametro è simile in natura a SDV , ma ha un più ampio campo di variazione, è circa 4 volte SDV . Dal momento che gli stessi fattori di SVD influenzano tale soglia, l'elemento E_X può essere usato pure per la sua descrizione. E' definito come:

$$CLDV = SDV \cdot E_X^2$$

- *Soglia della percezione per riconoscere le piccole differenze di velocità in breve tempo ma con distanze che aumentano*

Il campo di variazione è anche più grande del campo del $CLDV$. In modo aggiuntivo ci sono ulteriori variazioni per lo stesso conducente. Le misurazioni effettuate risultano essere più grandi da circa 1 a 3 volte del $CLDV$. Si determina dalla:

$$OPDV = CLDV \cdot (-OPDV_{add} - OPDV_{mult} \cdot NRND)$$

Dove:

$OPDV_{add}$ e $OPDV_{mult}$ definiscono il campo;

$NRND$ è un parametro casuale indipendente del conducente.

Un limite superiore di reazione descrive la distanza massima per interazione tra i due veicoli. Le osservazioni mostrano che non c'è influenza significativa tra i due veicoli a distanze superiori di 150 metri. Le soglie descritte delimitano 4 tipi di comportamenti di guida, la guida non influenzata, la fase di avvicinamento, la fase d'inseguimento e la frenata di emergenza. Ogni tipo è rappre-

sentato da procedure che calcolano il comportamento reale nella guida, per esempio il valore di accelerazione nella direzione longitudinale.

$BNULL$ rappresenta il valore più basso di accelerazione e decelerazione. Le misurazioni mostrano che questo valore ha una media di circa $0,2 \text{ m/s}^2$. Si determina dalla:

$$BNULL = BNULL_{mult} \cdot (RND_3(I) + NRND)$$

Dove:

$RND_3(I)$ rappresenta l'abilità dei conducenti a controllare l'accelerazione, anch'esso è un parametro distribuito normalmente con valori compresi fra 0 e 1;

$NRND$ è il parametro del conducente indipendente, che modella la variazione per lo stesso conducente.

Il grafico riportato di seguito mostra graficamente tutto quello che è stato descritto sopra, cioè il diverso comportamento del conducente in funzione della distanza del veicolo che lo precede e della loro differenza di velocità.

bile di un veicolo di dato tipo è funzione della velocità reale e della velocità massima. La volontà dei conducenti ad usare l'accelerazione dipende dalla loro velocità desiderata e dalla reazione della velocità desiderata alla velocità reale. Per i veicoli pesanti l'accelerazione massima dipende dalla potenza del motore in relazione al carico. Nel modello, l'accelerazione massima è calcolata per le auto che portano passeggeri:

$$B_{MAX} = B_{MAX,mult} \cdot (V_{MAX} - V \cdot FaktorV)$$

Dove:

$$FaktorV = \frac{V_{MAX}}{V_{DES} + FaktorV_{mult} \cdot (V_{MAX} - V_{DES})}$$

Per i veicoli pesanti:

$$B_{MAX} = MIN \left\{ \begin{array}{l} 2,5 (-B_{MAX,add} + B_{MAX,mult} \cdot KwperTo) \\ (-B_{MAX} V_{add} - B_{MAX} V_{mult} \cdot KwperTo) \cdot v \end{array} \right.$$

Dove:

V_{max} è la velocità massima;

V_{DES} è la velocità desiderata;

V è la velocità reale;

$KwperTo$ è la potenza del motore espressa in KW per tonnellata.

Tutti gli altri elementi sono parametri di calibratura.

Fase di avvicinamento; eccedendo la soglia SDV il conducente è consapevole che si sta avvicinando ad un veicolo più lento. Dopo un breve ritardo per la reazione fisica, egli inizierà a decelerare provando a ridurre la sua velocità alla velocità del veicolo davanti tenendo sempre una distanza più lunga della AB_x .

L'equazione cinematica per la decelerazione ad un obiettivo che si muove è:

$$B(I) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V^2}{AB_x - \Delta X} + B_{(I-1)}$$

Dove:

ΔV è la differenza della velocità reale;

ΔX è la distanza reale;

AB_x è la distanza minima ambita;

$B_{(t-1)}$ è l'accelerazione del veicolo davanti.

$B(I)$ è il valore obiettivo della necessaria decelerazione. I conducenti umani non si comporteranno in questo modo deterministico. Il comportamento umano è naturalmente distribuito sulla stima e le abilità di guida. Questo potrebbe essere modellato dal variare dei valori stimati di ΔX e ΔV e $B_{(t-1)}$. Lo stesso effetto può essere raggiunto col variare del valore calcolato oggettivamente di $B(I)$. L'errore della stima umana è rappresentato aggiungendo un ulteriore termine a $B(I)$:

$$B(I)_{human} = B(I) + \frac{(1 - RND_2(I)) \cdot (1 - 2 \cdot NRND)}{R(I)}$$

L'abilità di stima umana è rappresentata da $RND_2(I)$, meglio un conducente umano stima il movimento relativo del veicolo davanti, più alta sarà $RND_2(I)$, e più piccolo il periodo aggiuntivo. L'errore di stima può essere positivo o negativo. Questo è modellato dal secondo fattore e dal parametro indipendente del conducente $NRND$. $R(I)$ rappresenta un processo di apprendimento durante l'avvicinamento consapevole; l'errore di stima dipende dalla durata del processo di avvicinamento. Più a lungo un conducente sta decelerando, meglio stimerà il movimento del veicolo davanti. $R(I)$ è incrementato ad ogni secondo. La decelerazione massima possibile dipende dalle capacità del veicolo, dalla volontà del conducente e dalle condizioni stradali. $R(I)$ è, inoltre, una funzione della velocità reale ed è modellata da diversi tipi di veicoli attraverso la:

$$B_{MIN} = -B_{MIN,add} - B_{MIN,multi} \cdot RND_4(I) + B_{MIN} V_{multi} \cdot V$$

con $RND_4(I)$ che rappresenta la variazione distribuita naturalmente delle capacità del veicolo e della volontà o abilità dei conducenti ad usarlo, vedi figura.

Fase d'inseguimento. il conducente sta seguendo quasi alla stessa velocità il veicolo davanti. Egli non reagisce consapevolmente ai movimenti del veicolo davanti, ma cerca di mantenere l'accelerazione bassa. Questo è rappresentato dal valore più basso di accelerazione e decelerazione. $BNULL$ è usato come

accelerazione positiva e negativa. Questo è modellato mantenendo il segno di B_{NULL} come accelerazione fissata fino a quando una delle soglie $CLDV$, $OPDV$, AB_x o SD_x è superata.

Frenata d'emergenza: una improvvisa decelerazione di un veicolo davanti può causare una situazione di pericolo per colui che segue ottenendo una distanza reale più bassa della distanza minima desiderata. Il conducente reagirà cercando di evitare un incidente e provando a tornare ad una distanza più lunga della distanza minima desiderata. Questo è modellato calcolando la decelerazione come somma delle due principali relazioni:

$$B(I) = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta V^2}{A_x - \Delta X} + B_{(I-1)} + B_{MIN} \cdot \frac{AB_x - \Delta X}{B_x}$$

La prima relazione rappresenta la relazione cinematica per la decelerazione ad un obiettivo in movimento. Questo obiettivo ora è A_x , perché AB_x è stato superato. L'ultima relazione rappresenta un valore di decelerazione che dipende da quanto la distanza desiderata è stata superata. Per la distanza reale ΔX uguale alla distanza minima desiderata AB_x questa relazione è nulla. Aumenta linearmente fino ad una decelerazione massima B_{MIN} per la distanza assoluta alla distanza minima A_x . La stima umana è considerata allo stesso modo del comportamento di avvicinamento normale aggiungendo una relazione all'oggettivamente calcolata $B(I)$ che rappresenta l'errore di stima.

6.6.4.2 I modello Lane Changing

Il modello di comportamento umano di **lane changing** è basato su indagini e misurazioni effettuate da Willmann e Sparmann (1978). Anche questo modello vuole riprodurre il comportamento conducente/vettura nei confronti del traffico circostante. Willmann ha sviluppato un modello teorico che rappresenta i processi decisionali umani che riguardano il lane changing. Dal momento che entrambi i tipi di movimento del veicolo sono basati su decisioni umane influenzate dalla percezione umana dei veicoli circostanti, entrambi i modelli

hanno la stessa base: la rappresentazione della percezione umana dei movimenti del relativo veicolo. E' chiaro il forte legame tra il modello lane changing e il modello car following. Il modello è stato reso valido con i risultati di misurazioni macroscopiche. Le misurazioni estensive sono state intraprese da Sparmann per investigare il comportamento umano nel cambiamento di corsia su strade a senso unico microscopicamente. I risultati di queste misurazioni sono state usate per raffinare il modello teorico, per calibrarlo e convalidarlo. La scelta del guidatore della corsia (laddove ovviamente c'è la possibilità di scelta) è dettata da quelle che sono le sue aspettative di guida, per esempio raggiungere una certa velocità, o meglio una velocità desiderata riferita ad un conducente, è chiaro che tali velocità sono influenzate da quelle che sono le condizioni nelle corsie adiacenti. La decisione umana di cambiare corsia è frutto di un processo decisionale complesso. Tale modellazione viene determinata da particolari algoritmi in un sistema gerarchico, quindi diverse analisi successive e ordinate di quelle che sono le sue condizioni sulla corsia di marcia e successivamente di quelle adiacenti. Possiamo immaginare che il conducente faccia tre analisi successive e ordinate: grado di soddisfazione della corsia in cui si trova (da questo può nascere l'esigenza di cambiare corsia); grado di soddisfazione delle corsie adiacenti (da questo può nascere il desiderio di cambiare corsia); possibilità di cambiare corsia. Il guidatore cambierà corsia se queste tre analisi successive avranno tutte un esito positivo. I cambi di corsia possono avvenire o su corsie più veloci o su corsie più lente. I primi sono dettati dal desiderio di cambiare verso una corsia più veloce e risulta dalle ostruzioni sulla corsia attuale causate da un veicolo più lento davanti che influenza il proprio movimento. Il livello di ostruzione è una funzione della differenza tra la velocità reale del veicolo davanti e la propria desiderata velocità. I secondi sono dettati invece dall'ordine generale di mantenere la destra o per permettere ad un veicolo più veloce di passare. A prescindere dal tipo di corsia in cui si sposta un veicolo (sia più veloce che più lenta), i cambiamenti sono possibili solo se la manovra non comporta nessuna situazione pericolosa, di conseguenza prima di fare un cambio corsia va valutata la sicurezza della ma-

novra che esso comporta. La sicurezza dipende dalle distanze che si stimano e dalle differenze di velocità nei confronti dei veicoli davanti e dietro sulle rispettive corsie. Come scritto sopra, tutte le decisioni umane sono basate sulla percezione umana. Un modello di percezione analogo è usato per rappresentare la stima umana delle differenze di distanze e velocità nelle decisioni di cambiamento di corsia come per il modello car following. Un conducente umano osserva continuamente i veicoli circostanti, questa osservazione fatta in un arco di tempo più o meno lungo permette al guidatore oltre che di stimare la condizione attuale anche di valutare l'evoluzione futura (tanto più lungo è il tempo di osservazione tanto più precisa sarà la stima) e sfruttare quindi questa situazione di conoscenza del potenziale futuro per la sua scelta di cambiare corsia. Questo è rappresentato nel modello definendo un ulteriore tipo di influenza chiamata "influenza potenziale". L'influenza potenziale rappresenta tutte quelle situazioni in cui il conducente non è influenzato da un veicolo dinanzi, ma egli suppone che ci potrebbe essere una influenza nel prossimo futuro. Vengono definite nuove soglie:

Soglia di differenza della distanza potenziale (SDXP);

Soglia della differenza della velocità potenziale (SDVP);

Questi delimitano l'area dell' influenza potenziale; sono definiti come multipli della soglia che delimita l'influenza reale SD_x e SDV

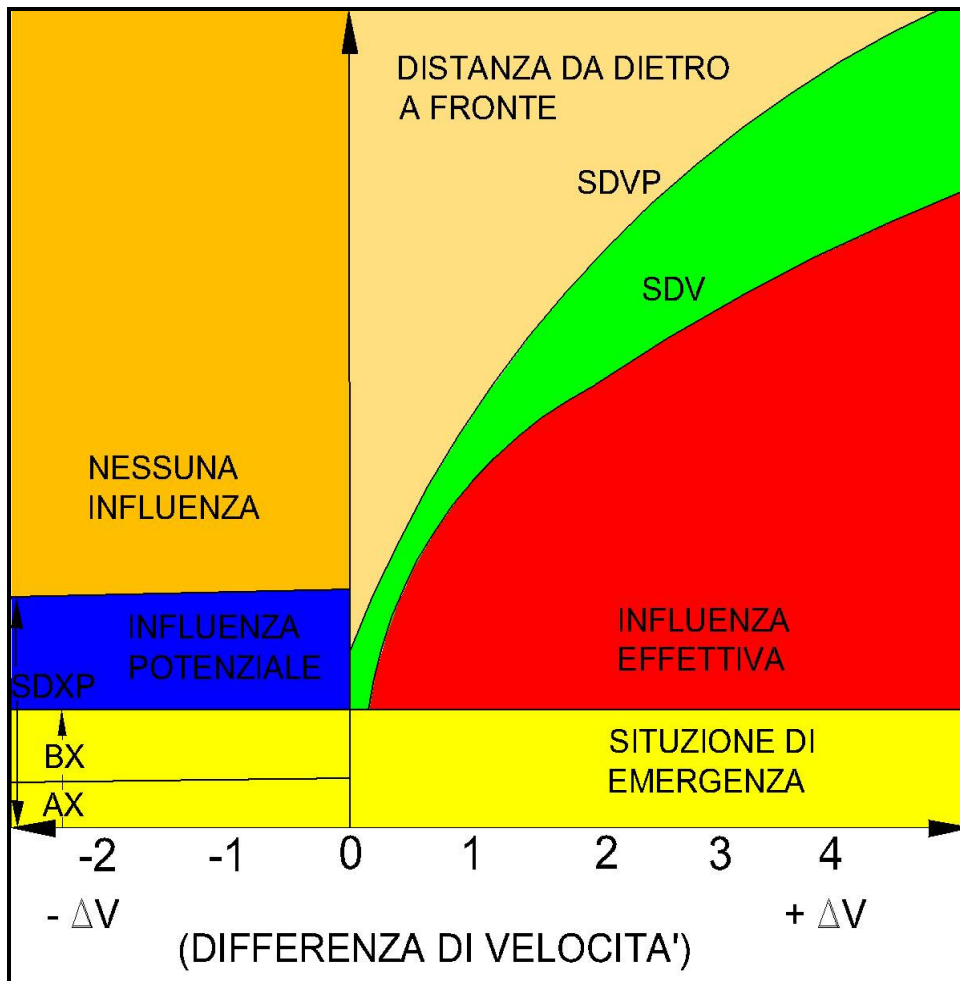


Figura 6.2 - Variazioni dell'influenza potenziale in relazione alla differenza di velocità e della distanza

Sono definiti dalle seguenti relazioni:

$$SDXP := A_X + F_X \cdot B_X$$

$$SDPV := FV \cdot SDV$$

L'influenza potenziale è più "sensibile" della influenza reale. Per la rappresentazione delle decisioni umane sui cambiamenti di corsia l'influenza potenziale è usata in aggiunta alla influenza reale. I fattori moltiplicativi F_X e FV variano a secondo dei veicoli circostanti ed in vista. Questa variazione, si vuole sottolineare, considera una stima umana diversa della differenza di distanza e velo-

cià dei veicoli che sono davanti e i veicoli dietro. Quest'ultimi possono solo essere visti nello specchietto retrovisore. Inoltre, ogni conducente ha una diversa opinione sul livello di ostacolo causato dai veicoli su diverse corsie. Si definiscono quattro tipi di cambiamenti di corsia verso corsie più veloci e due tipi di cambiamenti verso corsie più lente, usando i seguenti parametri:

Per cambiamenti verso la corsia più veloce:

- *TR* (intervallo di reazione): intervallo misurato in tempo dal veicolo che segue al veicolo che precede sulla stessa corsia;
- *LR* (distanza di reazione): distanza dal veicolo che segue al veicolo che precede sulla stessa corsia;
- *LEAD*: intervallo di tempo fra il veicolo che cambia corsia e il veicolo che lo precede nell'altra corsia più veloce;
- *LAG*: intervallo di tempo fra il veicolo che cambia corsia e il veicolo che lo segue nell'altra corsia più veloce;
- *GAP*: intervallo di tempo tra il veicolo che precede e il veicolo che segue sulla corsia più veloce;

Per cambiamenti verso corsie più lente (Figura 4):

- *TR* (intervallo di reazione): intervallo di tempo tra il veicolo che cambia corsia e il veicolo che segue sulla corsia più lenta;
- *LR* (distanza di reazione): distanza tra il veicolo che cambia corsia e il veicolo che segue sulla corsia più lenta;
- *GAP*: intervallo di tempo tra il veicolo davanti e il veicolo che segue sulla corsia più lenta;
- *TB*: intervallo di tempo tra il veicolo che cambia corsia e il veicolo che segue sulla corsia più lenta.

Per entrambi:

- *TS*: durata della manovra di cambio di corsia;
- *LS*: lunghezza della manovra di cambio di corsia.

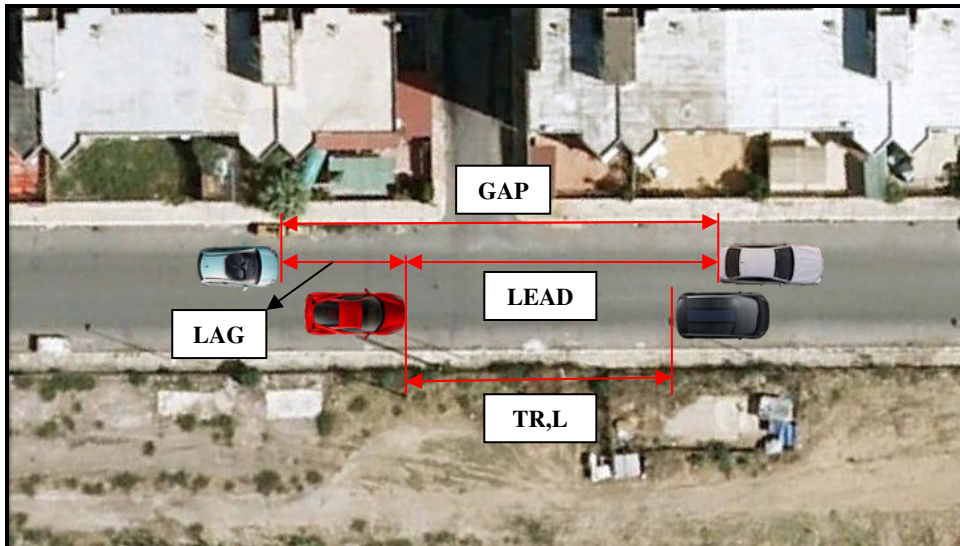


Figura 6.3 - Cambio nella corsia più veloce (veicolo rosso).

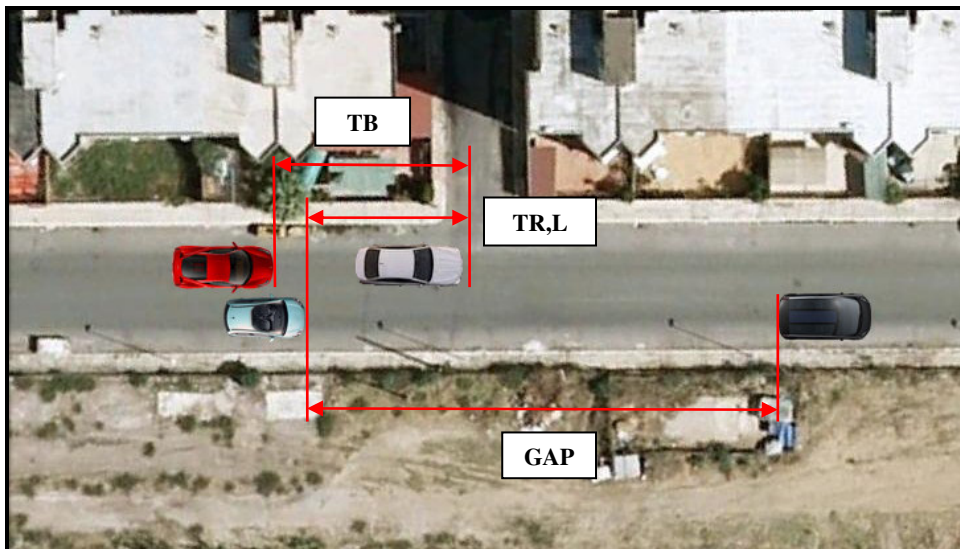


Figura 6.4 - Cambio nella corsia più lenta (veicolo bianco).

Cambio per corsie veloci:

- cambiamenti di corsia *FREE*. Il veicolo che cambia corsia è influenzato solo dal veicolo davanti sulla corsia attuale. Il veicolo davanti e il veicolo che segue sulla corsia più veloce non influenzano la manovra.
- Cambiamenti di corsia *LEAD*. Il veicolo davanti sulla corsia più veloce è più vicino al veicolo che cambia la corsia rispetto al veicolo che lo

precede sulla corsia attuale, di conseguenza influenza il veicolo che cambia corsia.

- cambiamenti di corsia *LAG*. Il veicolo che cambia corsia è più vicino al veicolo che lo segue sulla corsia più veloce, il veicolo che segue sarà influenzato dalla manovra del veicolo.
- cambiamenti di corsia *GAP*. Questo tipo è una combinazione dei cambiamenti di corsia *LEAD* e *LAG*. Il veicolo che effettua il sorpasso è influenzato dal veicolo davanti sulla corsia più veloce, il veicolo che segue sulla corsia più veloce è influenzato dalla manovra del veicolo.



Figura 6.5 - Cambio per corsia veloce: *FREE*



Figura 6.6 - Cambio per corsia veloce: *LEAD*



Figura 6.7 - Cambio per corsia veloce: *LAG*



Figura 6.8 - Cambio per corsia veloce: *GAP*

Cambio per corsia più lenta

- cambiamenti di corsia *FREE*. La manovra non è influenzata dal veicolo segue sulla corsia attuale (Figura 9).
- cambiamenti di corsia *ACCEL*. Il veicolo che segue sulla corsia attuale influenza il veicolo che cambia corsia.



Figura 6.9 - Cambio per corsia lenta: *FREE*

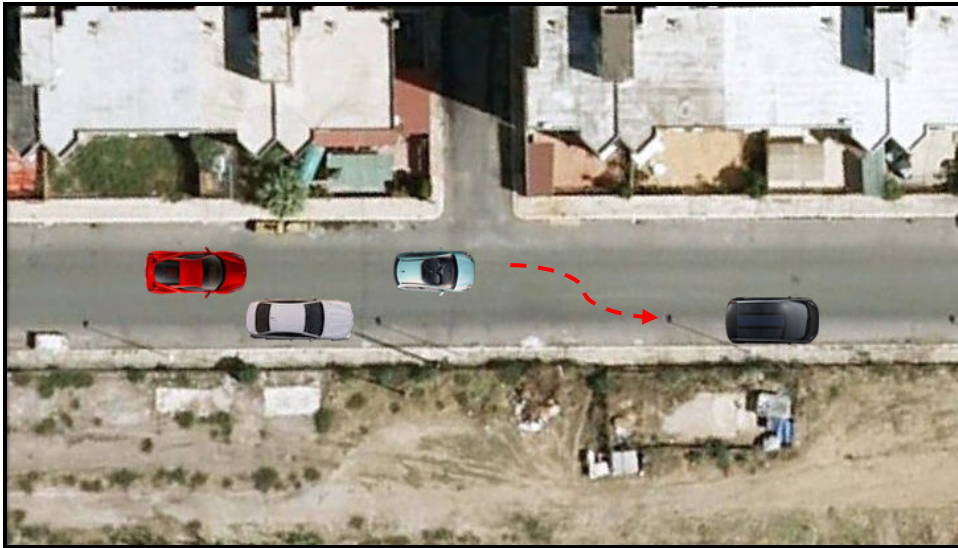


Figura 6.10 - Cambio per corsia lenta: *ACCEL*

6.7 Calibrazione del modello di micro simulazione

Senza calibrazione, non è possibile essere sicuri che il modello possa prevedere correttamente le prestazioni del traffico per il progetto o rete simulata.

La calibrazione è l'adattamento dei parametri del modello per il miglioramento della capacità del modello stesso di riprodurre il comportamento dei guidatori di uno specifico luogo o contesto e le prestazioni dei veicoli e del traffico in generale.

L'importanza della calibrazione tuttavia non deve eccedere nella sovra enfaticizzazione. Test recenti effettuati su sei differenti software di modellazione hanno rivelato che le differenze nella calibrazione vanno dal 13% nella predizione della velocità di deflusso libero, per determinate e note condizioni, fino ad arrivare al 69% di differenza, nel caso di predizione di velocità libere di deflusso in condizioni previsionali, non note. (Bloomberg, L., M. Swenson, and B. Halvors, 2003)

6.7.1 Obiettivi della calibrazione

La calibrazione è necessaria perchè nessun modello può essere ugualmente accurato per tutte le possibili condizioni di traffico. Anche il più dettagliato modello di microsimulazione, può contenere soltanto una parte di tutte le possibili variabili che interferiscono e creano le reali condizioni di traffico. Pertanto finché nessun modello potrà includere interamente le variabili che generano le diverse condizioni di traffico, sarà necessario adattare il modello alle diverse condizioni locali.

Ciascun modello di micro-simulazione funziona con un gruppo di parametri “aggiustabili”, ossia modificabili dal singolo utente del software, in funzione delle condizioni locali. Pertanto, l’obiettivo della calibrazione è di trovare il valore di ciascuno dei parametri del modello che meglio riproduce le condizioni tipiche dei luoghi.

Per una comodità dell’utente, gli sviluppatori del modello prevedono una serie di valori preconfigurati per i parametri del modello. Tuttavia, soltanto in rare circostanze il modello sarà capace di fornire risultati accurati per una specifica area utilizzando solamente i valori di default del modello.

Il ricercatore pertanto dovrà sempre prevedere una serie di prove di calibrazione per assicurarsi che il modello, così configurato riproduca accuratamente le condizioni locali di traffico e il comportamento degli utenti.

L’assunzione fondamentale della calibrazione è che i modelli di comportamento di guida degli utenti sono essenzialmente “suono”, ossia il ricercatore determina la robustezza e solidità del software di simulazione quando lo usa nel suo studio. Non è necessario verificare che essi producono i corretti ritardi, tempi di viaggio e densità quando sono forniti i corretti parametri di ingresso per un ramo. Quindi l’unica operazione che rimane da compiere all’operatore è di modificare leggermente i parametri così che il modello fornisca e descriva correttamente i parametri di traffico.

6.7.2 Approccio alla calibrazione

La calibrazione sviluppa la revisione e "l'aggiustamento" di molteplici potenziali parametri del modello, ciascuno con i propri impatti e ripercussioni sui risultati della simulazione in un modo che spesso è altamente legato alle variazioni degli altri parametri. Il ricercatore può facilmente rimanere intrappolato in un processo circolare vizioso di adattamento, ossia fissando un singolo problema da risolvere spesso nel risolverlo ne nasce uno nuovo.

Pertanto, è fondamentale bloccare e circoscrivere il processo di calibrazione in una serie di passi logici e sequenziali – una strategia di calibrazione.

Per eseguire praticamente la calibrazione, i parametri devono essere suddivisi in categorie e ogni categoria dovrà essere trattata separatamente. L'operatore può dividere i parametri di calibrazione disponibili nelle seguenti due categorie di base:

- parametri di cui l'analista ha maggiore sicurezza e che non dovrà modificare;
- parametri di cui l'analista ha minore sicurezza e che richiederanno una modificazione.

Per minimizzare l'impegno nella calibrazione, si dovrà cercare di intervenire soltanto su un gruppo di parametri strettamente necessario; nella pratica, l'operatore dovrebbe utilizzare un campo di dati osservati che riflettano le condizioni locali. Tali dati osservati serviranno come valori non modificabili per determinati parametri di calibrazione, ciò al fine di ridurre al minimo i parametri soggetti a modificazioni. Tuttavia, al ricercatore occorrerà poter agire su un gruppo non troppo limitato di parametri in modo da mantenere un certo numero di gradi di libertà che garantisce una migliore calibrazione del modello alle caratteristiche specifiche dell'area in studio.

Il gruppo di parametri modificabili quindi può essere ulteriormente suddiviso in quelli che direttamente impattano sulla capacità (come ad esempio il distanziamento medio) e quelli che influiscono direttamente sulla scelta del percorso.

I parametri legati alla capacità saranno quelli calibrati per primi e successivamente quelli che influiscono sulla scelta del percorso.

Ciascuno di questi due gruppi può essere ulteriormente suddiviso in quelli che influiscono sulla simulazione su scala globale e quelli che hanno influenza su scala locale. E come nel caso precedente avranno una priorità di intervento quelli che incidono su scala globale.

I parametri specifici di ogni ramo sono utilizzati successivamente alla calibrazione globale per affinare i risultati.

La strategia raccomandata per il processo di calibrazione è riassumibile nei seguenti tre passaggi:

1. **Calibrazione in funzione della capacità:** una calibrazione iniziale è effettuata per identificare i valori relativi ai parametri di capacità modificabili che determinino nel modello la migliore riproduzione delle capacità di traffico osservate sul campo. Successivamente alla calibrazione globale si procederà ad un affinamento mediante le caratteristiche specifiche del ramo.

Tuttavia, se il campo di misura non risulta flessibile o modificabile con i parametri del modello, allora può essere utilizzato l'HCM come fonte alternativa dei valori di capacità.

2. **Calibrazione della scelta del percorso:** se la microsimulazione include delle strade parallele, allora risulta importante considerare la scelta del percorso. In questo caso risulta necessario definire un secondo processo di calibrazione, ma naturalmente operando sui parametri di scelta del percorso. E successivamente alla calibrazione globale si procederà ad un affinamento mediante le caratteristiche specifiche del ramo.
3. **Calibrazione delle prestazioni del sistema:** infine, la stima della prestazione del modello (tempo di viaggio e code) verrà effettuata confrontando, nel campo, le misure dei tempi di viaggio e delle code. Aggiustamenti verranno eseguiti per permettere al modello di avvicinarsi maggiormente ai valori misurati sul campo.

Di seguito verrà esplicitata la calibrazione in funzione della capacità che è stata adoperata nel caso studio del capitolo 7 ed in particolare sul modello di microsimulazione AIMSUN.

6.7.3 Calibrazione in funzione della capacità

La procedura di calibrazione in funzione della capacità interviene sui parametri legati alla capacità, sia globali che specifici dei rami, nel modello di simulazione al fine di riprodurre le misure di campo dei valori di capacità. Questo rappresenta un passo importante perchè la capacità ha un impatto significativo nella predizione della prestazione del sistema (ritardi e code). Storicamente, tale procedura è stata la pratica adottata per la calibrazione dei modelli di microsimulazione per tutti i rilevamenti di traffico nel campo. La maggior parte di tali rilevamenti non sarà riferita a posizioni non critiche. La strategia consigliata è porre l'attenzione (a questo passo del processo di calibrazione) solamente sui rilevamenti nei punti critici, nei colli di bottiglia, e utilizzare il modello per riprodurre i valori correttamente. Una volta eseguita tale operazione, il resto dei rilevamenti verrà utilizzato successivamente per la verifica degli aspetti del modello legati alla scelta dei percorsi, se tale procedura risulta necessaria nello svolgimento dello studio. Tutto quanto precedentemente descritto presuppone che la domanda di traffico sia stata inserita correttamente e sia stata già verificata nei confronti dei rilevamenti eseguiti nei rami di ingresso alla rete, come operazione primaria di questo passo (ricerca dell'errore).

L'obiettivo del presente passo della calibrazione è quello di trovare un gruppo di parametri del modello che sia capace quanto più possibile di avvicinare i risultati del modello ai valori di capacità rilevati sul campo.

La calibrazione in funzione della capacità consiste nelle seguenti due fasi:

(1) una fase di *calibrazione globale* e (2) una *fase di affinamento*. La *calibrazione globale* è eseguita per l'identificazione del valore appropriato della grandezza della rete per i parametri di capacità che meglio riproduce le condizioni

rilevate sul campo. Successivamente i parametri di capacità relativi ai singoli rami vengono modificati per *affinare il modello* in modo da migliorare la precisione nella misura della capacità in ciascun ingorgo.

È certamente possibile usare i parametri specifici del ramo esclusivamente durante il processo di calibrazione per la capacità; tuttavia, tale uso elimina i benefici della correzione durante la calibrazione globale. La variazione globale assicura la precisione della capacità di previsione del modello su tutti i rami (anche questi solitamente non congestionati). Mentre le modificazioni operate durante il processo di calibrazione su ciascun ramo assicurano l'accuratezza del modello solamente per quel determinato ramo.

La procedura di calibrazione in funzione della capacità è eseguita nel modo seguente:

1. raccogliere le misure di capacità sul campo;
2. ottenere le stime di capacità dal modello;
3. selezionare i parametri di calibrazione;
4. stabilire le funzioni obiettivo per la calibrazione;
5. effettuare la ricerca del valore ottimale del parametro;
6. affinamento della calibrazione.

La procedura sopra descritta verrà esplicitata con maggiore dettaglio nei paragrafi seguenti.

6.8 *Il modello di microsimulazione VISSIM*

Il VISSIM è un modello di simulazione microscopica della circolazione in campo urbano, prodotto dalla ptv (Germania) e distribuito in Italia dalla tps.

VISSIM è l'acronimo di Verkchr in Stàdten-Simulation (simulazione dei veicoli in città). E' un modello discreto, stocastico, con step di tempo basati sulla micro simulazione, dove l'unità veicolo-guidatore è una singola entità.

Con questo modello si è in grado di simulare la dinamica di ogni singolo veicolo presente nel sistema cercando non solo di descrivere il suo comportamento, ma anche le interazioni tra gli elementi del sistema. Questo modello è definito microscopico perché simula il movimento di ogni singolo veicolo al quale vengono associate caratteristiche fisiche come lunghezza, larghezza ed accelerazione e caratteristiche comportamentali. La circolazione viene simulata tenendo conto delle differenti caratteristiche riguardanti la strutturazione delle corsie, la composizione del traffico, la regolazione delle precedenza agli incroci e le prestazioni dei veicoli del traffico privato come di quelli del trasporto collettivo.

VISSIM può creare reti di traffico sulla base di immagini di sfondo, (per esempio: mappe della città, layout progettuali, foto aeree e disegni in CAD in differenti formati digitali).



Figura 6.11: Possibili scenari progettati con VISSIM

VISSIM può essere utilizzato per trovare soluzioni ad un gran numero di problemi. Alcuni esempi indicativi possono illustrare il vasto campo di possibilità di impiego del VISSIM:

- È possibile effettuare l'analisi della capacità e del funzionamento della circolazione in prossimità di nodi complessi, tenendo conto del transito di tram e bus;
- VISSIM permette di comparare tra di loro diversi scenari progettuali che includono incroci a precedenza regolata da segnaletica, incroci a rotatoria, incroci semaforizzati, e di valutare la capacità della strada;
- VISSIM può essere applicato per valutare la flessibilità e l'impatto di mezzi su rotaia in reti stradali urbane;
- può essere utilizzato per valutare ed ottimizzare le operazioni di traffico in reti con semaforizzazioni attuate e coordinate.

- può essere utilizzato per la stima delle emissioni inquinanti prodotte dal traffico veicolare.

Inoltre gli step di simulazione di 1/10 di secondo permettono una visione fluida e scorrevole della simulazione. L'approccio con il quale il VISSIM simula il comportamento dell'utente è generato da un modello in grado di capire il comportamento del guidatore in funzione delle proprie capacità e dell'ambiente circostante. Tale modello si chiama car-following ed è molto utilizzato in vari programmi di simulazione del traffico.

Il VISSIM impiega il modello di percezione psico-fisica di Wiedemann (1974) che divide la guida in quattro modalità:

1. *free driving mode*: in questa modalità il veicolo non è influenzato dal veicolo che lo precede, di conseguenza cercherà di raggiungere e mantenere la velocità desiderata;
2. *approaching mode*: il veicolo inizia a percepire la presenza del veicolo che lo precede e non riesce a mantenere la velocità desiderata;
3. *following mode*: il veicolo segue quello che lo precede, infatti nel grafico di figura 2 si trova nella zona compresa tra la modalità "free driving mode" e quella minima di sicurezza;
4. *braking mode*: i veicoli sono troppo vicini e quello che sta dietro deve frenare.

Il comportamento del guidatore non varierà il proprio modo di guida, fino a prestabiliti livelli di soglie. Queste soglie svolgono la funzione di separare le diverse modalità. Ogni soglia, nel car-following (v. Figura 2), è utilizzata per far percepire al guidatore la necessità di cambiare il proprio comportamento di guida a causa della presenza degli altri utenti. L'idea di base del modello,

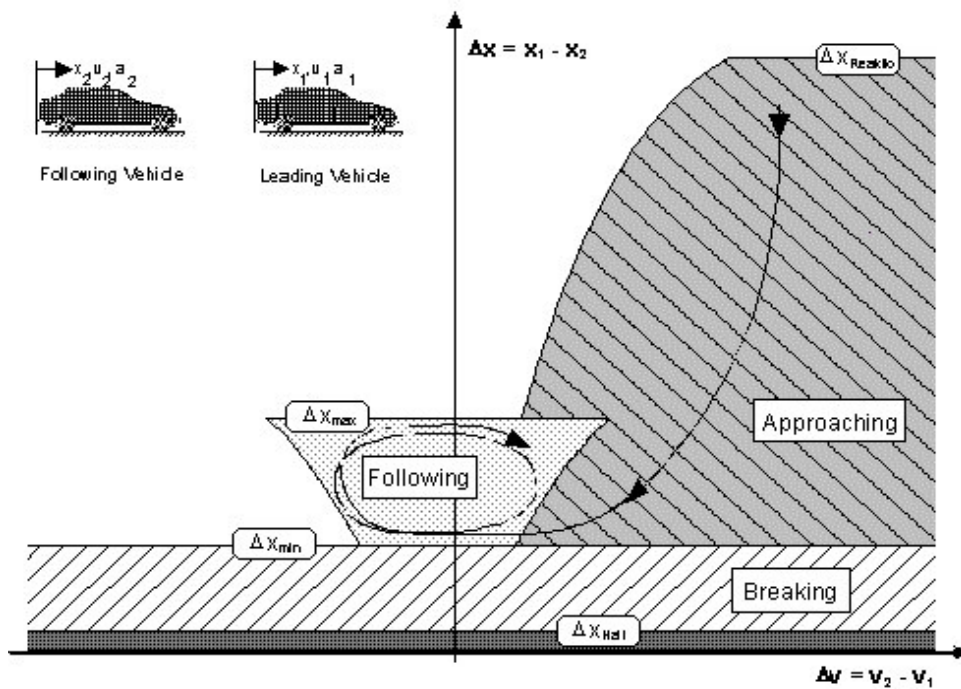


Figura 6.12: Soglie di percezione del modello car-following

sotto sta' alla consapevolezza che il conducente di un veicolo più rapido comincia a frenare nel momento in cui viene superata la propria soglia di percezione. Poiché il guidatore non sa stimare in maniera esatta la velocità del veicolo che lo precede, la sua velocità diminuirà al di sotto di questa, e ciò ha per conseguenza una serie di oscillazioni dovute a piccole accelerazioni e decelerazioni.

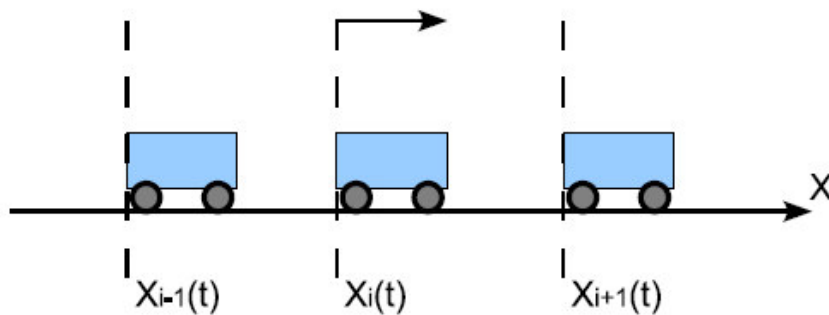


Figura 6.13: Schema free-driving

Anche nel *free driving model* (v. Figura 3) si nota una serie di piccole accelerazioni e decelerazioni perché il guidatore, pur non essendo influenzato da nessun altro veicolo, non riesce a mantenere la velocità desiderata costante.

In VISSIM, il comportamento di un conducente su una carreggiata a più corsie, tiene conto dei veicoli che lo precedono e di quelli posti sulle corsie adiacenti (v. Figura 4). Inoltre, ad ogni conducente sono assegnati dei parametri individuali; ciò vuol dire che il comportamento del conducente si trova quindi in accordo con le prestazioni tecniche del veicolo.

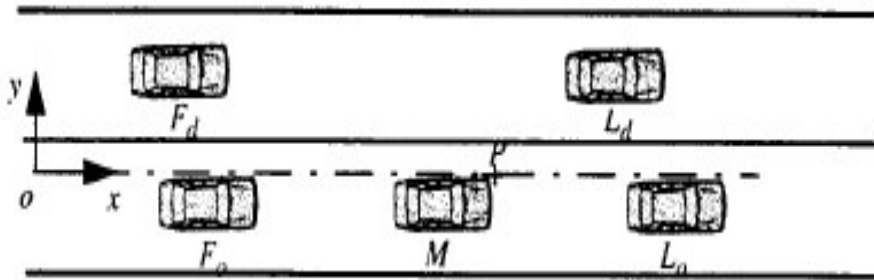


Figura 6.14: Schema lane-changing

Le caratteristiche che determinano l'unità conducente-veicolo possono essere classificate in tre categorie:

1. Specifiche tecniche del veicolo:
 - lunghezza del veicolo,
 - velocità massima,
 - accelerazione,
 - posizione istantanea del veicolo nella rete,
 - velocità e accelerazione istantanea del veicolo;
2. Comportamento dell'unità conducente-veicolo:
 - limiti psicofisici di percezione del conducente (capacità di stima, percezione della sicurezza, disposizione ad assumere dei rischi),
 - memoria del conducente,
 - accelerazione in funzione della velocità attuale in rap-

porto alla velocità desiderata;

3. Interazione tra più unità conducente-veicolo:

- rapporti fra indeterminato veicolo e i veicoli che lo precedono e che lo seguono nella stessa corsia e nelle corsie vicine,
- informazioni riguardanti l'arco di strada utilizzato,
- informazioni concernenti l'impianto semaforico più vicino.

Una rete di trasporto, in VISSIM viene implementata attraverso l'inserimento di **dati statici**, che restano invariati durante la simulazione, e di **dati dinamici**. I dati statici rappresentano l'infrastruttura stradale, sono indispensabili se si vuole simulare la circolazione dei flussi di traffico e riguardano:

- gli **archi**, caratterizzati da una o più corsie;
- le **connessioni** fra archi per la modellizzazione delle possibilità di cambio di direzione (movimenti di svolta agli incroci) e per la riduzione o l'aumento del numero di corsie;
- le **fermate** di trasporto pubblico con l'indicazione della loro posizione e della propria lunghezza;
- i **semafori** con l'indicazione della loro posizione e dei riferimenti relativi ai gruppi di semafori relativamente assegnati;
- i **rilevatori** con l'indicazione della loro posizione e della propria dimensione;
- i **punti di registrazione** con l'indicazione della loro posizione.

I dati dinamici sono anch'essi indispensabili nel caso si vuole simulare la circolazione del traffico e riguardano:

- i **flussi** veicolari espressi come numero di veicoli in un intervallo di tempo specificato; per ogni flusso di ingresso è possibile definire la composizione del traffico in termini di percentuale di mezzi pesanti, di velocità consentite per le diverse componenti, e la distribuzione delle lunghezze dei veicoli industriali;

- la definizione della **scelta di direzione** attraverso la specifica del tipo interessato dalla scelta e l'individuazione della direzione desiderata e del relativo intervallo di tempo di validità della scelta stessa;
- la definizione degli **itinerari**, attraverso la specifica della sequenza di archi da utilizzare, il tipo di veicolo che utilizza l'itinerario ed il relativo valore di flusso definibile per differenti intervalli di tempo;
- **regole di precedenza** con l'indicazione della loro posizione, del valore relativo alla distanza e agli intervalli minimi fra veicoli;
- i **segnali di stop** con l'indicazione del loro posizionamento;
- gli itinerari delle **linee di Trasporto Pubblico** con gli orari di partenza e i tempi di salita/discesa dei passeggeri alle fermate.

Per le valutazioni si possono specificare:

- la posizione dei **punti di registrazione** definiti per la registrazione puntuale del numero di veicoli e delle velocità medie per tipo di veicolo;
- gli itinerari su cui misurare i **tempi di percorrenza** definiti per la registrazione del numero di veicoli transitati sull'itinerario specificato e del rispettivo calcolo del tempo di percorrenza;
- la posizione delle sezioni tipo per il **rilievo della coda** (lunghezza minima, massima, media e n° di stop).

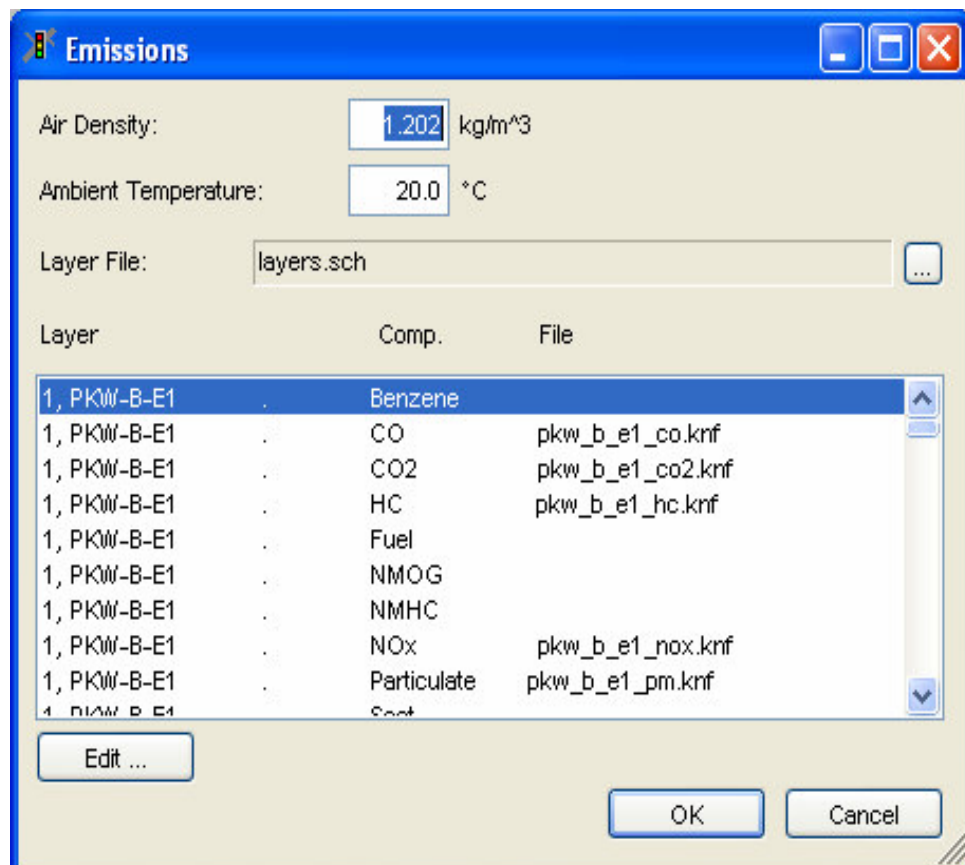
6.9 *Il modulo di emissione in VISSIM*

Al fine di eseguire simulazioni in VISSIM con il calcolo delle emissioni, le mappe del motore di emissione (vedi sotto) e la corrispondente licenza sono necessarie. Per attivare il calcolo, un file (*.SCH) con i livelli necessari di emissione dei veicoli (vedi sotto) devono essere definiti e selezionati nella finestra di dialogo di emissione (MENU - SIMULAZIONE - di emissione).

6.9.1 Livelli di emissioni dei veicoli (SCH file *)

Un file *. SCH, con la definizione di tutti i livelli di emissione che occorre, è la base per il calcolo delle emissioni. Questo file è necessario per l'attivazione del modulo di emissione e deve essere selezionato nella finestra di dialogo di emissione (MENU - BANCA DATI - di emissione).

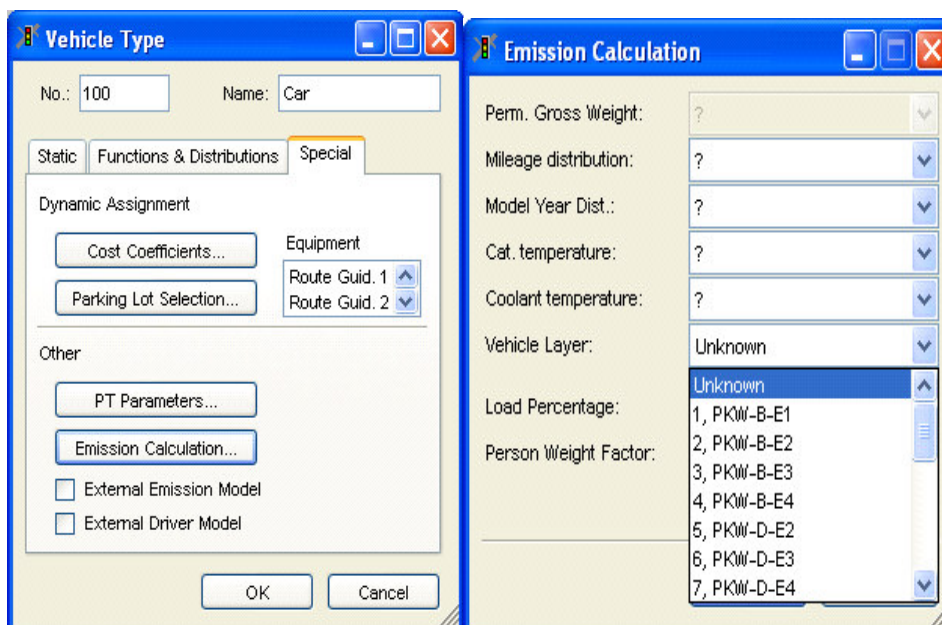
Il suo contenuto consente la specifica di caratteristiche di emissione del veicolo e il collegamento con le mappe del motore di emissione per ciascuna delle componenti delle emissioni (vedi sotto). Il formato di questo file (formato *. SCH vedi sotto) è orientato alla linea, ognuno specificando un livello di emissione (la prima linea viene letto come un commento e ignorata) con 76 attributi (colonne).



6.9.2 Tipo di veicolo

Le caratteristiche delle emissioni di un veicolo sono definite nella finestra di dialogo “Tipo di Veicolo” (MENU - BANCA DATI - Tipo di Veicolo).

Nella finestra di dialogo di calcolo delle emissioni (TIPO VEICOLO - SPECIALE - il calcolo delle emissioni), un link ad un livello di emissioni, tra le altre possibili impostazioni, può essere selezionato, permettendo all'inizializzazione primaria della proprietà del veicolo tipo di emissione. La lista dei livelli di emissione possibile corrisponde al file *.SCH selezionati nella finestra di dialogo di emissione (vedi sopra):



6.9.3 Mappe di emissione del motore

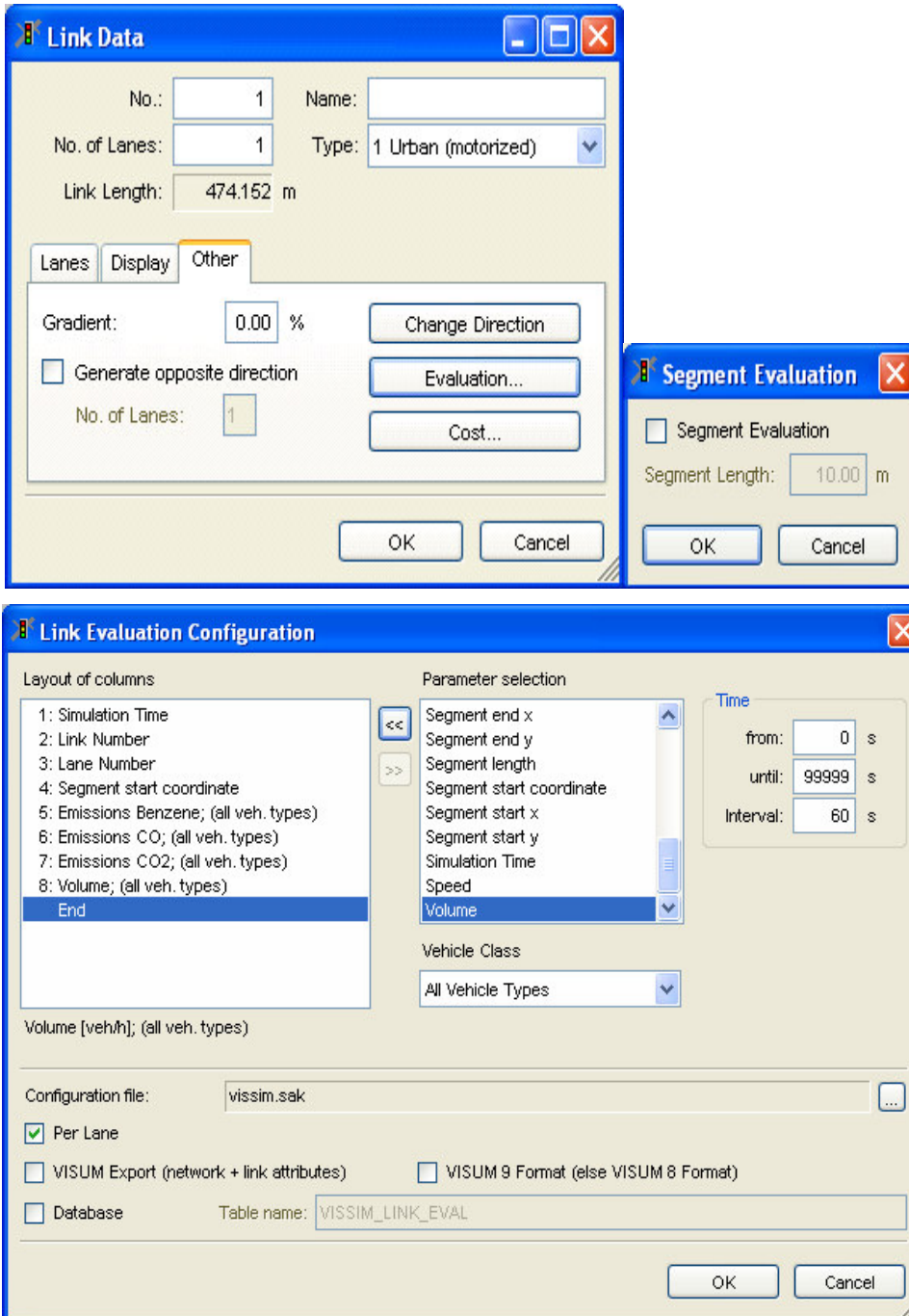
Mappe di emissione del motore sono file binari che contengono i dati sulle emissioni per un livello di emissione indicati e di un componente di emissione indicati. Ci sono 12 possibili componenti di emissione: benzene, CO, CO₂, HC, carburante, NMOG, NMHC, NO_x, particolato, fuliggine, SO₂ ed evapora-

zione. Sono utilizzati nel file di layer (*.SCH) per collegare le caratteristiche tipo di veicolo di emissione con l'emissione di un componente durante la simulazione. E' possibile definire i propri file di motore mappa in formato ASCII. Ci sono tre diversi formati per l'emissione di calore a seconda della categoria di emissioni del veicolo di cui il livello delle emissioni e un formato per l'emissione di freddo.

6.9.4 Valutazioni

Ci sono due diversi tipi di valutazioni di emissione: del singolo veicolo e del segmento aggregati. Per ottenere le emissioni dei veicoli singoli record di un file di veicolo (MENU - VALUTAZIONE - FILES - VEICOLO RECORD) o una finestra informativa del veicolo (MENU - VALUTAZIONE - INFORMAZIONI WINDOWS-VEICOLO) possono essere utilizzati, specificando il rispettivo file di configurazione con gli attributi di valutazione necessari. Al fine di ottenere i risultati aggregati delle emissioni, è necessario selezionare il segmento di valutazione per i collegamenti necessari e configurare la lunghezza del segmento.

All'interno del Link di valutazione finestra di configurazione (MENU - VALUTAZIONE - FILES - le valutazioni LINK) è possibile specificare l'intervallo di tempo aggregazione e la valutazione degli attributi (anche tipo di veicolo a carico e per corsia). La finestra di dialogo è utilizzata anche per la configurazione dei valori aggregati nella finestra di dialogo Opzioni di visualizzazione. (MENU - VISTA - Opzioni - TRAFFIC).



6.9.5 Motore caldo Map File Format (*. KNF)

Ci sono tre differenti formati di file di mappa del motore per le emissioni di calore, a seconda della categoria di emissioni del veicolo di cui il livello delle emissioni. Queste categorie sono specificati con le seguenti etichette: KKR e KR per moto, PKW e LNF per passeggeri e veicoli utilitari leggeri, e SNF per i veicoli pesanti.

Formato Moto:

Il file di mappa del motore per i motocicli è formattato in una linea di testa e due colonne. Nella linea di testa deve essere contenuta l'etichetta KR o KKR ed una stringa per indicare la seconda colonna. La prima colonna deve contenere delle classi di velocità in [km / h] e la seconda colonna i dati di emissione in [g / km]:

| KR | CO |
|-----------|-----------|
| 0.000 | 0.000 |
| 5.000 | 0.000 |
| 10.000 | 0.290 |
| 15.000 | 0.301 |
| 20.000 | 0.291 |
| 25.000 | 0.375 |
| 30.000 | 0.272 |
| 35.000 | 0.314 |
| 40.000 | 0.333 |
| 45.000 | 0.373 |
| 50.000 | 0.591 |
| 55.000 | 0.277 |
| 60.000 | 0.520 |
| 65.000 | 0.263 |
| 70.000 | 0.253 |

| | |
|--------|-------|
| 75.000 | 0.338 |
| 80.000 | 0.432 |
| 85.000 | 0.000 |

Formato per veicoli commerciali e trasporto leggero:

Il file di mappa del motore per i passeggeri ed i veicoli commerciali leggeri è formattato come una matrice. La prima posizione della matrice deve essere etichettata con PKW o LNF. I contenuti prima fila a * v-classes in [m2/s3] e la prima colonna della classi V in [km / h]. Le unità dei dati di emissione devono essere in [mg / s]:

| PKW | -22,5 | -20 | -17,5 | ... | -12,5 | -10 | 7,5 | 10 | 12,5 | 15 |
|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0,464 | 0 | 0 | 0 |
| 20 | 0 | 0 | 0 | ... | 0,358 | 0,356 | 1,021 | 0 | 0 | 0 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 65 | 0 | 0 | 0 | ... | 0,198 | 0,213 | 6,959 | 0,524 | 0 | 0 |
| 70 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0,289 | 0,379 | 0,411 | 0,659 | 0,667 |
| 75 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0,366 | 0,831 | 0,647 | 0,806 | 0 |
| 80 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0,578 | 0,751 | 0,643 | 0 |
| 85 | 0 | 0 | 0 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Formato per i veicoli pesanti:

Il file di mappa del motore per i veicoli pesanti è formattato come una matrice. La prima posizione della matrice deve essere etichettata con il SNF. I contenuti della prima riga rappresentano le classi per le rivoluzioni normalizzata mentre quelli della prima colonna rappresentano le classi per il potere normalizzato richiesto. Le unità dei dati di emissione devono essere in [g / h / kW]:

| SNF | 0 | 0,0125 | 0,025 | 0,0375 | ... | 0,9625 | 0,975 | 0,9875 | 1 |
|------|-------|--------|-------|--------|-----|--------|-------|--------|---|
| -0,2 | 0,112 | 0,125 | 0,137 | 0,15 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 |

| | | | | | | | | | |
|--------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|-------|-------|-------|
| -0,185 | 0,117 | 0,129 | 0,142 | 0,155 | ... | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -0,17 | 0,121 | 0,134 | 0,147 | 0,159 | ... | 0,006 | 0,021 | 0,036 | 0,052 |
| -0,155 | 0,126 | 0,139 | 0,151 | 0,164 | ... | 0,084 | 0,099 | 0,114 | 0,129 |
| -0,14 | 0,13 | 0,143 | 0,156 | 0,169 | ... | 0,161 | 0,176 | 0,191 | 0,206 |
| -0,125 | 0,135 | 0,148 | 0,16 | 0,173 | ... | 0,238 | 0,254 | 0,269 | 0,284 |
| 0,775 | 3,758 | 3,688 | 3,618 | 3,549 | ... | 0,962 | 0,979 | 0,996 | 1,013 |
| ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... | ... |
| 0,895 | 4,176 | 4,106 | 4,037 | 3,967 | ... | 1,185 | 1,199 | 1,213 | 1,227 |
| 0,91 | 4,228 | 4,159 | 4,089 | 4,019 | ... | 1,211 | 1,226 | 1,24 | 1,254 |
| 0,925 | 4,281 | 4,211 | 4,141 | 4,071 | ... | 1,238 | 1,252 | 1,266 | 1,281 |
| 0,94 | 4,333 | 4,263 | 4,193 | 4,124 | ... | 1,265 | 1,279 | 1,293 | 1,307 |
| 0,955 | 4,385 | 4,316 | 4,246 | 4,176 | ... | 1,292 | 1,306 | 1,32 | 1,334 |
| 0,97 | 4,438 | 4,368 | 4,298 | 4,228 | ... | 1,319 | 1,333 | 1,347 | 1,361 |
| 0,985 | 4,49 | 4,42 | 4,35 | 4,281 | ... | 1,345 | 1,36 | 1,374 | 1,388 |
| 1 | 4,542 | 4,472 | 4,403 | 4,333 | ... | 1,372 | 1,386 | 1,4 | 1,415 |

Mapa del motore a freddo dei file in formato (*. KNF):

Tutti i file di mapa del motore per le emissioni a freddo sono formattati in forma di una matrice, indipendentemente dalla categoria di emissioni del veicolo di cui il livello delle emissioni. La prima posizione della matrice deve essere etichettata con KAT o KW per indicare, rispettivamente, l'uso della temperatura del convertitore catalitico o la temperatura dell'acqua di raffreddamento per l'accesso alle celle di emissione dei dati. I contenuti della prima riga rappresentano le classi di temperatura in [° C] mentre, quelli della prima colonna rappresentano le classi per il potere normalizzato richiesto. Le unità dei dati di emissione devono essere in [g / h / kW]:

| KAT | -10 | 0 | 10 | ... | 370 | 380 | 390 | 400 |
|------------|------------|----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|
| -0,1 | 8,9562 | 8,1904 | 8,4744 | ... | 0,0649 | 0,0552 | 0,0404 | 0,0427 |
| -0,05 | 26,8685 | 8,9028 | 9,3592 | ... | 0,0674 | 0,0599 | 0,0439 | 0,0450 |
| 0 | 33,7775 | 5,6251 | 5,6356 | ... | 0,0745 | 0,0757 | 0,0774 | 0,0871 |
| 0,05 | 20,0984 | 7,1085 | 7,1580 | ... | 0,1103 | 0,1025 | 0,1021 | 0,1140 |

| | | | | | | | | |
|------|---------|---------|---------|-----|--------|--------|--------|--------|
| 0,1 | 23,9088 | 11,9204 | 13,5658 | ... | 0,1811 | 0,1918 | 0,1770 | 0,1557 |
| 0,15 | 32,6540 | 10,2092 | 10,5028 | ... | 0,3680 | 0,4939 | 0,4264 | 0,2895 |
| 0,2 | 34,3221 | 17,8141 | 21,1944 | ... | 0,5194 | 0,5174 | 0,4641 | 0,4082 |
| 0,25 | 44,9097 | 16,5322 | 16,5590 | ... | 0,8030 | 0,6469 | 0,5585 | 0,5595 |
| 0,3 | 48,0741 | 15,9456 | 15,5760 | ... | 0,5618 | 0,5495 | 0,5341 | 0,4889 |
| 0,35 | 48,6049 | 16,1718 | 16,1095 | ... | 0,5562 | 0,5149 | 0,4455 | 0,4074 |
| 0,4 | 48,7156 | 16,8193 | 16,9349 | ... | 0,5667 | 0,5597 | 0,5686 | 0,5716 |
| 0,45 | 51,1914 | 17,9387 | 17,8601 | ... | 0,6114 | 0,6093 | 0,6109 | 0,7363 |
| 0,5 | 54,0696 | 17,4007 | 17,4292 | ... | 0,7015 | 0,7005 | 0,6627 | 0,6751 |
| 0,55 | 55,0206 | 19,7321 | 18,8540 | ... | 0,5492 | 0,5456 | 0,6940 | 0,7067 |
| 0,6 | 59,5301 | 20,4537 | 20,3365 | ... | 0,7952 | 0,7978 | 0,9843 | 1,0028 |
| 0,65 | 55,7242 | 20,3504 | 20,3010 | ... | 0,7616 | 0,7677 | 0,7750 | 0,7834 |
| 0,7 | 61,1754 | 22,0673 | 21,9958 | ... | 0,9871 | 0,9996 | 0,9703 | 0,9504 |
| 0,75 | 66,4037 | 20,5674 | 20,5599 | ... | 1,1443 | 1,1539 | 1,1683 | 1,1442 |
| 0,8 | 61,7130 | 22,6610 | 22,6362 | ... | 0,8675 | 0,8717 | 0,9367 | 1,2387 |
| 0,85 | 68,0524 | 24,6181 | 24,5798 | ... | 0,8938 | 0,8786 | 1,0620 | 1,0684 |
| 0,9 | 73,9680 | 23,0275 | 23,0138 | ... | 1,0262 | 1,0389 | 1,0435 | 1,0493 |
| 0,95 | 69,1201 | 25,3807 | 25,3500 | ... | 1,1976 | 1,1922 | 1,2205 | 1,1741 |
| 1 | 76,2356 | 24,0374 | 24,0344 | ... | 1,3337 | 1,3374 | 1,3412 | 1,3449 |

6.10 Inquinamento in un canyon urbano

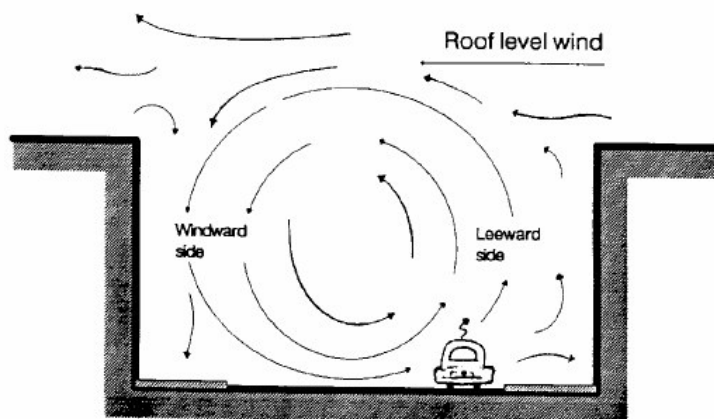


Figura 6.15: Canyon urbano

La particolarità geometrica di un canyon urbano determina la presenza di una zona di atmosfera entro la canyon urbana caratterizzata da proprietà spesso distinte da quelle dell'aria sovrastante e di conseguenza particolari condizioni per la dispersione degli inquinanti emessi. Per studiarne le problematiche connesse, è opportuno far riferimento ad un modello che isoli un solo canyon e lo caratterizzi geometricamente come indicato in figura da cui si nota come una tale struttura (una strada percorsa da traffico autoveicolare fiancheggiata ai due lati da file ininterrotte di edifici) sia caratterizzata da tre parametri principali: l'altezza media H degli edifici lungo il canyon e la dimensione trasversale W e longitudinale L del canyon.

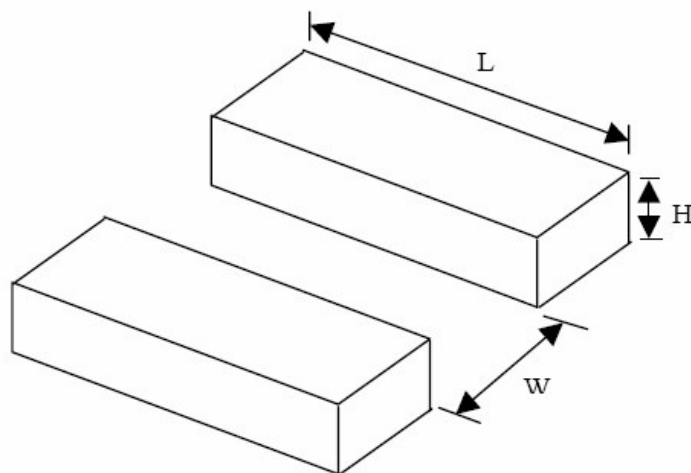


Figura 6.16: Geometria Canyon urbano

Tali parametri caratteristici si compongono per definire due indicatori fondamentali: il *fattore di forma del canyon* (W/H) ed il *fattore di forma degli edifici* (L/H). Un canyon si dice regolare quando H/W è circa pari a 1. Quando il fattore di forma del canyon raggiunge e supera il valore 2 si parla di un canyon profondo (*deep canyon*). Se si considera il fattore di forma degli edifici, si dice che si è in presenza di un canyon corto quando $L/H \approx 3$, medio quando $L/H \approx 5$ e lungo quando $L/H \approx 7$. Un canyon come quello di figura è un canyon simmetrico, in cui le due file di edifici che lo fiancheggiano hanno la medesima altezza. Considerando per ora un canyon simmetrico, è opportuno definire un lato sottovento (*leeward*) ed un lato sopravvento (*winward*). Va notato che spesso i canyon che si incontrano in una realtà urbana sono di tipo asimmetrico. In questo caso si ha un canyon *step-up* quando la fila di edifici sul lato *leeward* è più alta di quella sul lato *winward* ed un canyon *step-down* quando ad essere più elevata è la fila di edifici sul lato *winward*.

Il campo di moto dell'aria all'interno del canyon è determinato:

- dalle caratteristiche geometriche del canyon (i fattori di forma),
- dal valore della velocità media del vento al di sopra degli edifici,
- dalla direzione di provenienza del vento al di sopra degli edifici,
- dal bilancio energetico che si viene a creare all'interno del canyon.

L'angolo tra la direzione del vento nell'aria libera sovrastante e l'asse del canyon condiziona la circolazione locale che presumibilmente si viene ad instaurare al suo interno. Sono possibili diverse situazioni.

Vento perpendicolare al canyon.

Si parla di vento perpendicolare al canyon quando tra l'asse dello stesso e la direzione del vento si ha un angolo non inferiore a 30° . Questa situazione è stata molto studiata (DePaul e Sheih 1985, 1986; Nakamura e Oke, 1988; Oke, 1988; Yamartino e Wiegard, 1986). In particolare, quando la velocità del vento è superiore a $1.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, si possono avere tre differenti regimi di moto a seconda del fattore di forma del canyon:

- ***isolated roughness flow***: quando il canyon è largo ($W/H > 2.5$) o, che è lo stesso, gli edifici del tessuto urbano risultano sufficientemente spazati, essi agiscono essenzialmente come elementi isolati di rugosità, dato che l'aria si muove ad una sufficiente distanza sottovento prima di incontrare il prossimo ostacolo.
- ***wake interference flow***: quando il canyon risulta meno largo ($1.538 \leq W/H < 2.5$) il flusso d'aria, distorto dalla prima fila di edifici incontrati, ha una distanza sottovento insufficiente per riaggiustarsi prima di incontrare la successiva fila di edifici ed il risultato è la risultante dell'interferenza delle due scie presenti.
- ***skimming flow***: ($W/H \leq 1.538$) in caso di fattore di forma superiore a 1 il flusso d'aria esterno al canyon sfiora la sommità del canyon senza entrarci direttamente, determinando entro il canyon un mot d'aria quasi indipendente dall'esterno. Quando si è in *skimming flow*, è possibile che siano presenti uno o più vortici a seconda del fattore di forma del canyon. In particolare si ha la presenza di un solo vortice quando W/H risulta superiore a 0.63. Quando W/H risulta inferiore a tale valore e superiore a 0.33 il vortice originario sposta la propria base inferiore dal suolo e nello spazio che così si libera viene ad instaurarsi un vortice secondario che ruota nel verso opposto al vortice principale. Mentre il vortice principale è mantenuto attivo dal flusso d'aria sovrastante il canyon, il vortice secondario è mantenuto attivo dal movimento del vortice principale. Se

però W/H risulta inferiore a 0.33 nel canyon si vengono ad instaurare tre vortici sovrapposti ognuno rotante in senso inverso rispetto a quello direttamente sopra.

6.11 IL MODELLO OSPM (Operational Street Pollution Model)

L'OSPM (Operational Street Pollution Model) è un efficace modello predittivo delle concentrazioni di agenti inquinanti in ambito urbano, di tipo "street canyon".

Uno street canyon si può definire come un'unità geometrica base della rete viaria in ambito urbano.



Figura 6.17 - Illustrazione schematica del modello street Canyon

Esso si configura come una strada con una successione continua di edifici di altezza comparabile, posti ad entrambi i suoi lati.

La caratteristica fondamentale di un canyon urbano è quella di favorire, in determinate condizioni, l'instaurarsi di una circolazione d'aria di tipo fortemente locale, costituita da un vortice elicoidale con asse parallelo all'asse longitudinale del canyon, che produce una redistribuzione e dispersione delle emissioni prodotte dai veicoli.

Il modello OSPM può essere anche utilizzato per quelle strade con una disposizione irregolare degli edifici (ad esempio posti solo da un lato della strada) e con altezze diverse, ma risulta meglio adattabile a quelle con una configurazione che sia la più regolare possibile, come quella oggetto di studio nella presente tesi.

L'OSPM è una combinazione di un modello "plume" di tipo gaussiano per la parte inerente i contributi diretti in termini di emissione del traffico e un modello "box" per quanto concerne la redistribuzione sotto forma di vortici degli stessi contributi.

Il campo delle emissioni è assimilabile ad un numero di sorgenti lineari infinitesimali, allineate idealmente in modo perpendicolare alla direzione del vento a livello della strada.

La lunghezza del vortice viene calcolata lungo la direzione del vento ed è pari a due volte l'altezza dell'edificio che si trova controvento, ma poiché le altezze degli edifici posti lungo la strada possono essere differenti anche le lunghezze dei vortici risultano diverse.

Per la misurazione delle concentrazioni di inquinante si possono settare uno o più recettori, al fine di misurare la concentrazione in varie posizioni spaziali. Generalmente ove possibile è conveniente individuare almeno due recettori, uno posto sopravvento e l'altro sottovento.

Ciò è determinato dal fatto che, in genere il primo riceve il contributo dalle emissioni di traffico nell'area interessata dal fenomeno del vortice, la cosiddetta *zona di ricircolo*, mentre l'altro al di fuori di essa.

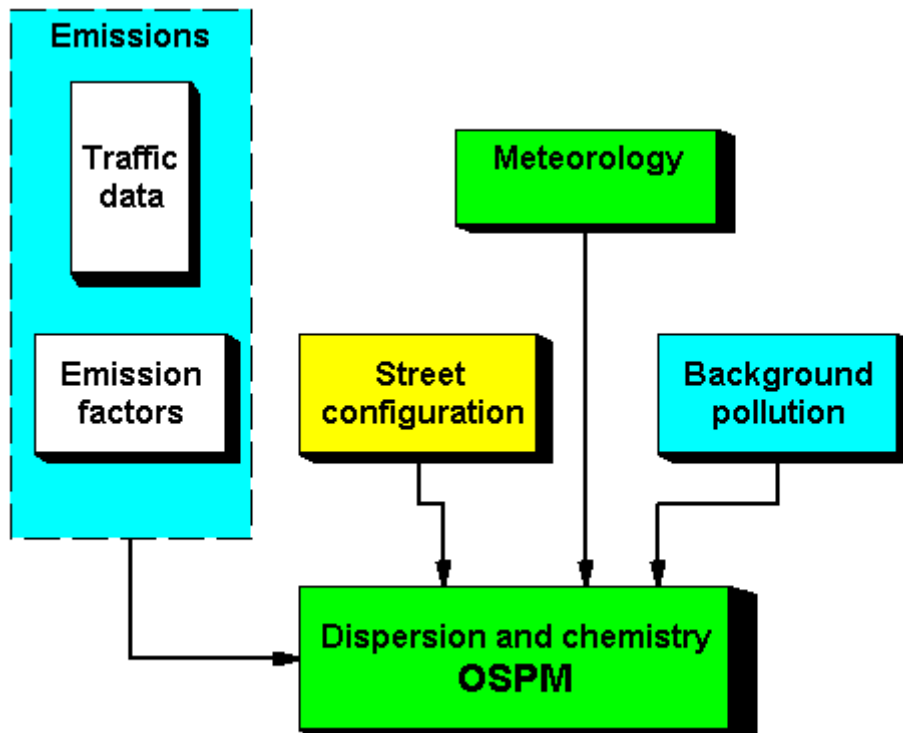
Se la velocità del vento si approssima allo zero o la sua direzione è parallela a quella della strada, le concentrazioni da ambo i lati della strada diventano uguali. Il modello OSPM è stato messo a punto per operare con dati di input/output nella forma di medie orarie.

I dati di input che sfrutta il modello OSPM, oltre quelli già menzionati di flusso veicolare e velocità (o in alternativa di emissioni), sono i valori orari di: velocità e direzione del vento, temperatura e radiazione globale.

In particolare gli ultimi due sono utilizzati per calcolare la trasformazione chimica del monossido di azoto (NO primario) in biossido di azoto (NO₂) e ozono (O₃).

Il modello richiede inoltre come dati di ingresso i valori orari delle concentrazioni di inquinante di background urbano e i dati riguardanti la geometria della strada (altezza degli edifici, larghezza della sezione) e di traffico.

Di seguito si riporta lo schema concettuale di funzionamento del modello OSPM:



7 Il caso studio per la calibrazione del modello

L'indagine oggetto del presente lavoro è stata condotta in corrispondenza di un tronco dell'asse viario di via Libertà ove nel Maggio 2009 a seguito di un progetto sperimentale, sono stati installati due sensori di rilevamento ambientale denominati "mote", capaci di funzionare da remoto e inviare informazioni in merito a concentrazioni di CO e NO₂. Le informazioni dei sensori sono state arricchite con informazioni sui flussi veicolari ed ambientali derivanti dalle cabine di precisione per il monitoraggio ambientale dell' AMIA.

Dei due sensori, il primo era situato ad un'altezza da terra di circa 2m e il secondo era posto al settimo piano dell'edificio in cui ha sede l'Assessorato all'Igiene e Sanità del Comune di Palermo.



Figura 7.1 - Area oggetto di studio (Fonte: Google Earth)

7.1 Descrizione dell'area studio

L'area oggetto di studio è caratterizzata da una forma a canyon determinata dalla presenza di edifici, in entrambi i lati, alti tra i 25 e i 30 metri. La larghezza tra gli edifici è di 42 metri, determinando un rapporto H/L pari a 0,71. L'asse viario, denominato via Libertà rappresenta un asse principale della città di Palermo ed è caratterizzato da senso unico di marcia per veicoli (auto, motocicli, mezzi leggeri e pesanti) e doppio senso di marcia per autobus per complessive quattro corsie.

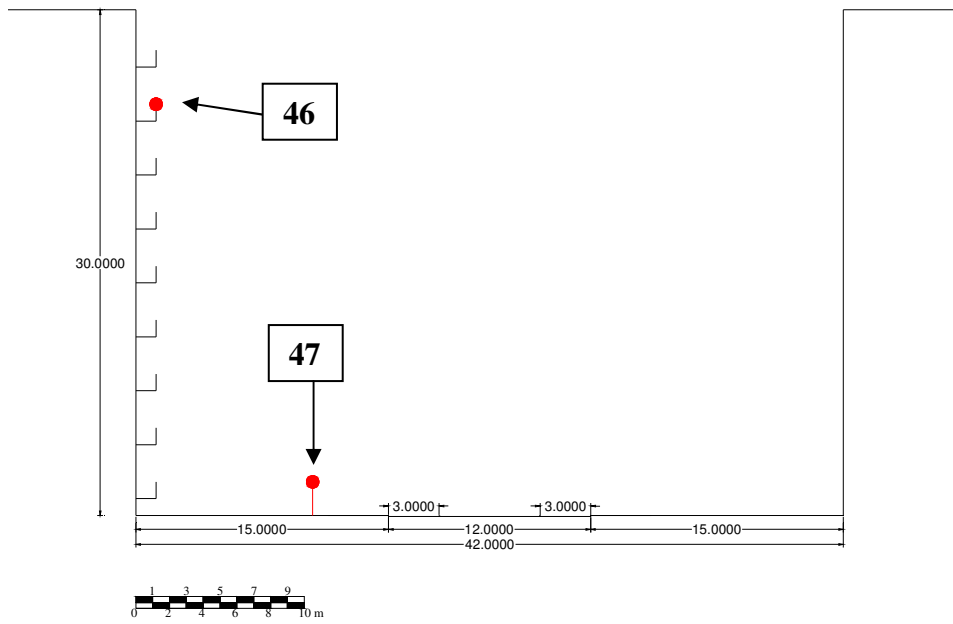


Figura 7.2 - Sezione A-A' scala 1:100



Figura 7.3 - Planimetria area studio (Fonte: CTR 1:5000 riportato in scala grafica)

7.2 Metodologia di rilievo dei dati di traffico

I rilievi di traffico sono stati effettuati per un totale di più di 20 ore, nel periodo compreso tra i mesi di giugno e luglio 2009, con un livello di dettaglio al minuto, nell'arco di intervalli temporali ricadenti prevalentemente nelle ore diurne.

I dati sono stati acquisiti manualmente, avvalendosi di una tabella in formato Excel, distinguendo per direzione di marcia i veicoli in transito e separatamente annotando i veicoli fermi in sosta al semaforo altresì nelle due direzioni (vs "Statua" e vs "Politeama").

| Via Libertà | | | | | | | | | | Giorno: _____ | |
|---------------|-----------------|------|-----|---------------|-----|-----------------------|--------------|-----------------------|------------------|-------------------|--|
| | verso Politeama | | | | | | verso Statua | | | | |
| Tempo (hh.mm) | AUTO | MOTO | VAN | MEZZI PESANTI | BUS | Altro (es. Ambulanza) | BUS | Altro (es. Ambulanza) | CICLO SEM. (sec) | TEMPO VERDE (sec) | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | |

Layout di rilievo dei parametri di traffico

7.3 I sensori ambientali

Il progetto inglese MESSAGE sviluppato dall'Università di Newcastle (England) in collaborazione con altre Università inglesi sta ricercando, da oltre un anno, in merito alla possibilità di migliorare le attuali tecniche di monitoraggio e la risoluzione dei dati provenienti da sensori sia spazialmente sia temporalmente, al fine di migliorare la gestione del traffico urbano. In contrapposizione alla situazione attuale, dove uno scarso numero di stazioni di rilevamento, spesso molto costose, sono dislocate in modo sparso e in pochi punti della rete stradale all'interno delle aree urbane delle città.

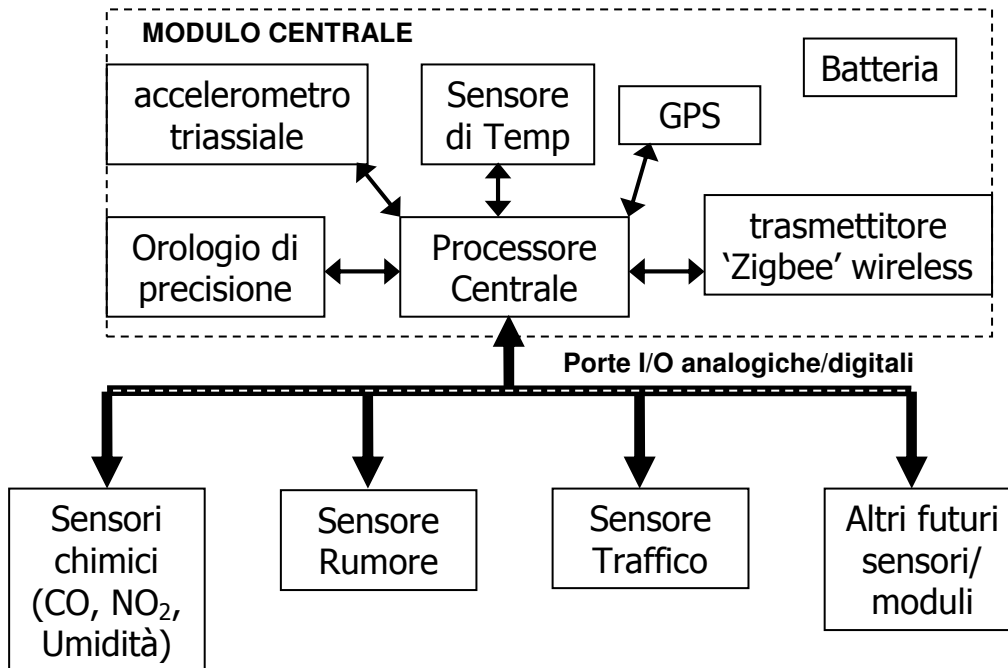
Tale incremento della risoluzione spazio/temporale dei sensori risulta fondamentale anche nel processo di calibrazione e verifica dei modelli di dispersione degli inquinanti, di traffico e di propagazione del rumore.

Nella fattispecie l'Università di Newcastle ha sviluppato un proprio strumento definito come "pervasive sensor" e chiamato "MOTE", ossia un sensore di dimensioni ridotte (140 x 85 x 65mm), capace di rilevare contemporaneamente più parametri che, per il progetto MESSAGE, si sono limitati a:

- GPS per consentire la localizzazione dei sensori e il tracciamento di quelli in movimento (es. su auto, ciclisti, pedoni).
- Accelerometro triassiale per informazioni relative ai sensori in movimento.
- Sensore di temperatura digitale.
- Orologio di precisione (< 2min/anno) per la sincronizzazione dei dati provenienti da più sensori e la stampa dei dati.
- Modulo a sensori chimici per la misura di almeno due tipi di concentrazioni di inquinanti. Per il progetto sono stati scelti il monossido di carbonio (CO) e il biossido di azoto (NO₂).
- Sensore per la misura dell'umidità relativa.
- Sensore di rilevamento del rumore in dB(A).

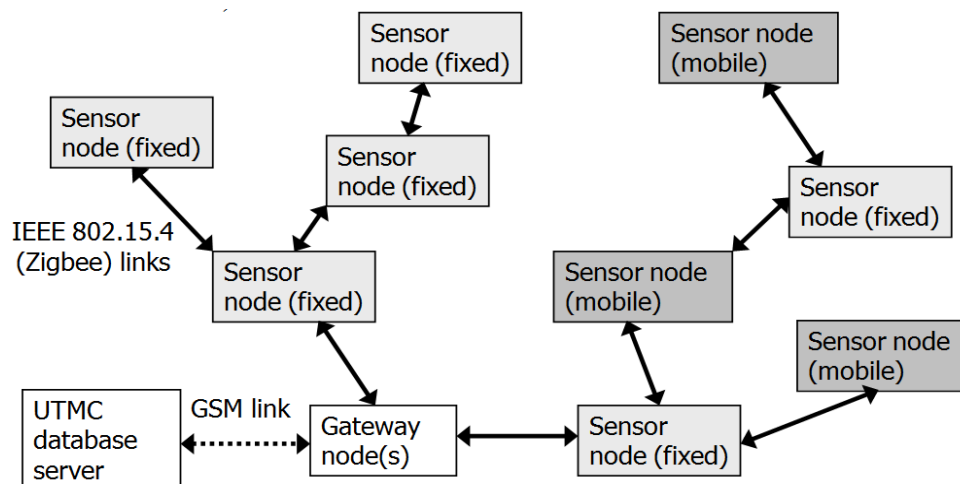
Sensore di rilevamento del traffico, capace di rilevare numero di veicoli

e densità.



Ogni rilevatore è dotato di batteria a lunga durata (Litio "D", 6 mesi – 1 anno), ma con possibilità di incremento mediante moduli a celle solari.

La comunicazione dei dati avviene mediante un trasmettitore wireless, che utilizza una tecnologia radio license-free (a costo zero), incluso all'interno del modulo (MOTE) che permette di inviare dati a qualsiasi ricevitore nel raggio di 100m, anche se il sensore è in movimento. Occorre precisare che ciascun MOTE può fungere anche da ricevitore e quindi mediante una catena/sequenza spaziale di MOTE è possibile coprire vaste aree. I dati infine verranno inviati ad un MOTE con GATEWAY (portale di trasmissione dati), o ad un PC a bordo del veicolo, che mediante tecnologia GPRS invia i dati ad una centrale operativa (si fa notare che in ambito urbano la presenza di uffici, scuole, ASL, altro rappresentano già dei GATEWAY di accesso, essendo dotati di connessioni alla rete).



Il disegno finale del sensore “MOTE” è quello rappresentato in figura:



Figura 7.4 – Design interno ed esterno del sensore di rilievo ambientale “mote”

7.4 La rete di rilevamento delle centraline Amia

La prima e prevedibile risposta all'acuirsi del fenomeno dell'inquinamento atmosferico (o comunque della sua percezione da parte dell'opinione pubblica) è stata una accresciuta spinta alla installazione di nuove reti di monitoraggio o al potenziamento delle esistenti (nel senso di estensione del numero di postazioni). In pratica, di fronte all'allarme ambientale che iniziava a manifestarsi, si è ritenuto che la prima azione da fare fosse conoscere l'entità e l'estensione del problema (come era ovvio) e lo strumento scelto per tale indagine è stato la *misura* (cosa decisamente meno ovvia). Tuttavia tali reti controllano un numero definito e limitato di punti del territorio e non è sempre garantito che essi rappresentino effettivamente la realtà di un territorio, soprattutto quando questo è una città di grandi dimensioni o una zona ad orografia complessa. Frequentemente, infatti, la localizzazione delle poche e costose centraline ha dovuto necessariamente seguire criteri di tipo *sanitario* (le si mette dove abita più gente), in pratica privilegiando cioè il monitoraggio della *dose* di inquinanti assorbita dalla popolazione, cosa non sempre coincidente con la lettera e lo spirito della normativa vigente.

Il criterio degli Standard di Qualità dell'Aria richiede un ulteriore passo di valorizzazione dei dati rilevati dalle reti di monitoraggio: le postazioni di misura dovranno essere considerate anche come punti di "campionamento" di un fenomeno fisico complesso che si vuole studiare e iniziare a controllare nella sua globalità. L'inventario delle sorgenti inquinanti, l'impiego di modelli matematici di simulazione della diffusione degli inquinanti e la conoscenza precisa della meteorologia locale diventano strumenti essenziali a questo scopo. La stessa localizzazione iniziale delle postazioni della rete di monitoraggio potrebbe essere rimessa in discussione in un processo di *feed-back* alimentato dal confronto tra dati misurati ed elaborazioni modellistiche che punta a massimizzare il contenuto informativo della strumentazione installata sul territorio.

Nell'ambito delle correlazioni tra i dati di traffico e gli agenti inquinanti si è fatto ricorso ai dati forniti dalla rete di stazioni di rilevamento fisse installate dall'AMIA.

La rete di monitoraggio della qualità dell'aria della città di Palermo istituita nel 1991 ed entrata in funzione nell'agosto del 1996 è costituita da:

- un centro di supervisione per la raccolta, elaborazioni ed archiviazione dati;
- un laboratorio chimico per analisi ambientali;
- 10 stazioni di monitoraggio;
- 89 apparecchiature di rilevamento di parametri chimici e fisici.

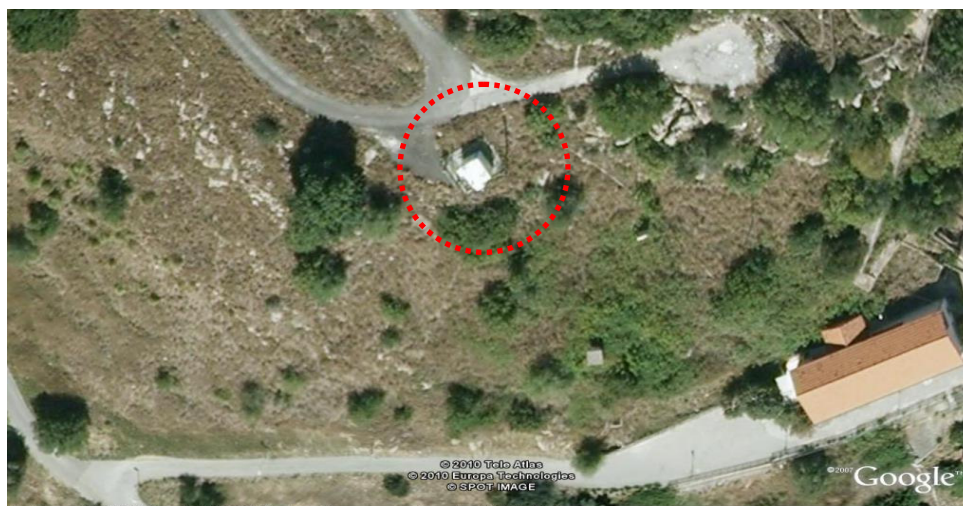
In particolare delle 10 stazioni di monitoraggio ci si è avvalsi delle tre seguenti: "Boccadifalco", "Castelnuovo" e "Unità d'Italia".

La prima (v. Figura 7.3b) è situata all'interno del parco del Presidio Ospedaliero "Casa del Sole" di via Roccazzo nel territorio di Boccadifalco.

Si trova dislocata ad un'altezza sul livello del mare di 141m, ad ovest del centro abitato e soggetta a brezza di mare con una esposizione da sottovento.

I dati di cui dispone sono di tipo chimico, meteo e di rumore.

L'utilizzo dei dati di "Boccadifalco", nonostante la considerevole distanza da via della Libertà, si deve alla completezza dei valori di interesse forniti, rispetto ai quali si è fatto riferimento come dati di tipo "background".



**Figura 7.5 – Cabina di rilevamento “Boccadifalco” della rete AMIA di Palermo
(Fonte: Google Earth)**

Per quanto riguarda le altre due stazioni, “Castelnuovo” e “Unità d’Italia” si è fatto uso dei dati da esse fornite in ragione della loro vicinanza alla sezione stradale oggetto del caso studio.

In particolare “Castelnuovo”, rappresenta la stazione di rilevamento meteorologico di riferimento per l’ambito urbano, mentre le altre, compresa “Unità d’Italia” rilevano solamente concentrazioni inquinanti.

Dall’analisi dei dati meteo delle due centraline dell’AMIA, Politeama e Boccadifalco, durante il periodo di osservazione (maggio-agosto 2009), le distribuzioni della direzione del vento per le due centraline sono risultate consistenti e simili l’una con l’altra ma con maggiore variabilità, come era prevedibile, per la cabina di Politeama, essendo questa in ambito urbano. In maniera opposta si comportano tuttavia nei confronti della velocità del vento.

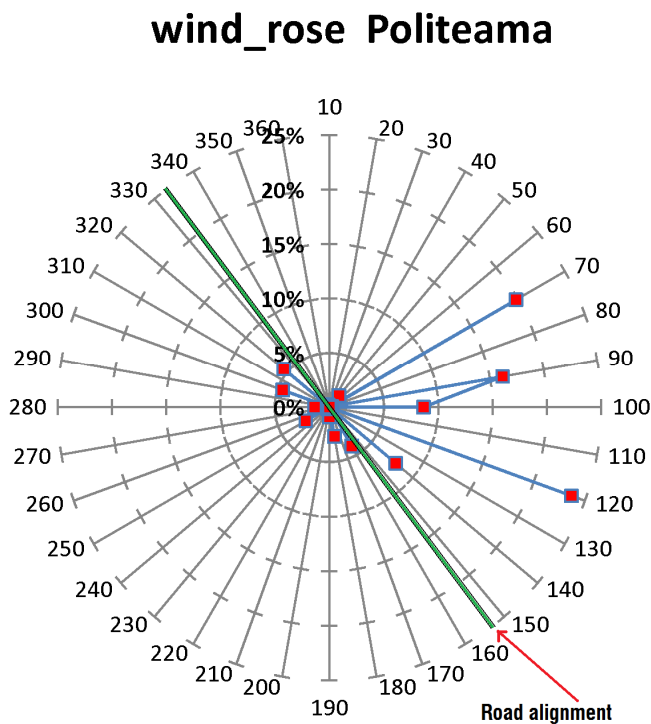


Figura 7.6 – Rosa dei venti per la Cabina di Politeama

Wind rose - Boccadifalco

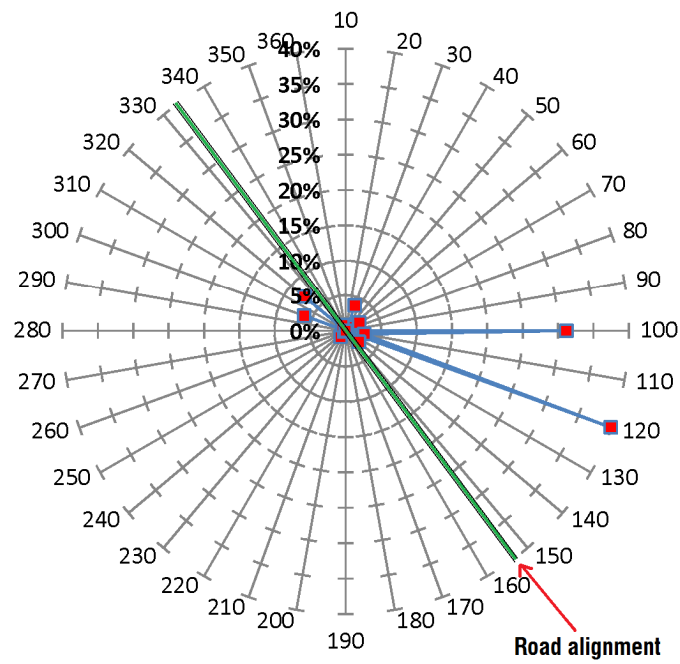


Figura 7.7 – Rosa dei venti per la Cabina di Boccadifalco

In ambito urbano infatti la velocità del vento è smorzata dalla presenza degli edifici che la rendono meno variabile e di entità più bassa.

Wind Speed Distribution

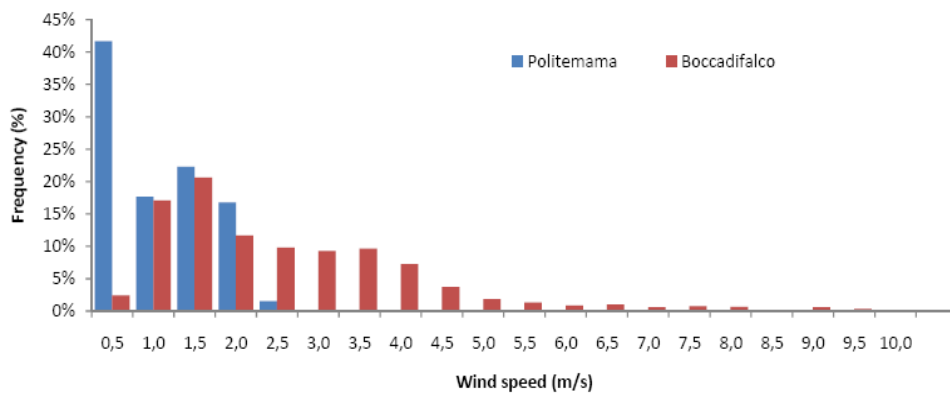


Figura 7.8 – Distribuzione delle velocità del vento per le due Cabine

7.5 Validazione dei sensori

Al fine di testare l'accuratezza dei sensori nella misura delle concentrazioni inquinanti, l'Università di Newcastle con autorizzazione ricevuta da parte dell'AMIA, ha condotto una campagna di rilievi per la validazione dei *mote*, attraverso il collocamento dei due sensori oggetto di studio in corrispondenza del condotto di aspirazione dell'aria della cabina di piazza Castelnuovo.



**Figura 7.9 – Cabina di rilevamento “Castelnuovo” della rete AMIA di Palermo
(Fonte: Google Earth)**



Figura 7.10 – Sensori “mote” collocati sulla Cabina di rilevamento “Castelnuovo”

La campagna di rilievi è stata effettuata, preliminarmente e successivamente al periodo di rilevamento condotto in via Libertà dal maggio al luglio 2009, la campagna di rilievi preliminare è stata condotta nell’aprile 2009 per circa due settimane, mentre quella successiva , sempre per due settimane nell’agosto dello stesso anno.

Di seguito si riportano i risultati della validazione effettuata sia in termini di inquinanti (CO) che di rumore (in dBA).

Concentrazioni CO al minuto

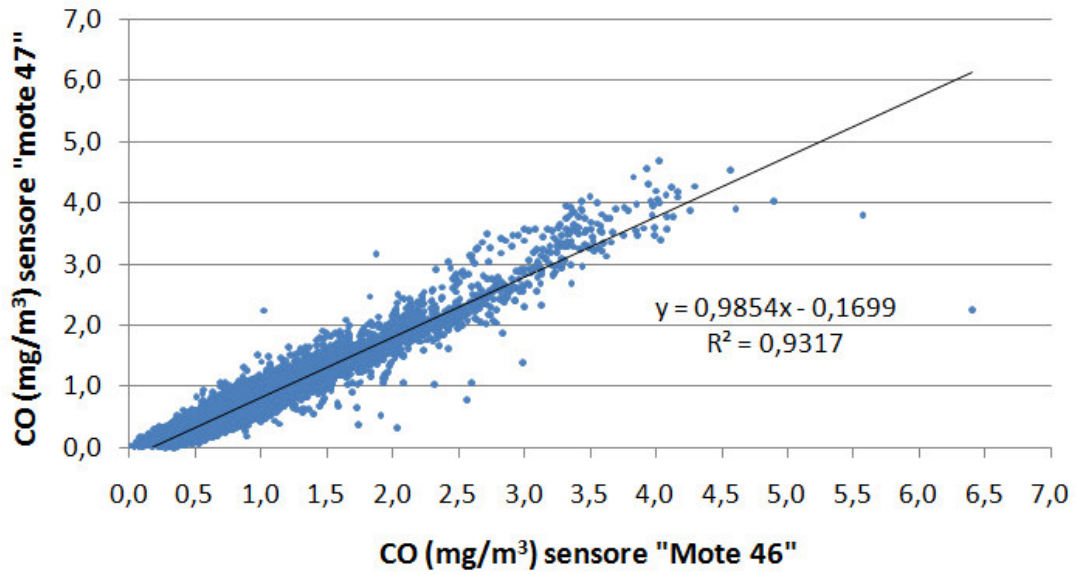


Figura 7.11 – Confronto concentrazioni di CO misurate dai due sensori “mote” collocati sulla Cabina di rilevamento “Castelnuovo”

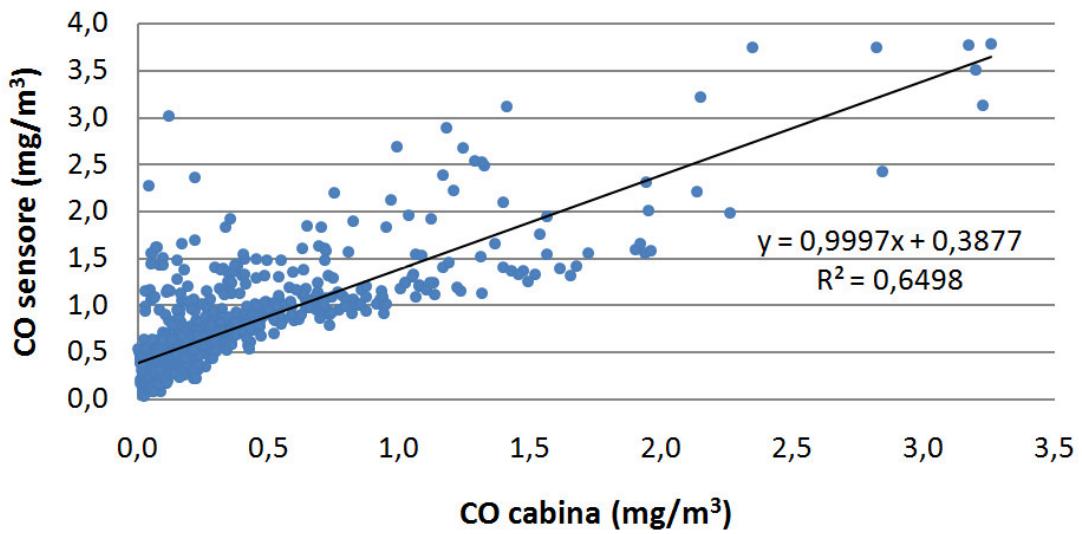


Figura 7.12 – Confronto concentrazioni orarie di CO misurate dal sensore 46 collocato sulla Cabina di rilevamento “Castelnuovo”

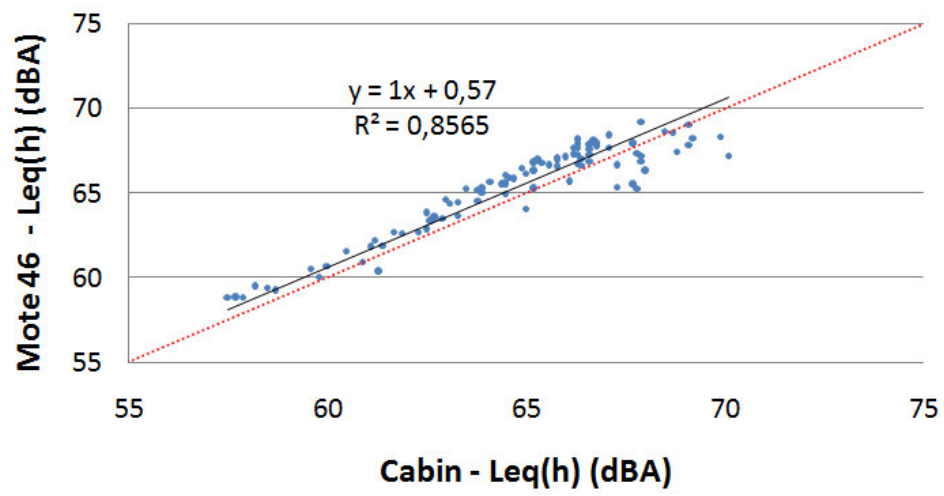
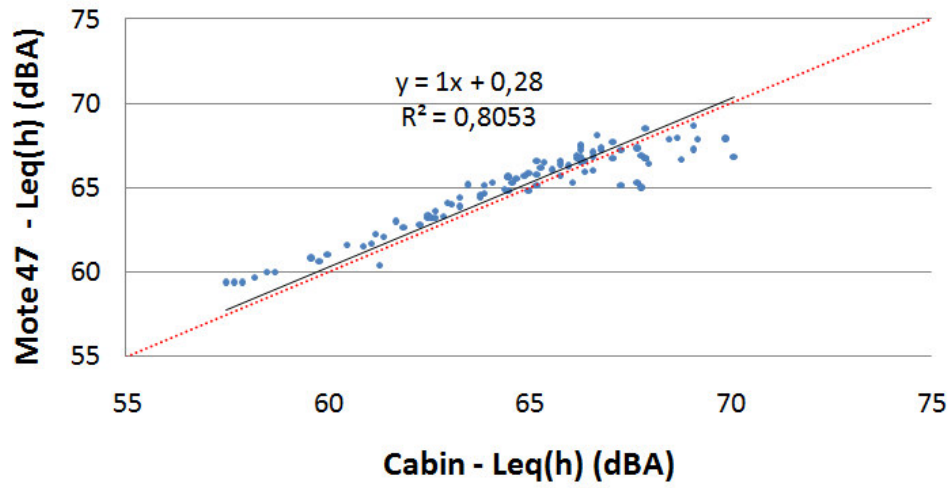
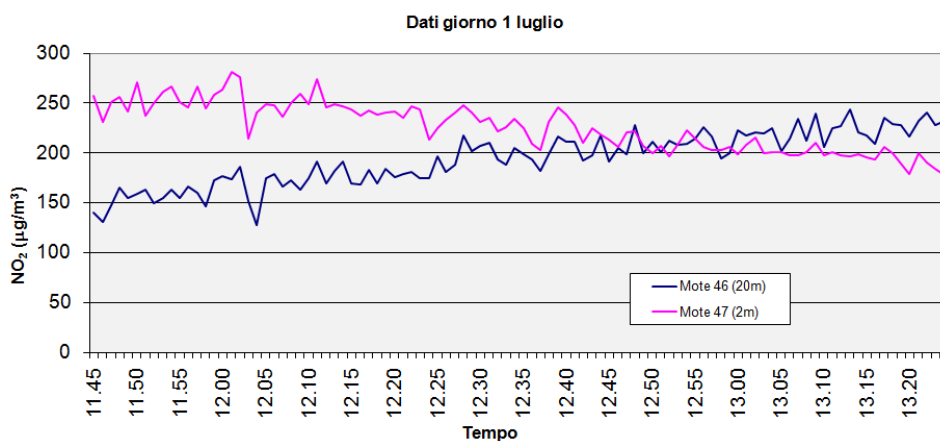
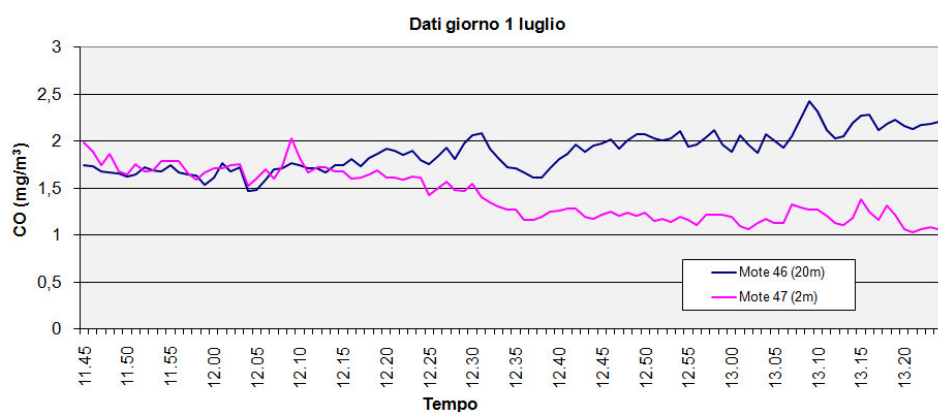
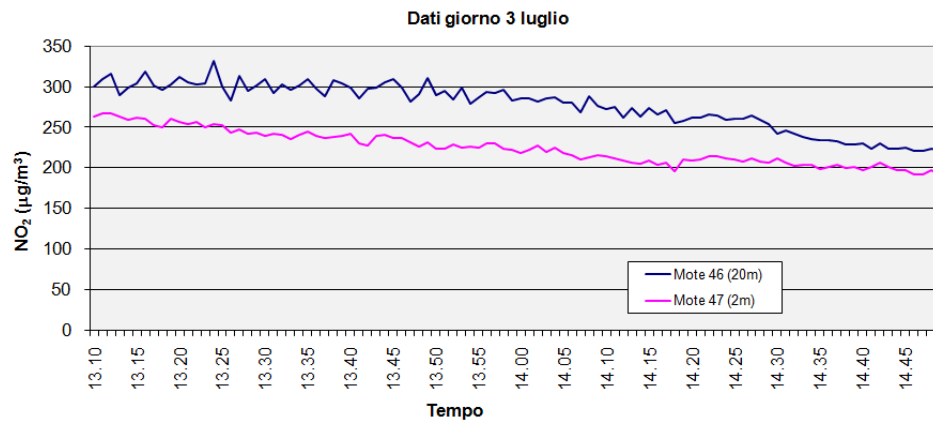
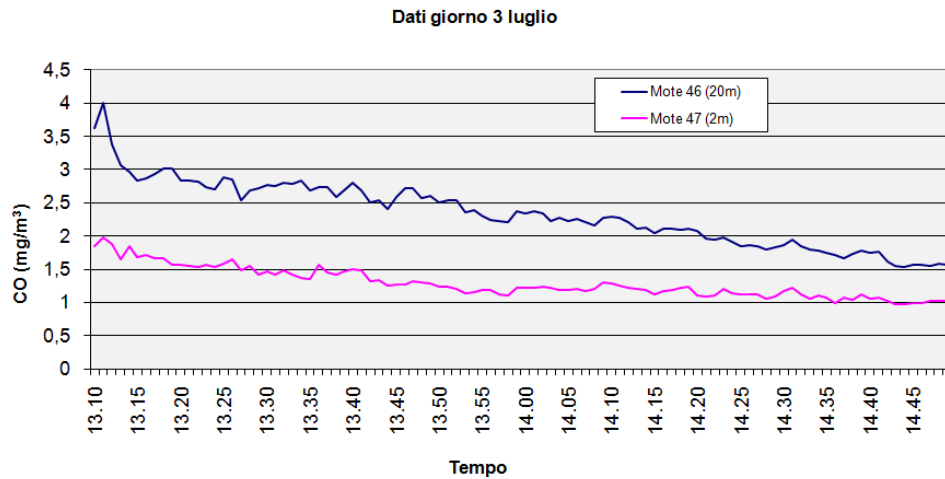


Figura 7.13 – Confronto livelli di rumore orari misurati dai due sensori 46 e 47 collocati sulla Cabina di rilevamento “Castelnuovo”

7.6 Dati rilevati dai sensori “MOTE”

A titolo di esempio, di seguito si riportano i grafici ottenuti dai rilevamenti di CO e NO₂ effettuati dai sensori collocati a differente altezza in corrispondenza della sezione viaria oggetto di studio.





7.7 L'applicazione del modello VISSIM al caso studio

Al fine di rappresentare le condizioni di traffico rilevate e determinare i parametri trasportistici, quali velocità, accelerazione, lunghezza code, tempi di viaggio, ecc., ma anche quantificare le emissioni veicolari, in particolare di Monossido di carbonio (CO), Ossidi di Azoto (NO_x), si è fatto ricorso al modello di simulazione VISSIM precedentemente descritto.

Tale modello infatti prevede un modulo capace di calcolare le emissioni di inquinanti, attraverso le informazioni provenienti da ogni singolo veicolo, secondo per secondo, relativamente a velocità e accelerazione.

Di seguito (v. Figura 7.4) è rappresentata la rete di traffico simulata per l'area oggetto di studio in prossimità dell'edificio comunale presso il quale sono stati collocati i sensori sperimentali.



Figura 7.14 – Rete simulata con il modello VISSIM

Dai dati di traffico rilevati mediante indagini sul campo, secondo lo schema di tabella 2 sono stati determinati i profili di traffico in veicoli/15minuti (v. Figura 5), per il giorno tipico lavorativo, e per due distinte porzioni temporali relative ad un giorno festivo e ad un sabato.

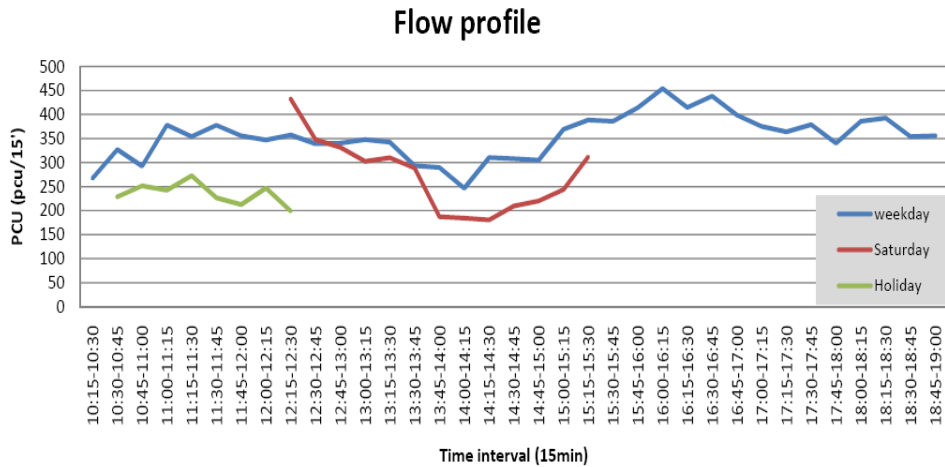


Figura 7.15 – Rete simulata con il modello VISSIM

Inoltre è stato possibile distinguere il flusso per tipologia veicolare, in auto, moto, mezzi leggeri e pesanti, autobus urbani ed extraurbani e altri mezzi (ambulanze, forze dell'ordine, ecc), come si può osservare in figura 7.6.

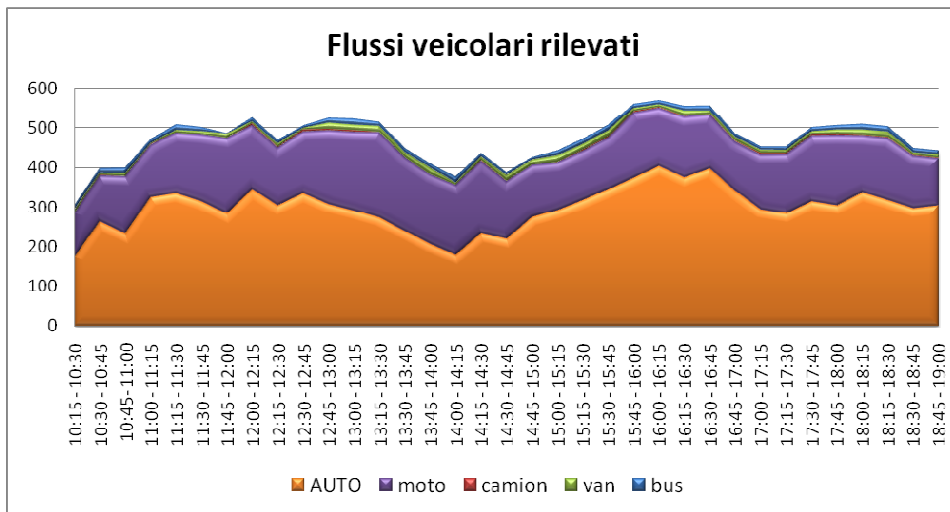


Figura 7.16 – Rete simulata con il modello VISSIM

7.8 Validazione del modello

Al fine di poter utilizzare i dati simulati mediante il modello di traffico, e di simulare ulteriori scenari di progetto, si è effettuata la validazione dello stesso, simulando e confrontando con i dati rilevati, i flussi simulati.

In figura 7.7 si può osservare la rappresentazione grafica dell'area di studio durante la simulazione con il modello, in figura 7.8a si evince chiaramente l'accuratezza del modello nel simulare le condizioni di traffico durante il periodo di simulazione di riferimento (10:15 – 19:00).



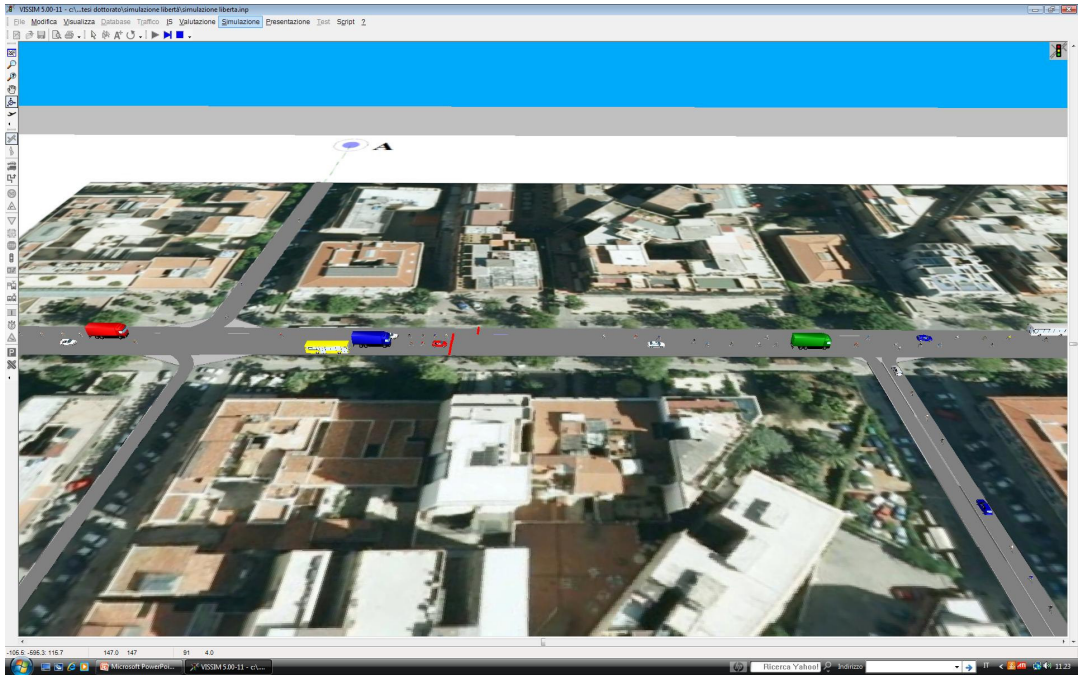


Figura 7.17 – Immagine catturata durante la simulazione 2D e 3D con il micro simulatore VISSIM

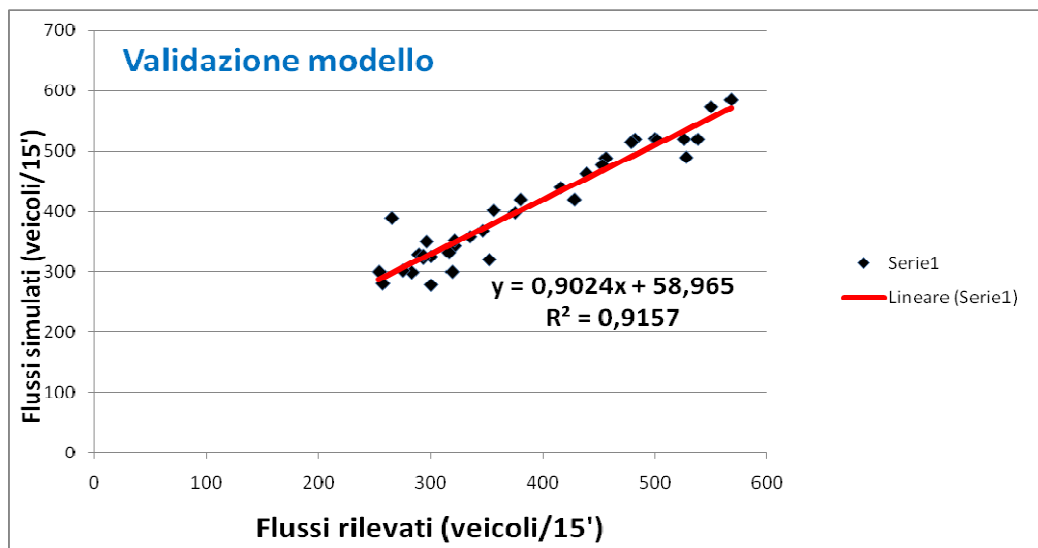


Figura 7.18 – Confronto Flussi rilevati (veicoli/15') e Flussi simulati (veicoli/15')

Avendo rilevato, durante l'indagine, la lunghezza massima delle code rilevate in coincidenza della chiusura del semaforo pedonale, si è eseguita un'ulteriore validazione (v. Figura 7.8b) confrontando tali valori con quelli simulati dal modello in termini di coda massima rilevata, misurata in numero massimo di veicoli in coda per ogni intervallo di riferimento (15 minuti).

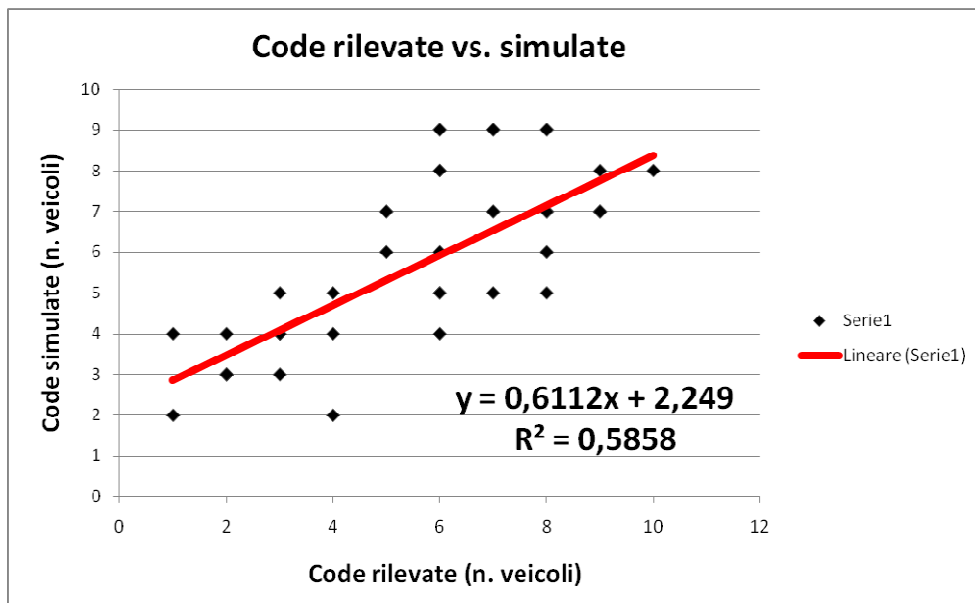


Figura 7.19 – Confronto lunghezza Code rilevate (n° veicoli) e code simulate (n° veicoli)

7.9 Scenari simulati

Avendo ottenuto risultati soddisfacenti con la validazione del modello di traffico si è proceduto alla rappresentazione e simulazione di differenti scenari:

- Attuale, utilizzando i flussi rilevati e la stessa sequenza semaforica rilevata,
- *Attuale con semaforizzazione media*, utilizzando i flussi rilevati e una sequenza semaforica mediata ogni 15 minuti,

- 5 scenari di progetto, utilizzando semaforizzazione con ciclo costante, rispettivamente di 60, 90, 120, 150 e 180 secondi.

7.10 Previsioni degli inquinanti e risultati

Al fine di determinare le concentrazioni inquinanti e verificare l'accuratezza nella previsione delle stesse, si sono utilizzati i dati simulati mediante il microsimulatore di traffico *VISSIM*. In particolare i valori di flusso (veic/sec), di velocità media (km/h) e di emissioni (kg di CO/15') sono stati inseriti come dati di input per il modello di dispersione OSPM. Il calcolo è stato effettuato attraverso l'intera giornata tipo rilevata e tenendo conto dei due differenti rilievi meteorologici di background "Centralina di Boccadifalco" e in ambito urbano "centralina di Politeama".

Di seguito, in figura 8.1 è rappresentata la differente correlazione tra i valori di concentrazione di CO misurati dai sensori e quelli calcolati dal modello di dispersione. In particolare l'utilizzo delle condizioni meteorologiche della cabina di Politeama risulta più adatto alla previsione delle concentrazioni inquinanti di CO per il sensore in posizione più vicina alla sorgente di inquinanti, cioè l'asse viario di via Libertà, mentre quella di Boccadifalco risulta meno adatta al corretto calcolo della dispersione

Figura 7.20 – Correlazione tra concentrazione di CO misurata dal sensore 47 e valori simulati mediante OSPM utilizzando le due differenti informazioni meteorologiche

In figura 8.2a si apprezza maggiormente la migliore accuratezza del calcolo delle concentrazioni di CO mediante l'OSPM utilizzando i dati meteo della cabina del Politeama, mentre dalla figura 8.2b si evince che l'utilizzo del modello OSPM non è adeguato alla previsione delle concentrazioni di CO per il sensore posto in corrispondenza del 7° piano, molto vicino alla sommità del canyon.

In particolare, anche se dalla figura 8.1 non si ottiene un elevato valore di R^2

(0.53), nel grafico seguente si nota la capacità del modello OSPM di riprodurre l'andamento delle concentrazioni di CO misurate dal sensore n°47, garantendo una buona accuratezza nella previsione dei valori più elevati ($\sim 2,5 \text{ mg/m}^3$ di CO).

Figura 7.21 – Variazione delle concentrazioni di CO misurate dal sensore 47 e valori simulati mediante OSPM utilizzando le due differenti informazioni meteorologiche

La limitazione dell'OSPM nel simulare accuratamente le concentrazioni rilevate dal sensore 46, potrebbe essere attribuibile ad un'insufficiente valore della concentrazione di background del CO, o più probabilmente a differenti turbolenze e dispersioni dell'inquinante attribuibili ad una non perfetta linearità del contorno degli edifici, es. la presenza di muri di recinzione e vegetazione, presenza di balconi, ecc.

Tuttavia, considerando che la zona di maggiore interesse ed esposizione per i pedoni è rappresentata dalla area sottostante, in cui teoricamente e come osservato dai grafici di cui alle pagine 65 e 66 anche praticamente, i valori di concentrazione inquinante tendono ad essere superiori.

Figura 7.22 – Variazione delle concentrazioni di CO misurate dal sensore 46 e valori simulati mediante OSPM utilizzando le due differenti informazioni meteorologiche

8 Il caso studio di Castellammare del Golfo

8.1 Premessa

L'obiettivo del presente caso studio è quello di adoperare il microsimulatore calibrato per confrontare, sia per quanto concerne il deflusso veicolare che le emissioni inquinanti, soluzioni alternative riguardo ai sensi di circolazione di una rete stradale di ridotte dimensioni, ma interessata da flussi di traffico rilevanti nel periodo estivo, come quella di Castellammare del Golfo.

Dal confronto fra gli scenari simulati, reale ed ipotizzati, ed attraverso gli output forniti dal software di simulazione, sono stati ottenuti tutti quei dati, trasportistici e di emissione, utili per migliorare il sistema di circolazione e per diminuire le stesse emissioni inquinanti prodotte dal traffico veicolare (tempi minori di percorrenza, riduzione di punti di conflitto, maggiore capacità di smaltimento dei nodi, minore lunghezza delle code, minori consumi di carburante, minori emissioni di alcune principali sostanze inquinanti, ecc.).

8.2 Il sito oggetto di studio

Il nodo principale di Castellammare del Golfo è interessato lungo tutto l'anno, ma in particolare nei mesi estivi, da un intenso traffico, in parte di accesso al centro abitato e in parte di attraversamento, che ha, altresì, un polo di attrazione importante negli esercizi commerciali localizzati diffusamente lungo la tangenziale.

Il sito, che ha richiesto una particolare attenzione nello studio svolto, è rappresentato da una rete stradale situata nel territorio urbano del comune di Castellammare del Golfo. Tale rete è costituita da:

- 3 vie di principale comunicazione (Contrada Gemma d'Oro, viale Umberto I e viale Leonardo Da Vinci) che raccolgono e distribuiscono pre-

valentemente il traffico di scambio tra il territorio urbano e quello extra-urbano ed inoltre disimpegnano il traffico di transito rispetto all'area urbana;

- altre 7 vie (via Giuseppe Saragat, via San Paolo della Croce, via Segesta, via Ferrara, via Vasile, via Francesco Crispi e via Bocca della Carrubba) che risultano essere semplicemente strade locali e di quartiere e che risultano svolgere la funzione di arterie di connessione della tangenziale con la rete locale
- tre incroci semaforizzati che influenzano notevolmente le condizioni attuali del deflusso veicolare dell'intera rete viaria considerata, in quanto nodi caratterizzati da bassi livelli di servizio per l'intensità dei flussi che li interessano, per la loro eterogeneità sia con riferimento alla composizione dei flussi stessi sia per quanto riguarda la varietà delle manovre scelte dai veicoli, e per la regolazione semaforica che non tiene conto della diversità dei volumi di traffico che, nel corso della giornata, si presentano al nodo. Queste considerazioni sono il risultato di un'attenta analisi del sito, oggetto di diverse campagne di rilievo nei periodi dell'anno che maggiormente determinano condizioni di svolgimento del traffico prossime alla congestione.

Allo stato attuale, tutte le strade citate, in relazione alla conformazione del nodo, sono caratterizzate da due corsie a doppio senso di marcia.



Figura 8.1 - Area oggetto di studio (Fonte: Google Earth)

Al fine di rappresentare le condizioni di traffico rilevate e determinare i parametri di livello di servizio, quali ad esempio velocità, accelerazione, lunghezza delle code e tempi di viaggio, si è fatto ricorso al modello di microsimulazione del traffico veicolare calibrato.

8.3 La campagna di rilievo

Per creare il modello di simulazione sono stati necessari alcuni parametri e dati relativi al traffico dei veicoli che attraversano la nostra area di studio. Per ottenere tali dati sono stati fatti diversi rilevamenti in zona, in punti diversi e in fasce orarie diverse, per rilevare le correnti di traffico, le velocità, i tempi di attraversamento dei nodi e gli elementi che influenzano e condizionano la circolazione come ad esempio: i sensi di marcia, la sosta, la presenza di regole di pre-

cedenza e stop, i vari itinerari scelti dai conducenti dei vicoli, la segnaletica orizzontale e verticale, i marciapiedi, la segnaletica luminosa, ecc.

In particolare, il rilievo dei flussi di traffico è stato eseguito attraverso dei conteggi manuali e con l'ausilio di telecamere digitali ad alta risoluzione con riprese sincronizzate, al fine di acquisire l'intero processo di "smaltimento" dei flussi veicolari. Tale rilievo consiste nell'andare a determinare i flussi in ingresso ed in uscita a ciascun nodo della rete stradale presa in esame.

I rilievi sono stati eseguiti in una giornata festiva in modo da cogliere i valori di flusso più elevati. In tale giornata sono state riprese 3 fasce orarie critiche: **17.30-18.30, 18.30-19.30, 19.30-20.30.**



Figura 8.2 - Area oggetto di studio-Punti di accesso

Per effettuare le riprese, sono stati presi in considerazione diversi intervalli di tempo in modo da valutare le condizioni di flusso libero nelle fasce orarie di morbida e le condizioni di flusso prossimo alla congestione, nelle ore critiche della giornata per poi confrontare i flussi di traffico rilevati e altri dati come le velocità dei veicoli e i tempi di attraversamento.

Infine è importante evidenziare che la categoria di veicolo maggiormente rilevata dalle indagini risulta essere l'auto.

8.4 L'applicazione del modello VISSIM al caso studio

Al fine di rappresentare le condizioni di traffico rilevate e determinare i parametri trasportistici, quali ad esempio: velocità, accelerazione, lunghezza delle code, tempi di viaggio, ecc., ma anche quantificare le emissioni veicolari, in particolare di Monossido di carbonio (CO), Ossidi di Azoto (NO_x), Biossido di carbonio (CO₂) e idrocarburi (HC), si è fatto ricorso al modello di simulazione VISSIM precedentemente descritto.

Infatti, tale modello prevede un modulo capace di calcolare le emissioni di inquinanti attraverso le informazioni provenienti da ogni singolo veicolo, secondo per secondo, relativamente a velocità ed accelerazione.

Di seguito è rappresentata la rete di traffico simulata per l'area oggetto di studio situata nel territorio urbano del comune di Castellammare del Golfo

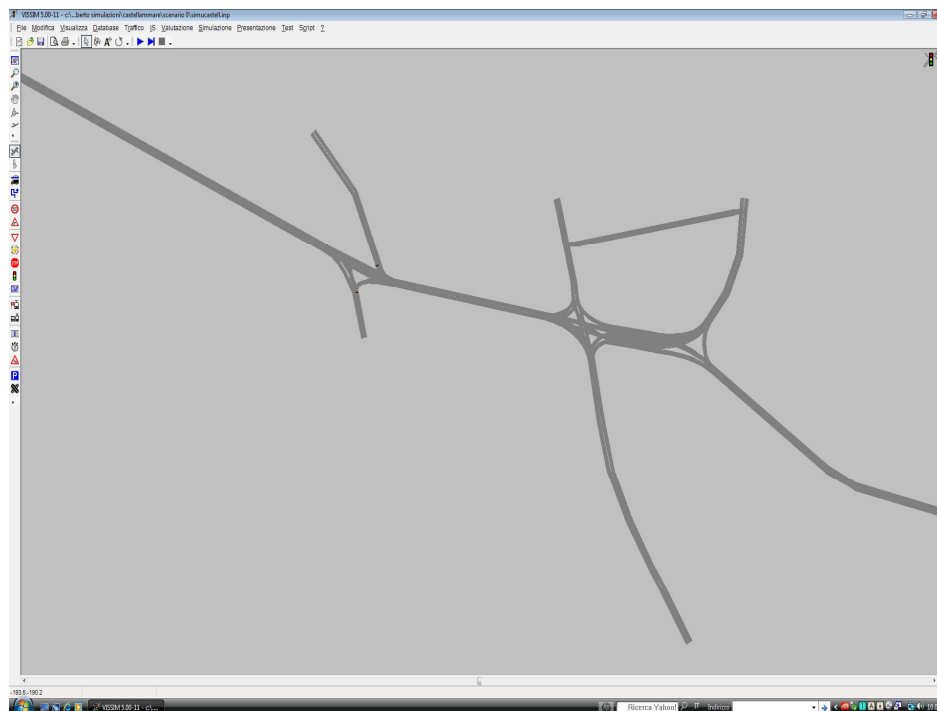


Figura 8.3: Rete stradale simulata con il modello VISSIM

8.4.1 Modellizzazione delle intersezioni semaforizzate

Per modellizzare il comportamento dei veicoli in presenza d'intersezioni semaforizzate abbiamo inserito gli impianti semaforici nello scenario attuale. I semafori sono stati posizionati nei punti in cui devono essere modellizzate le linee di arresto nelle quali si fermeranno i veicoli al momento del rosso. Al momento del giallo i veicoli passeranno solo se non si potranno fermare prima della linea d'arresto in condizioni di sicurezza. Posizionati i semafori abbiamo fatto la temporizzazione dell'impianto semaforico e stabilito la durata del ciclo.

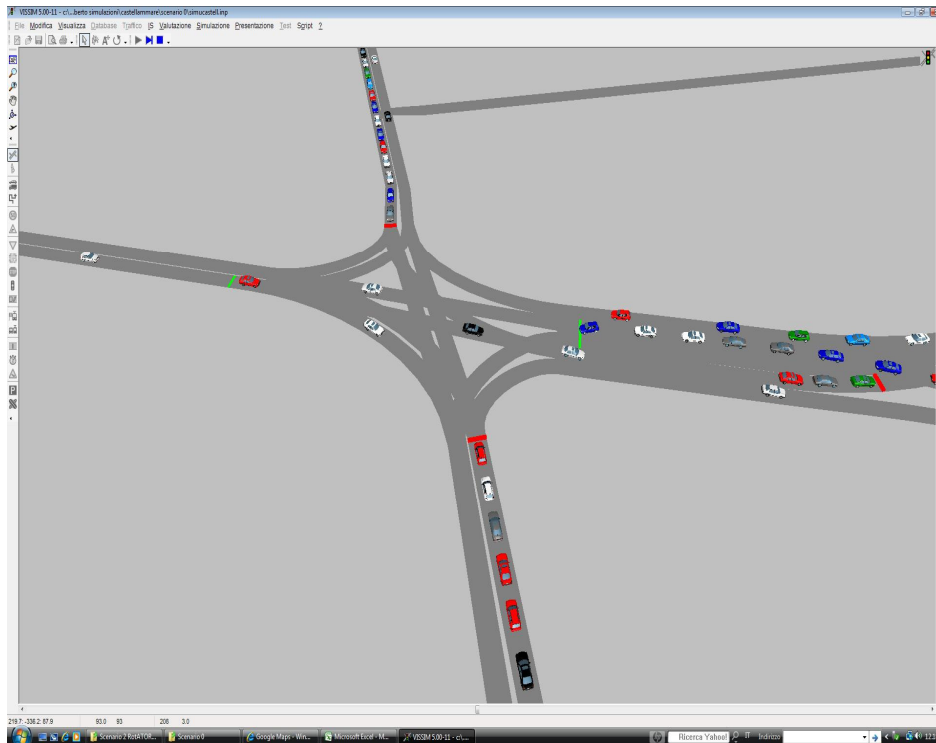


Figura 8.4: Esempio di impianti semaforici modellizzati

8.4.2 Modellizzazione delle intersezioni non semaforizzate

Per modellizzare il comportamento dei veicoli in presenza d'intersezioni non semaforizzate, come vedremo in seguito negli scenari ipotetici simulati, so-

no state inserite regole di precedenza e/o stop . Una regola di precedenza è costituita da una linea d'arresto ed una o più sezioni di diritto precedenza associate alla linea d'arresto. Secondo le condizioni correnti delle sezioni di diritto precedenza, la linea d'arresto permette o meno ai veicoli di attraversare la strada. Le due principali condizioni da controllare sulla sezione diritto precedenza sono:

- Minima interdistanza (intervallo di distanza) (headway);
- Minimo intervallo di tempo (gap time).

Come regola pratica, nelle condizioni di flusso di traffico libero sulla strada principale l'intervallo di tempo è la condizione rilevante, mentre nelle condizioni di flusso lento con veicoli in coda sulla strada principale l'intervallo di distanza diventa il parametro più significativo.

La **minima interdistanza** è tipicamente definita come la lunghezza dell'area di conflitto. Durante la simulazione l'interdistanza è determinata dalla distanza tra la "Sezione diritto precedenza" (barra verde) ed il primo veicolo che si avvicina a questa linea. Se una porzione del veicolo si trova sopra tale barra, l'interdistanza sarà pari a 0. Quando l'interdistanza corrente è minore della minima interdistanza, la corrispondente linea di arresto (barra rossa) bloccherà qualsiasi veicolo in avvicinamento (analogamente al rosso di un semaforo).

L'**intervallo di tempo** corrente (durante la simulazione) è determinato per ogni passo temporale dal tempo che occorre ad un veicolo in avvicinamento per raggiungere la sezione di diritto precedenza (barra verde). Un veicolo posizionato sulla barra verde non viene preso in considerazione dall'intervallo di tempo corrente. Se l'intervallo di tempo corrente è minore del minimo intervallo di tempo (definito per la sezione di diritto precedenza), la corrispondente linea di arresto (barra rossa) bloccherà qualsiasi veicolo in avvicinamento (analogamente al rosso di un semaforo).

VISSIM permette di definire più sezioni di diritto precedenza (barre verdi) per ogni linea d'arresto (barra rossa). Perciò possono essere applicate più regole alla stessa linea d'arresto (barra rossa).

Sia la linea d'arresto che la sezione con diritto di precedenza possono essere definiti anche solo per alcune classi di veicolo. Inoltre può essere definita la velocità massima dei veicoli che percorrono la strada principale: in questo modo solo i veicoli che si avvicinano alla sezione con diritto di precedenza con una velocità minore della velocità massima verranno considerati dall'interdistanza della regola di precedenza.

Le intersezioni regolate da segnali di STOP sono modellate in VISSIM dalla combinazione delle regole di precedenza e segnali di STOP. Un segnale di STOP forza i veicoli a fermarsi almeno per un secondo indipendentemente dalla presenza di un flusso in conflitto. Il segnale di STOP e la linea di arresto (barra rossa) sono posizionati sullo stesso punto.

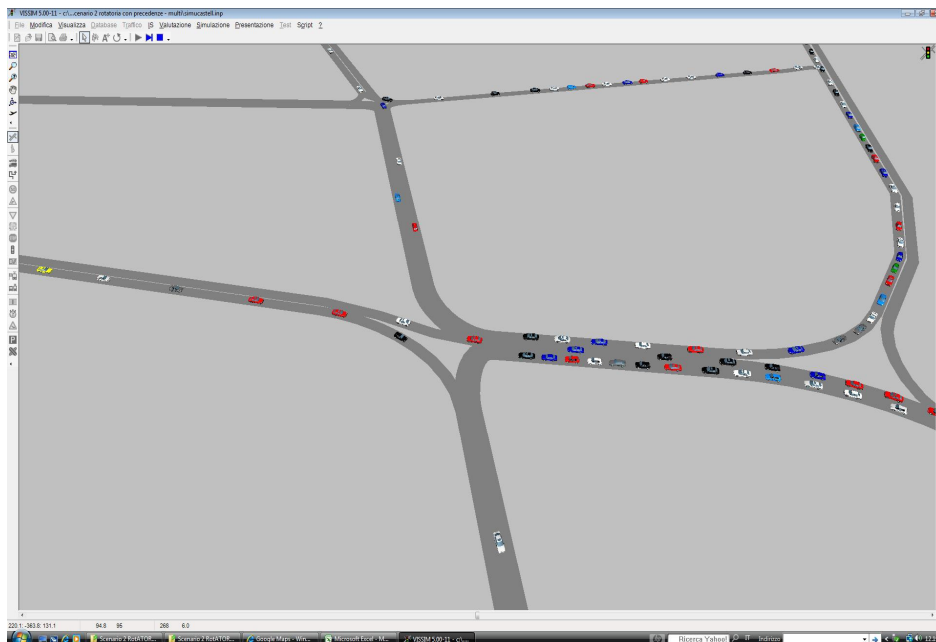


Figura 8.5: Esempio di precedenze modellate

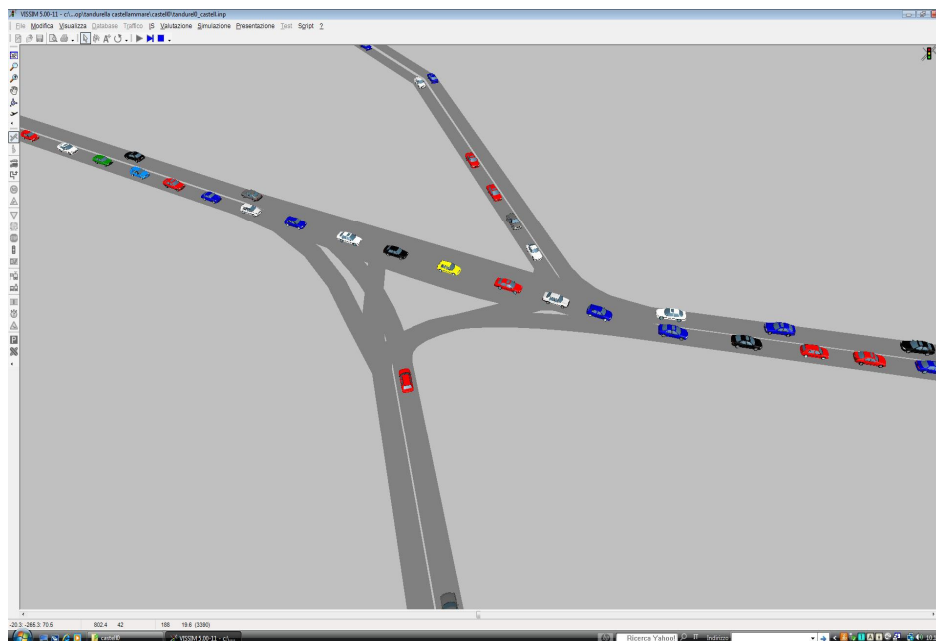


Figura 8.6: Esempio di STOP modellizzati

8.4.3 Modellizzazione dei Flussi di traffico

Una volta modellata la rete stradale, abbiamo inserito i flussi di traffico in ingresso ed in uscita a ciascun nodo della rete stradale stessa, relativi alle 3 fasce orarie dette in precedenza. Per inserire i flussi di traffico abbiamo effettuato i conteggi dei veicoli tramite i rilievi effettuati in zona ed attraverso l'analisi delle riprese fatte. Quindi abbiamo costruito le matrici O/D andando a considerare 7 sezioni d'origine ed allo stesso tempo di destinazione (**A-B-C-D-E-F-G**, vedi figura 8.8 e tabelle seguenti), e determinato le varie composizioni dei veicoli rilevando che la sola auto, rispetto agli altri veicoli, risulta avere una percentuale di traffico significativa. Dalle matrici O/D relative al mattino della domenica, si evince che i flussi più significativi, dell'ordine di 400-500 auto/h, sono dati dagli spostamenti in entrata in Via L. Da Vinci, probabilmente diretti in prevalenza alla spiaggia Playa, e dagli spostamenti di attraversamento est-ovest, verosimilmente diretti, in gran parte, alle altre zone balneari della costiera trapanese.

Le matrici O/D relative al pomeriggio della domenica, invece, mettono in luce per tutto l'arco temporale 17:30-20:30, consistenti flussi orari di attraversamento ovest-est, verosimilmente dovuti al ritorno dei "vacanzieri" dai principali luoghi di mare dell'area, come S. Vito Lo Capo, Scopello, etc. In particolare, tali flussi, del valore di 600-750 auto/h, generano fenomeni di elevata congestione, con la formazione di plotoni di auto che procedono alla velocità media di circa 7-8 km/h, già in corrispondenza dello snodo che consente il raggiungimento di Scopello.

Nel periodo di riferimento, si sono registrati, altresì, significativi flussi in ingresso nella via Segesta, probabilmente a causa di spostamenti ad opera di residenti e di non residenti interessati alle opportunità di svago offerte dal centro storico di Castellammare nel periodo serale-notturno.

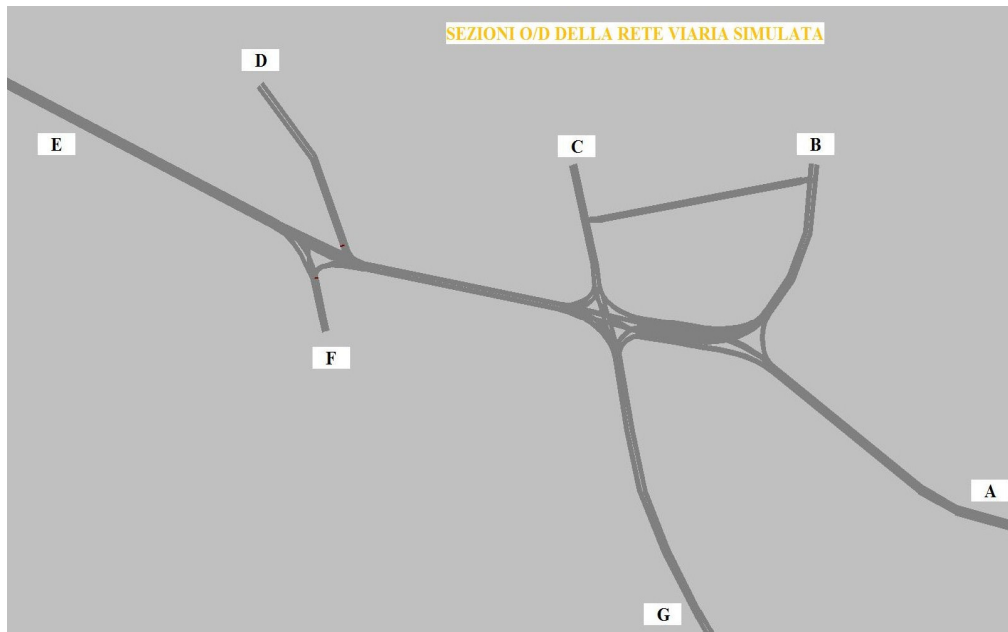


Figura 8.7: Sezioni d'origine e di destinazione

Flussi di traffico rilevati (17.30-18.30)

| O/D | A | B | C | D | E | F | G | Tot |
|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| A | 0 | 189 | 390 | 50 | 174 | 0 | 0 | 803 |
| B | 260 | 0 | 96 | 70 | 25 | 100 | 166 | 717 |
| C | 120 | 0 | 0 | 0 | 197 | 33 | 271 | 621 |
| D | 160 | 0 | 0 | 0 | 160 | 40 | 160 | 520 |
| E | 746 | 131 | 0 | 40 | 0 | 40 | 188 | 1145 |
| F | 0 | 120 | 0 | 80 | 120 | 0 | 0 | 320 |
| G | 0 | 114 | 262 | 130 | 120 | 0 | 0 | 626 |
| Tot | 1286 | 554 | 748 | 370 | 796 | 213 | 785 | - |

Flussi di traffico rilevati (18.30-19.30)

| O/D | A | B | C | D | E | F | G | Tot |
|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| A | 0 | 196 | 390 | 70 | 245 | 0 | 0 | 901 |
| B | 293 | 0 | 96 | 70 | 35 | 100 | 148 | 742 |
| C | 157 | 0 | 0 | 0 | 133 | 33 | 152 | 476 |
| D | 160 | 0 | 0 | 0 | 160 | 40 | 160 | 520 |
| E | 566 | 128 | 0 | 40 | 0 | 40 | 73 | 847 |
| F | 0 | 120 | 0 | 80 | 120 | 0 | 0 | 320 |
| G | 0 | 114 | 262 | 130 | 120 | 0 | 0 | 626 |
| Tot | 1177 | 558 | 748 | 390 | 813 | 213 | 533 | - |

Flussi di traffico rilevati (19.30-20.30)

| O/D | A | B | C | D | E | F | G | Tot |
|------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|----------|
| A | 0 | 211 | 390 | 86 | 300 | 0 | 0 | 987 |
| B | 225 | 0 | 96 | 70 | 43 | 100 | 150 | 684 |
| C | 240 | 0 | 0 | 0 | 132 | 33 | 163 | 568 |
| D | 160 | 0 | 0 | 0 | 160 | 40 | 160 | 520 |
| E | 653 | 188 | 0 | 40 | 0 | 40 | 101 | 1022 |
| F | 0 | 120 | 0 | 80 | 120 | 0 | 0 | 320 |
| G | 0 | 186 | 262 | 130 | 120 | 0 | 0 | 698 |
| Tot | 1278 | 705 | 748 | 406 | 875 | 213 | 574 | - |

Flussi di traffico rilevati (17.30-20.30)

| O/D | A | B | C | D | E | F | G | Tot |
|-----|------|------|------|------|------|-----|------|------|
| A | 0 | 596 | 1170 | 206 | 719 | 0 | 0 | 2691 |
| B | 778 | 0 | 288 | 210 | 103 | 300 | 464 | 2142 |
| C | 517 | 0 | 0 | 0 | 462 | 99 | 586 | 1664 |
| D | 480 | 0 | 0 | 0 | 480 | 120 | 480 | 1560 |
| E | 1965 | 447 | 0 | 120 | 0 | 120 | 362 | 3013 |
| F | 0 | 360 | 0 | 240 | 360 | 0 | 0 | 960 |
| G | 0 | 414 | 786 | 390 | 360 | 0 | 0 | 1950 |
| Tot | 3740 | 1816 | 2244 | 1166 | 2484 | 639 | 1892 | - |

Successivamente, i flussi di traffico inseriti vengono modellizzati dal programma, nel quale ogni veicolo, oltre ad avere una visualizzazione grafica, ha anche un determinato comportamento nel seguire una traiettoria, effettuare una manovra, cambiare corsia, accodarsi ad un veicolo, ecc. Tutto ciò dipende dai parametri che abbiamo inserito sul comportamento di guida.

Pertanto, note le sezioni d'origine e di destinazione, abbiamo modellato i vari itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio in riferimento ai tre scenari simulati. Inoltre, dal confronto delle relative immagini è stato possibile evidenziare le variazioni che sono state effettuate sugli itinerari degli scenari ipotizzati (1, 2) rispetto a quelli dello scenario reale (0), come di seguito si riporta:

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (A) e destinazione nei nodi (B, C, D, E) relativamente ai tre scenari:

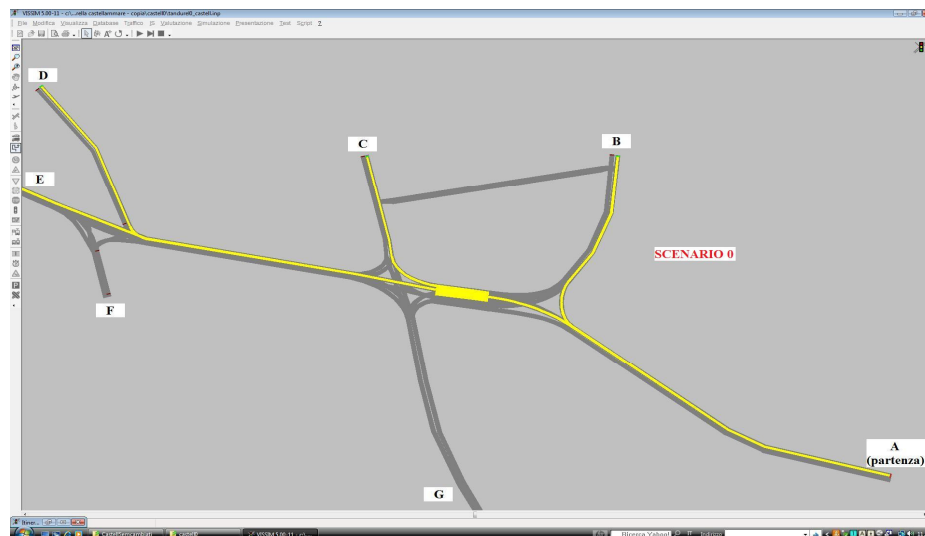


Figura 8.8: Itinerari dal nodo A verso i nodi B, C, D, E dello Scenario 0



Figura 8.9: Itinerari dal nodo A verso i nodi B, C, D, E dello Scenario 1

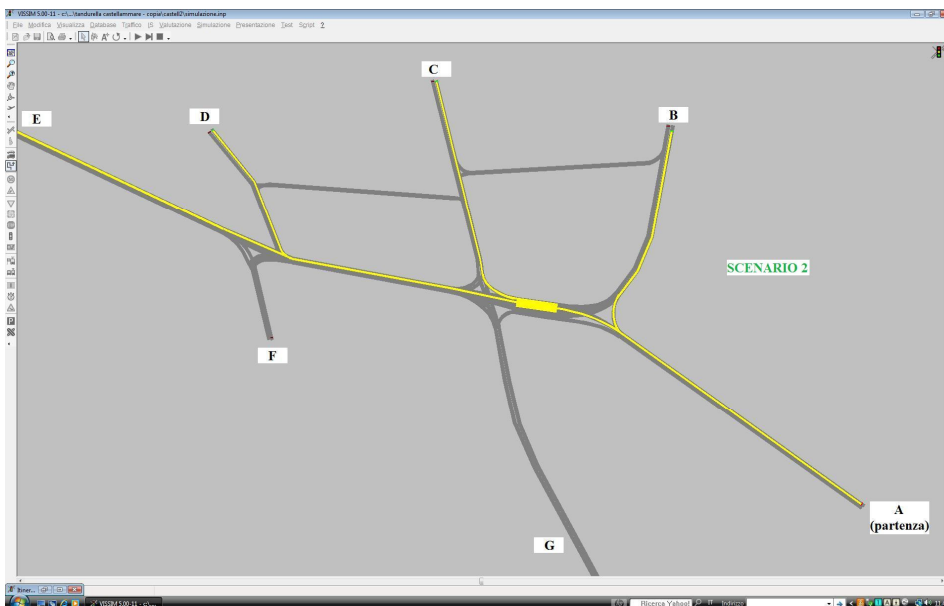


Figura 8.10: Itinerari dal nodo A verso i nodi B, C, D, E dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge la sola variazione dell'itinerario A-D dello scenario 1.

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (B) e destinazione nei nodi (C, D, E, F, G, A) relativamente ai tre scenari:

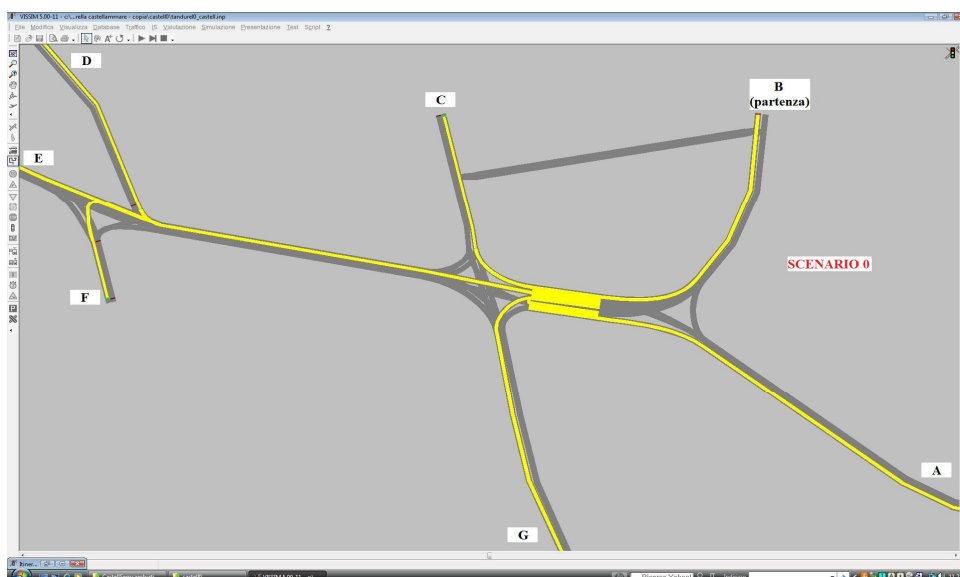


Figura 8.11: Itinerari dal nodo B verso i nodi C, D, E, F, G, A dello Scenario 0

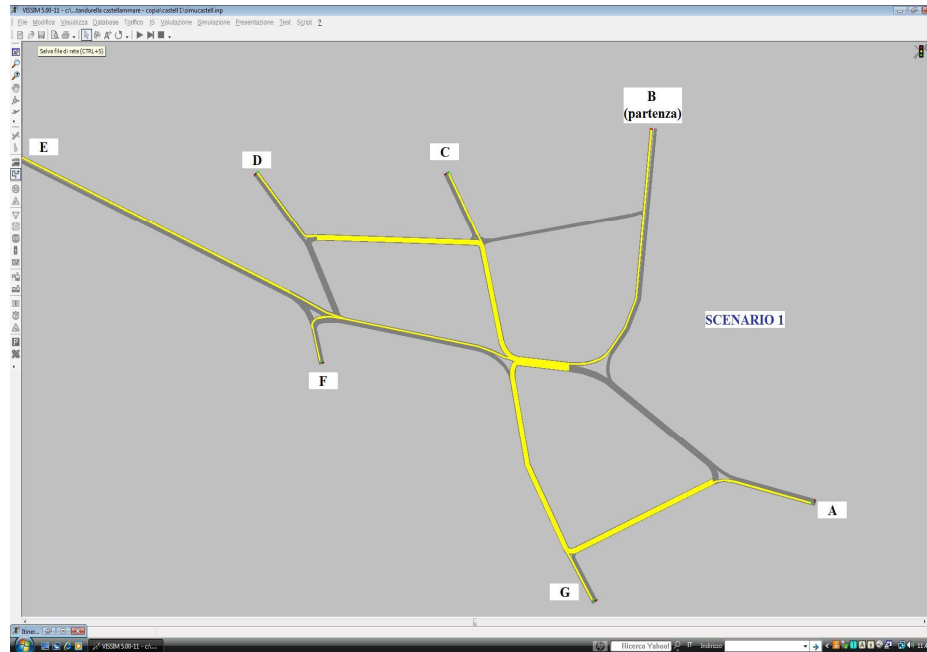


Figura 8.12: Itinerari dal nodo B verso i nodi C, D, E, F, G, A dello Scenario 1

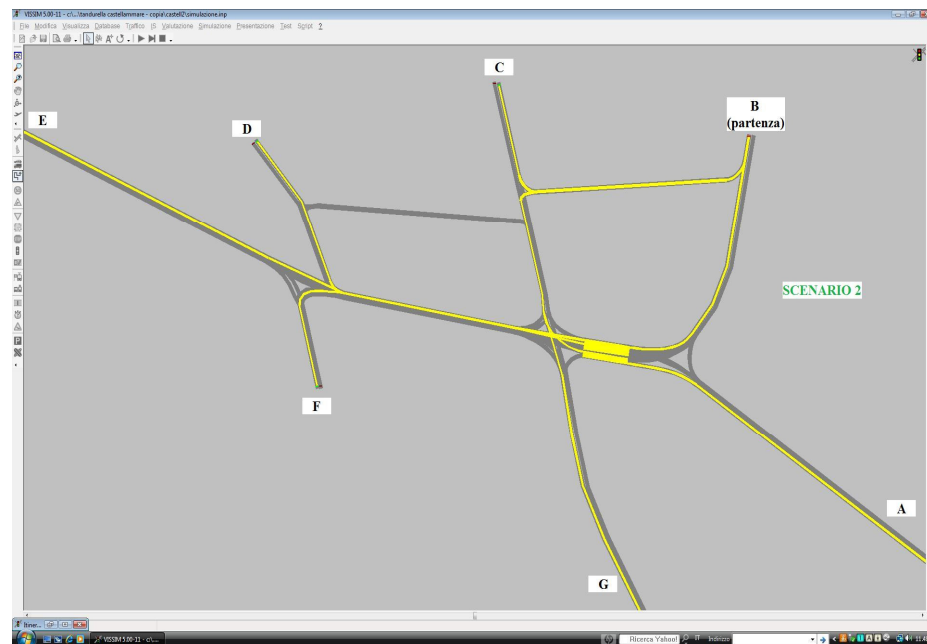


Figura 8.13: Itinerari dal nodo B verso i nodi C, D, E, F, G, A dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge una variazione degli itinerari B-A, B-D dello scenario 1 e B-A, B-C, B-G dello scenario 2.

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (C) e destinazione nei nodi (E, F, G, A) relativamente ai tre scenari:

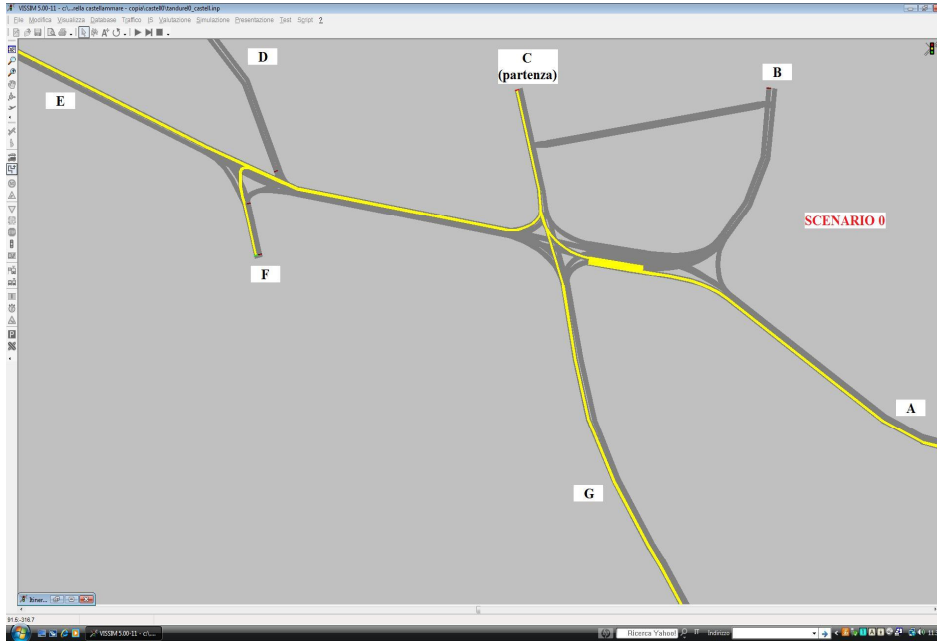


Figura 8.14: Itinerari dal nodo C verso i nodi E, F, G, A dello Scenario 0

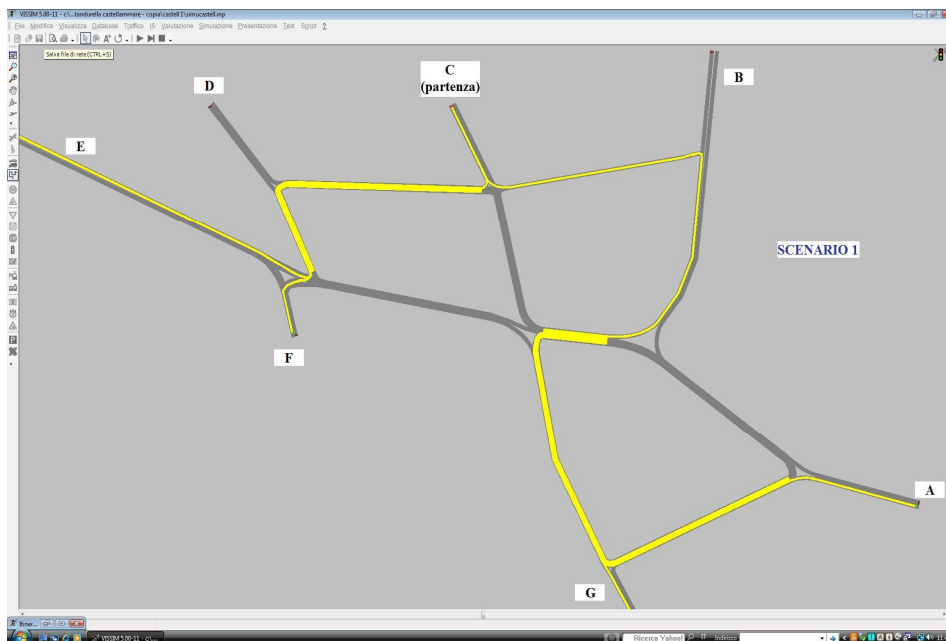


Figura 8.15: Itinerari dal nodo C verso i nodi E, F, G, A dello Scenario 1

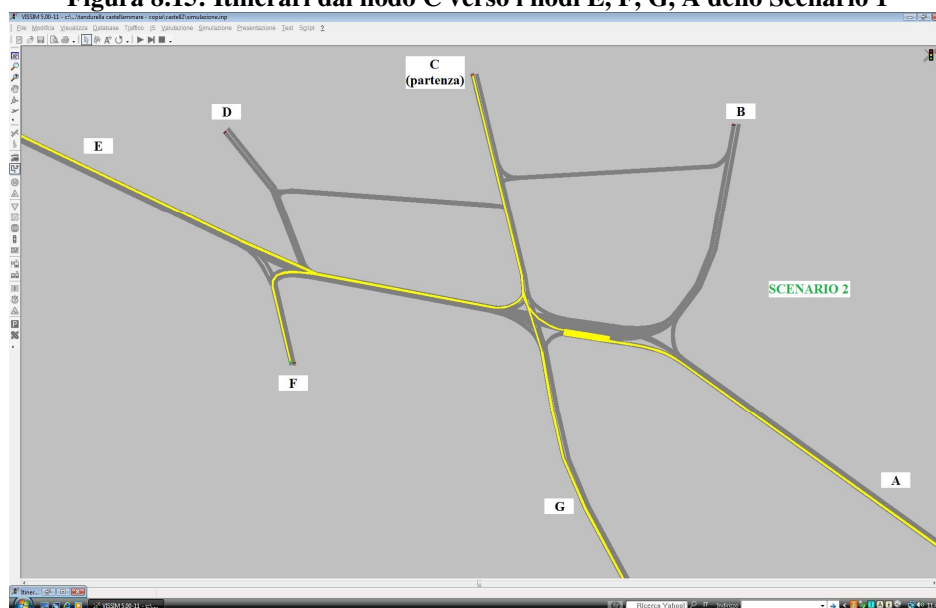


Figura 8.16: Itinerari dal nodo C verso i nodi E, F, G, A dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge la sola variazione degli itinerari C-A, C-F, C-G, C-E dello scenario 1.

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (D) e destinazione nei nodi (E, F, G, A) relativamente ai tre scenari:

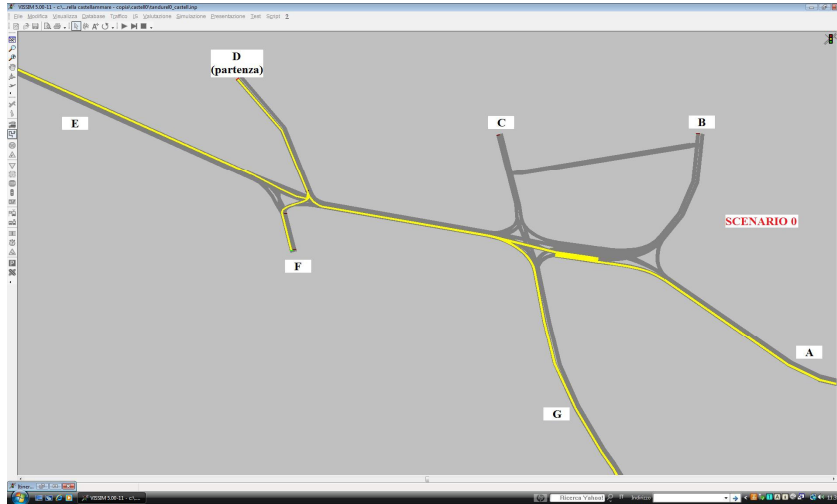


Figura 8.17: Itinerari dal nodo D verso i nodi E, F, G, A dello Scenario 0

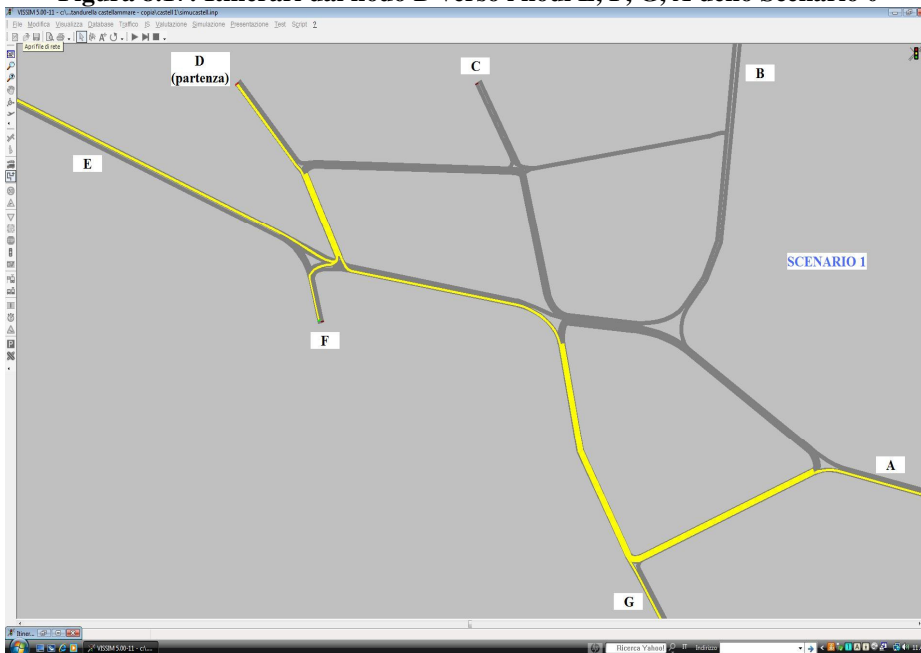


Figura 8.18: Itinerari dal nodo D verso i nodi E, F, G, A dello Scenario 1

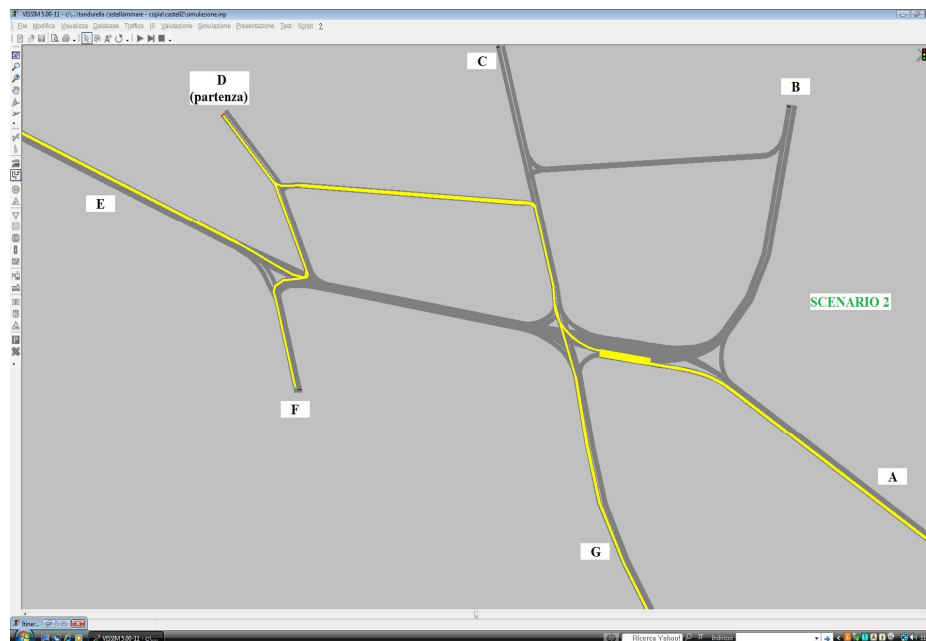


Figura 8.19: Itinerari dal nodo D verso i nodi E, F, G, A dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge una variazione dell'itinerario D-A dello scenario 1 e degli itinerari D-G, D-A dello scenario 2.

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (E) e destinazione nei nodi (F, G, A, B, D) relativamente ai tre scenari:

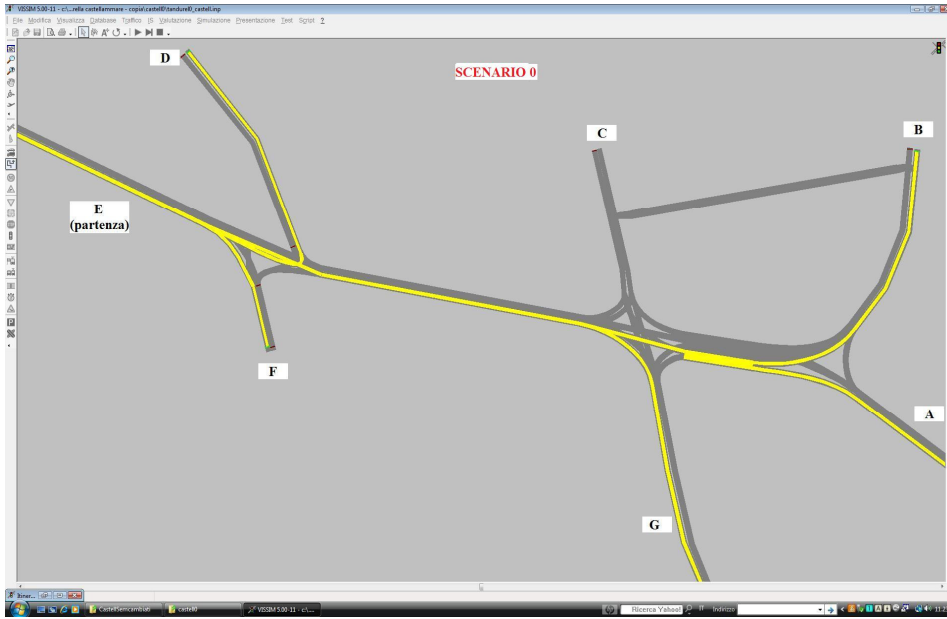


Figura 8.20: Itinerari dal nodo E verso i nodi F, G, A, B, D dello Scenario 0

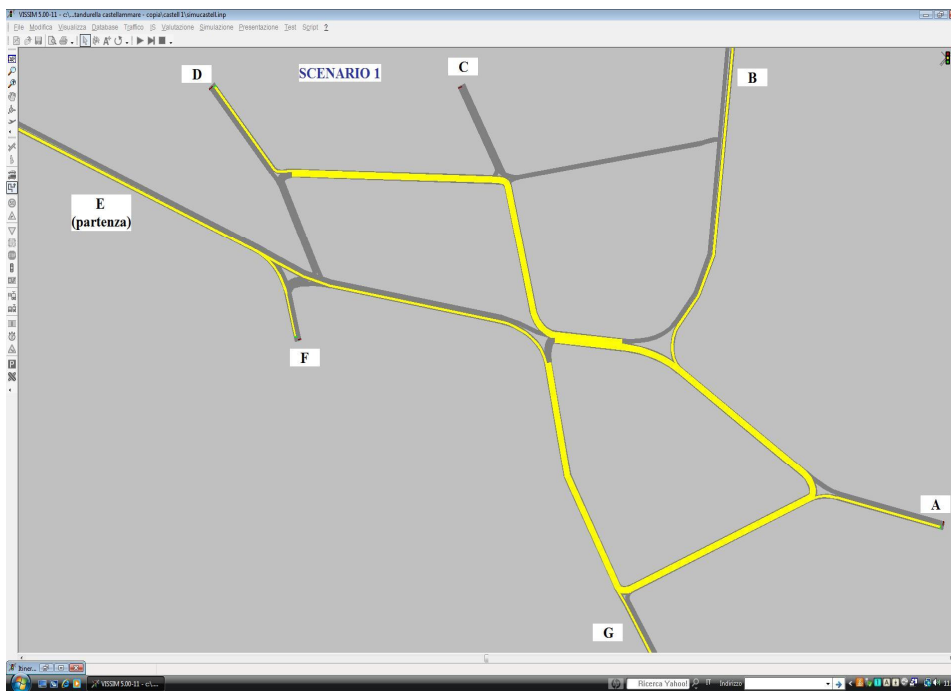


Figura 8.21: Itinerari dal nodo E verso i nodi F, G, A, B, D dello Scenario 1



Figura 8.22: Itinerari dal nodo E verso i nodi F, G, A, B, D dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge la sola variazione degli itinerari E-A, E-D, E-B dello scenario 1.

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (F) e destinazione nei nodi (B, D, E) relativamente ai tre scenari:

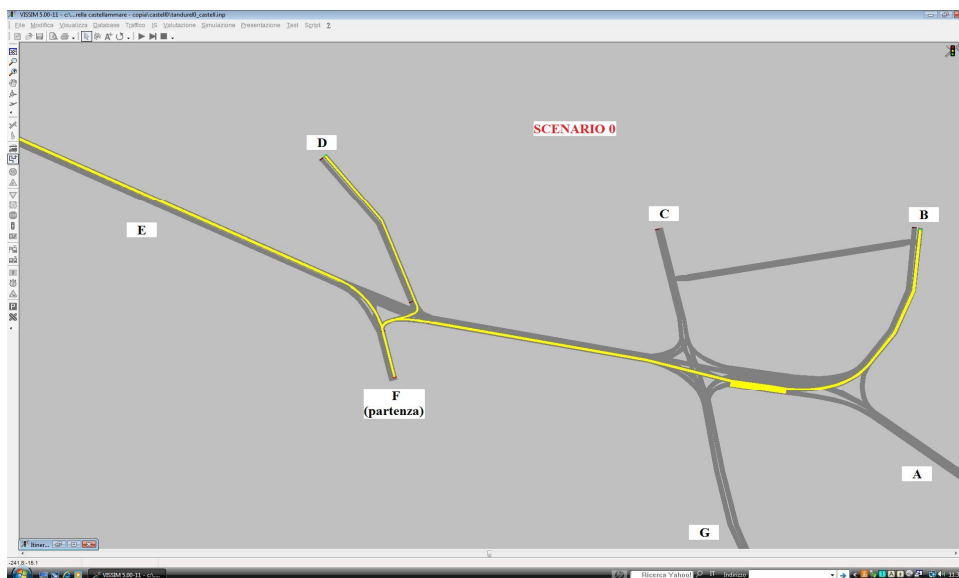


Figura 8.23: Itinerari dal nodo F verso i nodi B, D, E dello Scenario 0

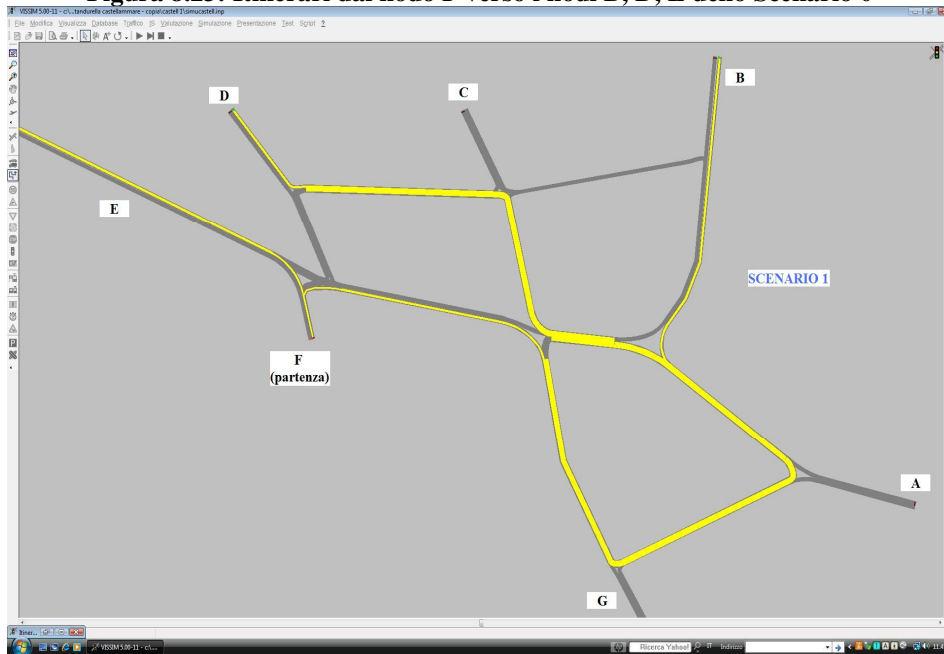


Figura 8.24: Itinerari dal nodo F verso i nodi B, D, E dello Scenario 1

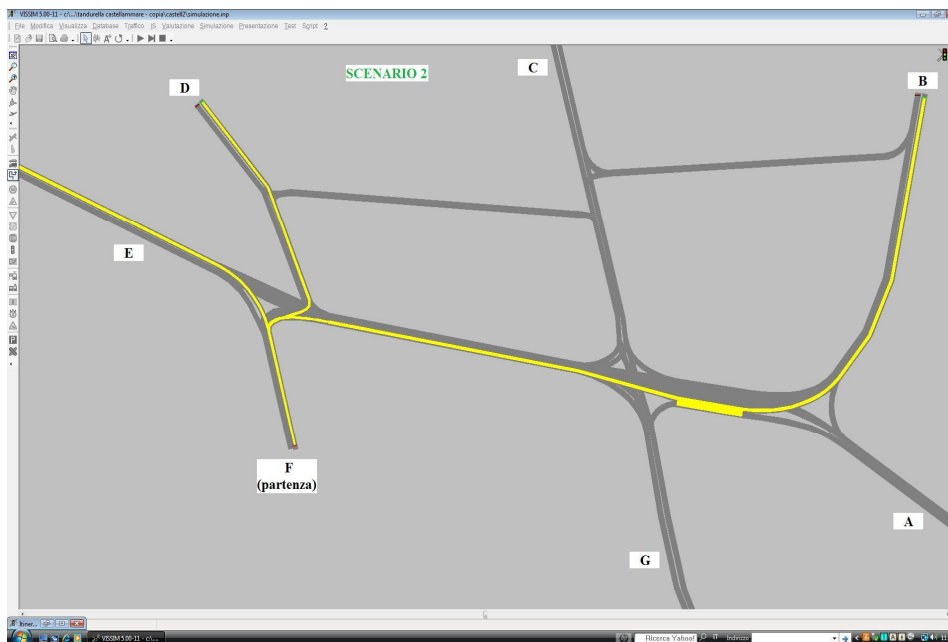


Figura 8.25: Itinerari dal nodo F verso i nodi B, D, E dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge la sola variazione degli itinerari F-D, F-B dello scenario 1.

- Rappresentazione degli itinerari seguiti dai veicoli all'interno dell'area di studio con origine nel nodo (G) e destinazione nei nodi (B, C, D, E, F) relativamente ai tre scenari:

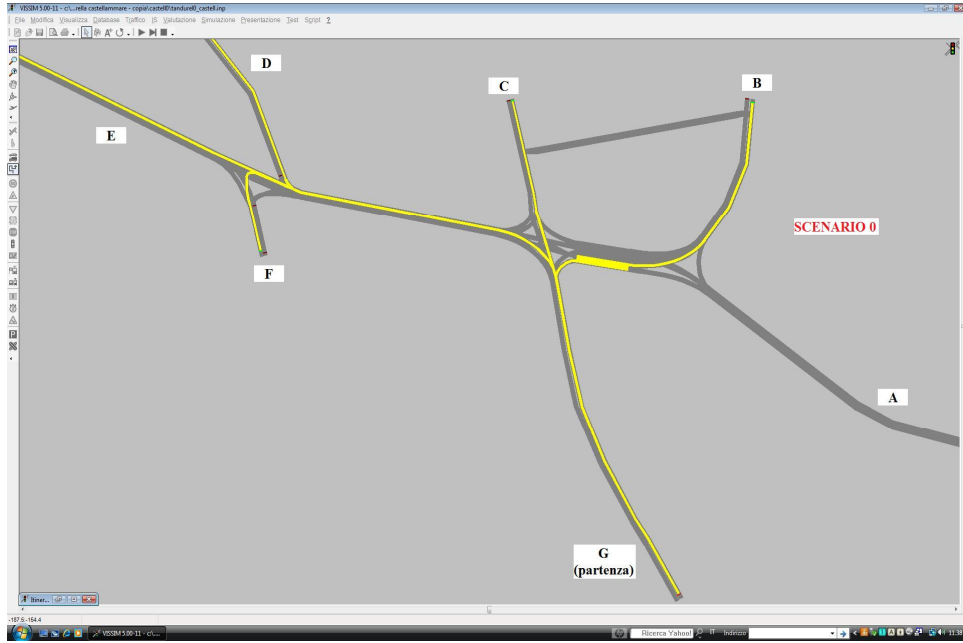


Figura 8.26: Itinerari dal nodo G verso i nodi B, C, D, E, F dello Scenario 0

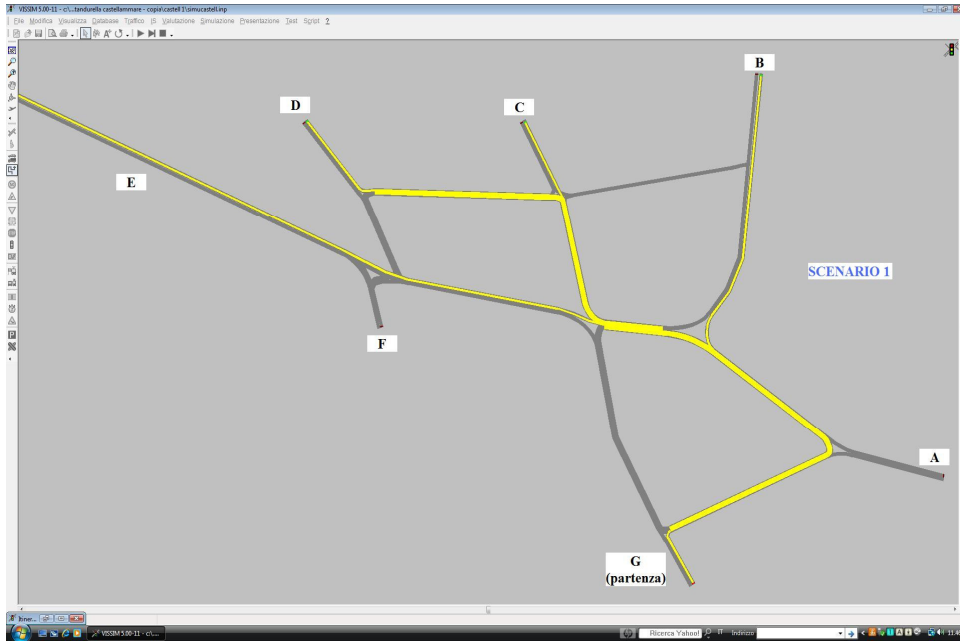


Figura 8.27: Itinerari dal nodo G verso i nodi B, C, D, E dello Scenario 1

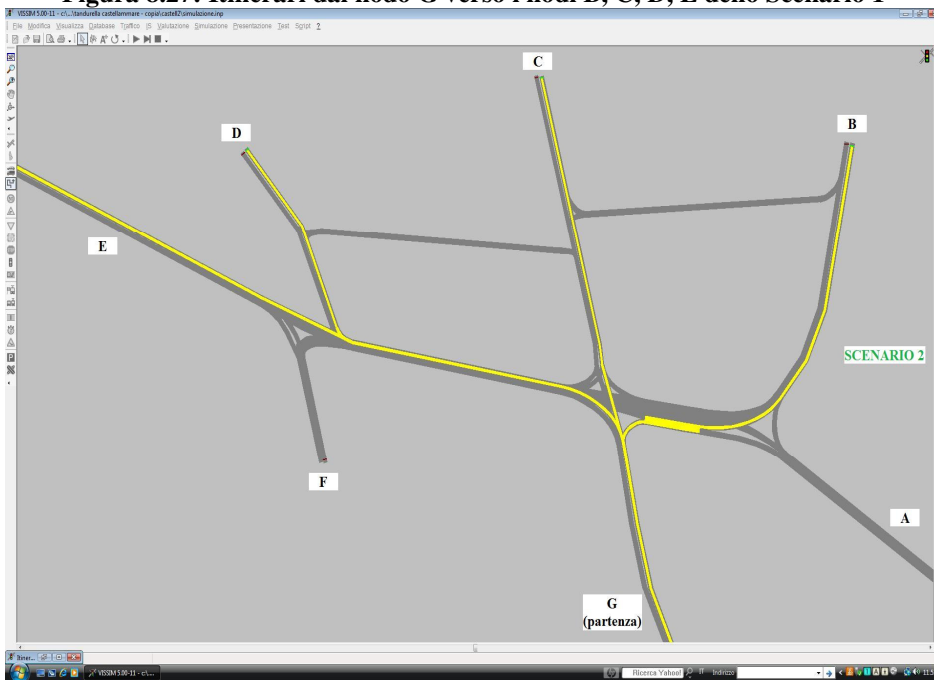


Figura 8.28: Itinerari dal nodo G verso i nodi B, C, D, E dello Scenario 2

Dal confronto con lo scenario 0 emerge una variazione degli itinerari G-B, G-C, G-D, G-E dello scenario 1 e l'eliminazione dell'itinerario G-F sia nello scenario 1 che in quello 2.

8.5 Valutazione dei scenari simulati

Modellata la rete stradale urbana ed i relativi flussi di traffico, sono stati valutati alcuni parametri di tipo trasportistico ed emissivo per confrontare, appunto, lo scenario reale con quelli ipotizzati e valutare quale dei tre risulta essere il migliore ed il più efficace. Il confronto è stato effettuato attraverso gli output che il software fornisce per ogni tipo di valutazione alla fine di ogni simulazione. Inoltre, al fine di valutare più velocemente la soluzione migliore, sono stati elaborati dei diagrammi tramite l'utilizzo del programma di calcolo Excel.

Pertanto, gli scenari che abbiamo simulato attraverso il software di simulazione VISSIM, come mostrato nelle figure precedenti, sono:

- **Scenario 0:** simulazione delle condizioni reali della circolazione stradale.
- **Scenario 1:** simulazione della circolazione stradale con l'assenza di impianti semaforici e l'inserimento di due rotatorie.
- **Scenario 2:** simulazione della circolazione stradale con l'abolizione di alcune manovre e la variazione di alcuni itinerari.

I parametri di emissione delle sostanze inquinanti che sono stati utilizzati per il confronto dei tre scenari sono:

- Emissioni di CO
- Emissioni di CO₂
- Emissioni di HC
- Emissioni di NO_x

Mentre il parametro trasportistico che è stato considerato risulta è:

- Il tempo di percorrenza totale e il tempo di percorrenza di alcuni itinerari ben precisi e fondamentali per lo studio della rete.

Dall'analisi delle simulazioni effettuate con i tre scenari e dagli output che il software ci ha fornito, si sono ottenute le seguenti emissioni istantanee di CO, CO₂, HC e NO_x nell'intervallo di tempo 17.30-20.30 visualizzate in forma grafica nelle seguenti figure:

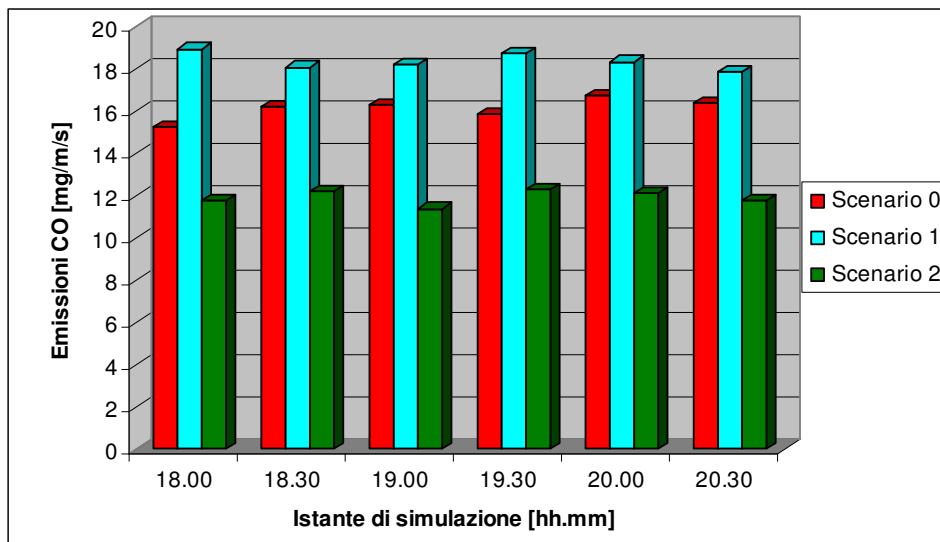


Figura 8.29: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di CO

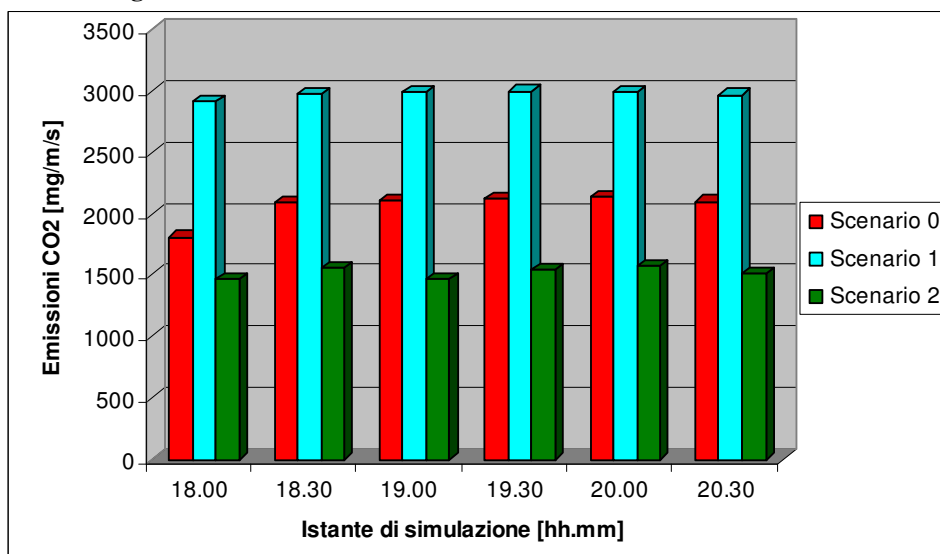


Figura 8.30: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di CO₂

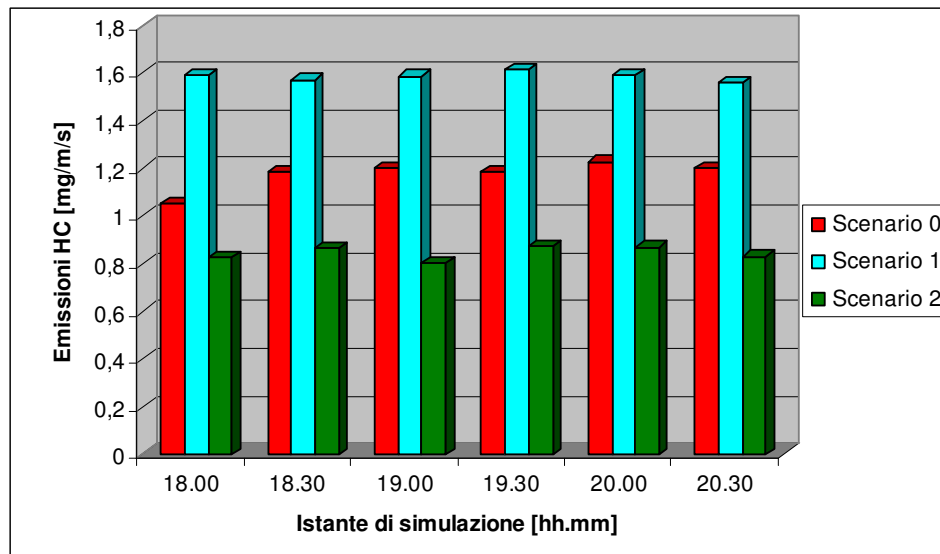


Figura 8.31: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di HC

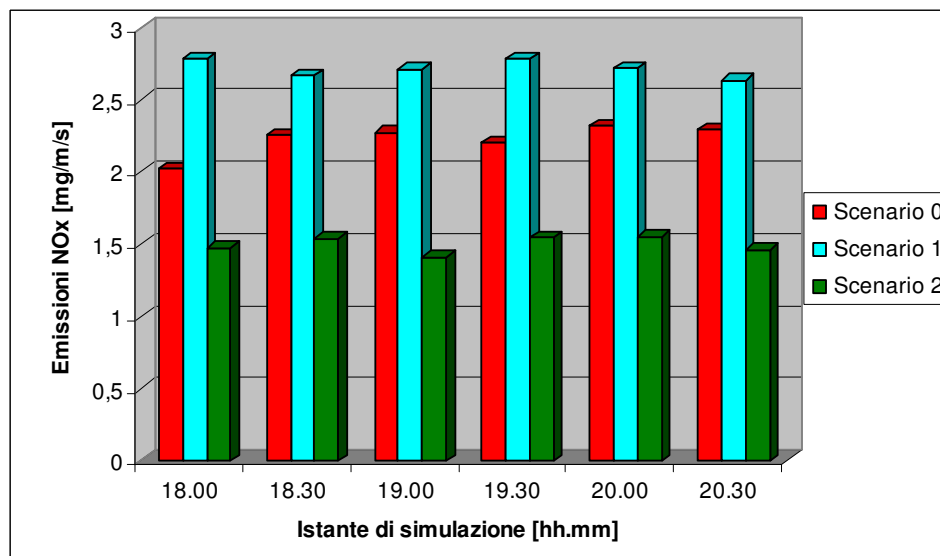


Figura 8.32: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di NOx

Dall'analisi degli istogrammi si deduce che le emissioni istantanee delle quattro sostanze inquinanti nell'intervallo di simulazione 17.30-20.30 risultano essere per i vari scenari pressoché costanti e che la soluzione che dà origine a valori di emissioni più bassi rispetto allo scenario 0 è quella relativa allo scenario

2; mentre quella relativa allo scenario 1 risulta essere, addirittura, abbastanza più gravosa rispetto a quella dello scenario 0.

Pertanto, l'intervento migliore da adottare sull'organizzazione della circolazione veicolare dell'intera rete stradale risulta essere quello di eliminare totalmente gli impianti semaforici presenti allo stato attuale e di abolire alcune manovre come è stato mostrato precedentemente nelle immagini degli itinerari simulati.

Inoltre, sempre dalle stesse simulazioni, sono state ricavate le emissioni totali di CO, CO₂, HC e NOx nell'intervallo di tempo 17.30-20.30 (v. Figure 36, 37, 38, 39).

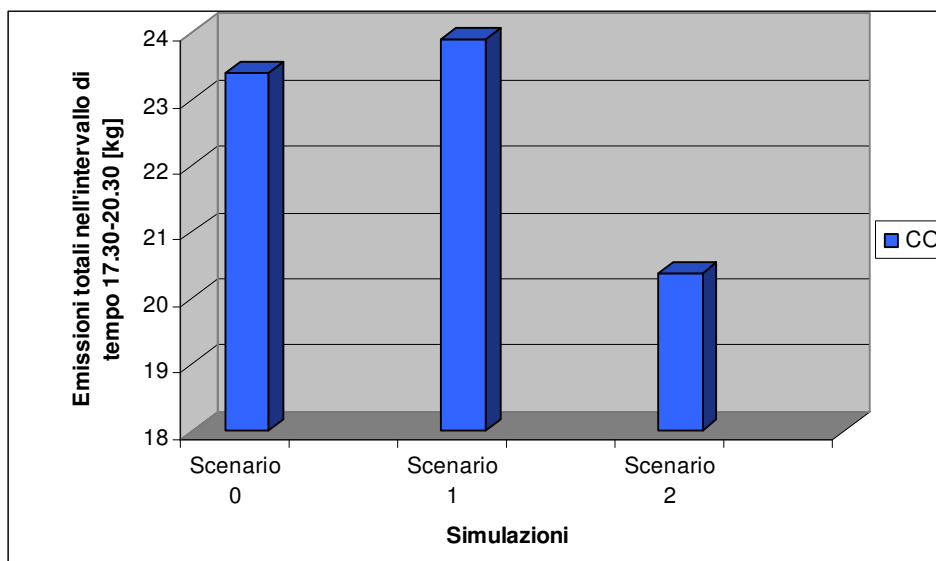


Figura 8.33: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di CO nell'intervallo 17.30-20.30

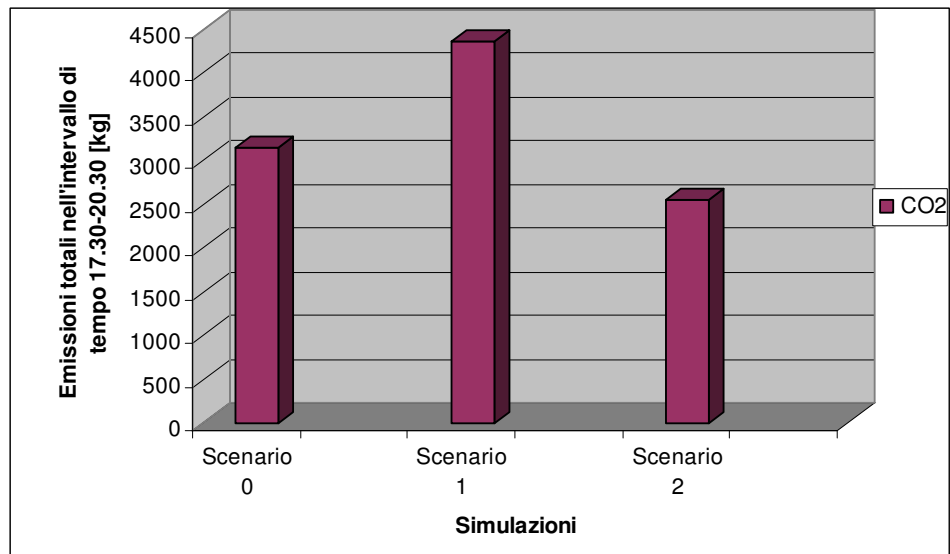


Figura 8.34: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di CO₂ nell'intervallo 17.30-20.30

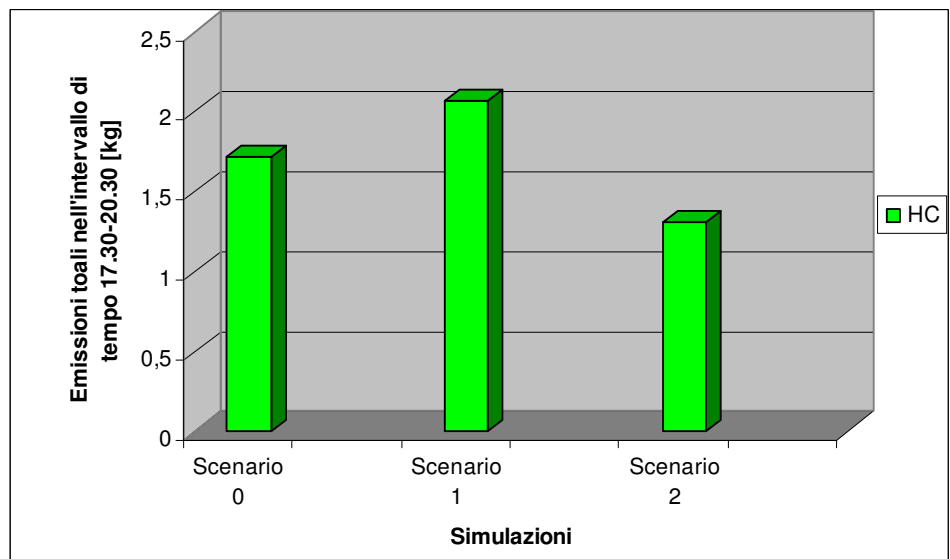


Figura 8.35: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di HC nell'intervallo 17.30-20.30

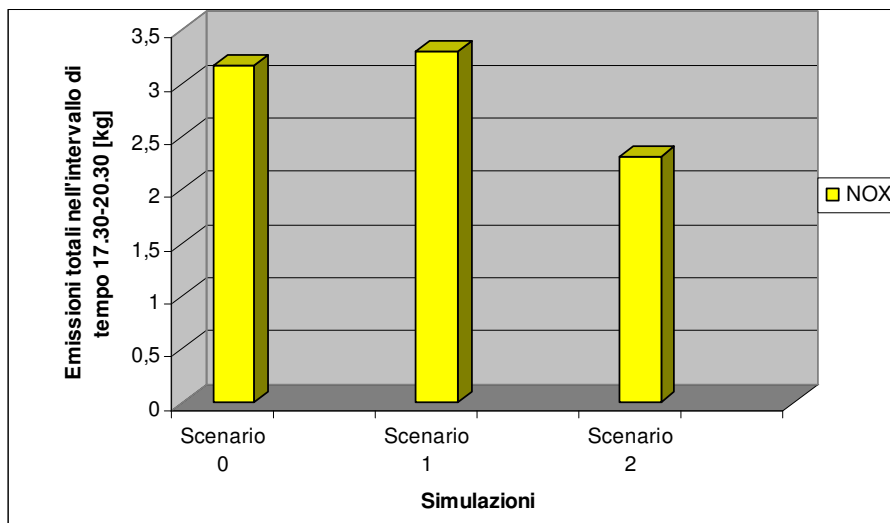


Figura 8.36: Confronto dei scenari simulati sulle emissioni di NOx nell'intervallo 17.30-20.30

Come si evince anche dai diagrammi suddetti, lo scenario 2 risulta essere quello che abbatta maggiormente le emissioni totali dei quattro inquinanti nell'intervallo di simulazione considerato.

Infine, si riporta di seguito, per un confronto degli scenari dal punto di vista trasportistico, l'istogramma relativo ai tempi di percorrenza totali di tutti i veicoli circolanti nella rete stradale sempre nell'intervallo di tempo 17.30-20.30; evincendo, anche in questo caso, il notevole miglioramento che lo scenario 2 determina rispetto agli altri due scenari.

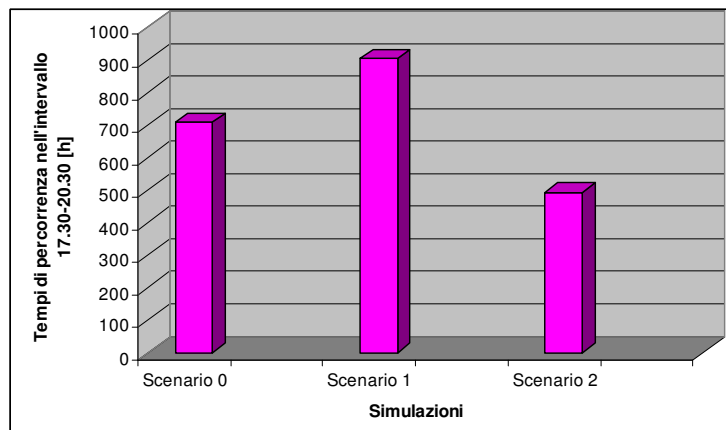


Figura 8.37: Confronto dei scenari simulati sui tempi di percorrenza nell'intervallo 17.30-20.30

Se da una prima analisi basata sulla esperienza, l'introduzione di rotatorie in sostituzione degli impianti semaforici esistenti poteva sembrare la soluzione ottimale, il microsimulatore calibrato ha mostrato invece dei peggioramenti, sia nel deflusso veicolare che nelle emissioni inquinanti prodotte dai veicoli, generati dalla lunghezza insufficiente di un arco della rotatoria di maggiore dimensione in funzione degli ingenti flussi di scambio ivi convergenti. Risulta dunque il microsimulatore uno strumento idoneo a valutare *ex ante* soluzioni organizzative di particolare complessità riguardanti il deflusso veicolare su una rete stradale.

8.6 Considerazioni conclusive e di prospettiva

Da queste considerazioni emerge l'esigenza, peraltro, affrontata nell'ambito del seguente lavoro, di una razionalizzazione del contesto castellammarese che, pur nella sua posizione periferica, costituisce un nodo fondamentale della mobilità, sia quella che ha destinazione nella città oggetto dello studio sia quella che è solo di transito per raggiungere altri luoghi della costiera che da Castellammare si conclude a San Vito Lo Capo.

La carente situazione infrastrutturale (dal punto di vista stradale) di quest'area comporta che l'attraversamento di Castellammare sia inevitabile per chi è diretto nelle località di Guidaloca, Scopello, Zingaro, Custonaci, San Vito Lo Capo. Le limitate capacità delle infrastrutture viarie interessate fanno sì che si creino, specialmente nei giorni festivi e nei mesi dell'estate, situazioni di congestione, che sono affrontabili, ai fini di una loro riduzione di frequenza e di intensità, con soluzioni organizzative di riassetto della circolazione, alcune delle quali proposte nell'ambito dello studio, alle quali debbono essere accompagnate misure legate all'offerta di spazi per la sosta nell'area critica, in modo da restituire al deflusso veicolare l'intera sezione delle arterie coinvolte.

Si tratta, comunque, di interventi non risolutivi del grosso problema che si manifesta nel nodo posto all'ingresso di Castellammare. La carenza infrastrutturale di cui si è detto prima, come causa principale della situazione lamentata, va risolta con un potenziamento della stessa natura, cioè con infrastrutture, che permettano di separare i flussi che hanno destinazione a Castellammare da quelli che invece sono destinate nelle località citate

9 Conclusioni

Il presente lavoro si inquadra nella prosecuzione e arricchimento delle precedenti esperienze e studi effettuati dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Ingegneria dei Trasporti nel campo delle correlazioni tra traffico e inquinamento atmosferico e dal proseguimento della collaborazione, da circa 10 anni con la Professoressa Margaret Bell. In particolare l'evoluzione della ricerca ha seguito un percorso in cui dall'uso di analisi di correlazione e statistiche per individuare i parametri trasportistici e meteorologici più significativi, soprattutto nel contesto della città di Palermo, successivamente sono stati utilizzati semplici modelli di simulazione di traffico per riprodurre quei dati trasportistici non disponibili, ma necessari al miglioramento della comprensione dei fenomeni e delle correlazioni esistenti.

Il presente lavoro ha pertanto rappresentato un successivo passo nella migliore rappresentazione e previsione degli inquinanti attraverso la combinazione di due nuovi strumenti, il VISSIM, un software commerciale utilizzato in ambito scientifico e professionale, capace di calcolare direttamente e con buona accuratezza le emissioni veicolari, oltre che i classici parametri trasportistici, e l'OSPM, un modello di dispersione degli inquinanti in ambiente di tipo "Street canyon".

Inoltre nel presente lavoro attraverso la collaborazione con l'Università di Newcastle (Prof. MC Bell e Dr. F. Galatioto) e con l'AMIA, è stato possibile testare, validare e utilizzare le concentrazioni inquinanti di CO e NO₂, oltre che dati ambientali e di rumore, misurati da due sensori di nuova generazione a basso costo e autonomi, capaci di rilevare in continuo alla risoluzione di 1 minuto, i parametri ambientali suddetti, ideati e sviluppati nell'ambito del progetto di ricerca Nazionale inglese MESSAGE.

E' stato utilizzato nell'ambito urbano della città di Palermo il modello OSPM, e i primi risultati sono abbastanza incoraggianti, dimostrando la capacità di predire le concentrazioni in un arco temporale diurno (dalle 10:15 alle 19:00) anche nei casi di picco, ovviamente tale studio ha evidenziato anche che esistono delle li-

mitazioni e quindi occorreranno ulteriori studi per migliorare la capacità di previsione utilizzando la metodologia qui presentata.

Infine, il caso studio di Castellammare del Golfo ha evidenziato come il micro-simulatore sia uno strumento idoneo per valutare *ex ante* soluzioni organizzative di particolare complessità riguardanti il deflusso veicolare su una rete stradale.

L'intervento proposto rispetto alla situazione attuale permette di aumentare la capacità di smistamento dei veicoli nei vari incroci, diminuire la lunghezza delle code, diminuire i tempi di percorrenza, far mantenere ai veicoli una velocità quasi costante evitando così le brusche accelerazioni o decelerazioni, evitare le condizioni di marcia di tipo "stop and go" che determinano un notevole consumo di carburante ed, infine, come conseguenza di tutto ciò, di abbassare notevolmente le emissioni di quattro principali sostanze inquinanti (CO, CO₂, HC, NO_x) contribuendo, in tal modo, ad ottenere quella mobilità cosiddetta "sostenibile" non solo dal punto di vista trasportistico ma anche ambientale.

10 Bibliografia

- 1 - AIMSUN model description 2003, Appendix V.
- 2 - Barcelo Jaime, “Dynamic Network Simulation With AIMSUN”.
- 3 - Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 Maggio 2008 relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa.
- 4 - Bell MC, Blythe P., Sharif B., Neasham J., Suresh V., Galatioto F., Hill G. et al., 2009, Field deployment of the MESSAGE System for environmental monitoring, Traffic Engineering & Control (TEC), pp. 484-488, December 2009, Vol. 50 n°11
- 5 - Bell M.C, Galatioto F., Hill G., Namdeo A., “Modelling environmental impacts of traffic using a new generation of pervasive sensors”, proceeding 16th ITS World Congress 2009, Stockholm
- 6 - Bell M.C., Galatioto F., “Novel wireless pervasive sensors network to improve the understanding of noise across urban areas”, proceeding EURONOISE 2009, Edinburgh
- 7 - Galatioto, F., 2007, I Sistemi di Trasporto Intelligenti (ITS) come strumento per la gestione, il monitoraggio e la programmazione della circolazione veicolare urbana pubblica e privata. Ph.D. Thesis, Transport Engineering Department.
- 8 - Galatioto, F., Zito, P., Migliore M. 2007. Traffic parameters estimation to predict road side pollutant concentrations using neural networks. Environmental Modeling & Assessment 13 (February), 7–9. doi:10.1007/s10666-007-9129-z.
- 9 - Zito, P., Chen, H., Bell, M.C., 2008. Predicting real-time roadside CO and NO2 concentrations using neural networks. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems 9 (3), 514–522.
- 10 - Bell M.C., Galatioto F., 2006, “Exploring the processes governing roadside pollutant concentrations in an urban street canyon”, proceeding “XIV° Pan-american conference”, Las Palmas de Gran Canaria
- 11 - Blythe, P.T., Bell, M.C., Sharif, B. and Watson, P., 2006, Pervasive Environmental Monitoring using Smartdust: The MESSAGE Project. Proc. IET Seminar on RFID and Electronic Vehicle Identification, Newcastle.
- 12 - Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 Maggio 2008 relativa alla qualità dell’aria ambiente e per un’aria più pulita in Europa.

- 13** -O. Balci, 1998, Verification, Validation and Testing, in: Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications and Practice, Ed. by J. Banks, John Wiley, 1998.
- 14** -Liu, R., 1994. DRACULA Microscopic Traffic Simulation. ITS Working Paper 431, Institute for Transport Studies, University of Leeds.
- 15** -P.G. Gipps, 1981, A behavioral car-following model for computer simulation. Transp. Res. B, Vol. 15, pp 105-111.
- 16** -P.G. Gipps, 1986, A Model for the Structure of Lane-Changing Decisions, Transpn. Res. 20B, pp.403-414.
- 17** -Hunt, P.B. et al., 1981, SCOOT – A Traffic Responsive Method of Coordinating Signals TRRL report LR1014, Crowthorne.
- 18** - P.G. Boulter and I.S.McCrae, 2007, The links between micro-scale traffic, emission and air pollution models, Transport Research Laboratory (TRL), published project report PPR 269
- 19** -M. Mahmod, B. van Arem and TRAIL Research School, 2008, A simulation framework for modelling the impacts of an integrated road-vehicle system on local air quality, Centre for Transport Studies, University of Twente, the Netherlands
- 20** -R. Berkowicz, OSPM a parameterized street pollution model. Environmental Monitoring and Assessment, pp. 145–164, 1999.
- 21** -O. Hertel, R. Berkowicz, Operational Street Pollution Model (OSPM). Evaluation of the model on data from St. Olavs street in Oslo, DMU Luft A-135, 1989c.
- 22** -J. Kukkonen, E. Valkonen, J. Walden, T. Koskentalo, P. Aarnio, A. Karppinen, R. Berkowicz, K. R. Raimo Kartastenpaka, A measurement campaign in a street canyon in Helsinki and comparison of results with predictions of the OSPM model, Atmospheric Environment, 35, 231–243 (2001).
- 23** -Eccleston B.H., Hurn R.W. (1974), Ambient temperature and trip length. Influence on Automobile fuel economy and emissions, SAE Paper n.780613
- 24** -Eccleston B.H., Hurn R.W. (1974), Ambient temperature and vehicle emissions, Report EPA, EPA -460/3-74-028, ottobre 1974, US Environmental Protection Agency, Ann Arbor-MI-NTIS Publication n.247692
- 25** -Eggleston H.S., Glaudioso D., Gorrisen N., Joumard R., Rijkeboer R.C., Sameres Z., Zierock K.H., (1991), CORINAIR Working Group on Emissions Factors for Calculating 1990. Emissions for Road Traffic - Vol. 1: Metodolgy and Emissions Factors-Final Report, dicembre 1991, L.A.T.- EnviCon-CEE

- 26** -Ellis G.W., Camp W.T., Treadway A. (1978), The determination of vehicular cold and hot operating fractions for estimating highway emissions, settembre 1978, US Department of Transportation, Washington D.C.
- 27** -Griffin R.G. (1980), Air quality impact of signaling decision, acdoh-dtp-r-80-12, Ottobre 1980, Colorado Department of Highways
- 28** -Horowitz A.J., Tobin R.L. (1979), The influence of urban trip characteristics on vehicle warm-up-implication for urban automobile fuel consumption, SAE Paper n.790656
- 29** -Horowitz H.L. (1982), Air quality analysis for urban transportation planning, MIT Press, Cambridge Massachussets
- 30** -Jaeger-Voirol A., Pelt P., (2000). PM10 emission inventory in Ile de France for transport and industrial sources: PM10 re-suspension, a key factor for air quality. Environmental Modeling & Software 15, 575-581
- 31** -VISSIM - (manuale)
- 32** -<http://www.amianet.it/>
- 33** -<http://www.indoor.apat.gov.it>
- 34** -<http://www.municipio.re.it>
- 35** -www.arpalombardia.it
- 36** -www.comune.palermo.it
- 37** -www.nonsoloaria.com