



**L'OTTIMIZZAZIONE IN CHIAVE AMBIENTALE  
DELLA MOBILITÀ PER LA VIABILITÀ URBANA  
E PROVINCIALE: IL RUOLO STRATEGICO  
DELLA PIANIFICAZIONE DI RETE**

**Giovanni Leonardi**

Dipartimento di Informatica, Matematica, Elettronica e Trasporti (D.I.M.E.T)

Università di Reggio Calabria – Viale Graziella, Feo di Vito

89100 – Reggio Calabria – Italy

Tel: 0965/875207 - Fax: 0965/875237

E-mail: [leonardi@ing.unirc.it](mailto:leonardi@ing.unirc.it)

# **L'OTTIMIZZAZIONE IN CHIAVE AMBIENTALE DELLA MOBILITÀ PER LA VIABILITÀ URBANA E PROVINCIALE: IL RUOLO STRATEGICO DELLA PIANIFICAZIONE DI RETE**

**GIOVANNI LEONARDI** - Dipartimento di Informatica, Matematica, Elettronica e Trasporti –  
Università di Reggio Calabria

## **SOMMARIO**

Il progressivo deterioramento della qualità della vita negli ambienti antropizzati e, in particolare, nelle nostre città, conseguente all'incremento del carico veicolare sulla rete che si è nel tempo registrato, ha sempre più evidenziato la necessità di progettare opportuni interventi di razionalizzazione e di miglioramento dell'offerta di trasporto, al fine di soddisfare efficacemente la domanda e di conseguire, nel contempo, benefici effetti nell'ecosistema. Tale circostanza è stata ormai da tempo recepita dal Governo italiano negli orientamenti generali di politica dei trasporti ed ha trovato coerenza, a livello legislativo, nei contenuti del Nuovo Codice della Strada e, in particolare, nel suo articolo 36, che già dal 1993 prevede esplicitamente l'obbligatorietà per tutti i comuni con popolazione residente superiore a 30000 abitanti e le province di adottare appositi piani del traffico per la viabilità di propria competenza.

Nel presente studio, sulla base di considerazioni di ordine tecnico, economico ed ambientale, vengono proposti specifici criteri di analisi per l'ottimizzazione del binomio "rete di trasporto-ambiente" e indirizzi operativi cui è possibile riferirsi per la pratica formazione dei P.U.T. e dei P.T.P. Infine, viene affrontata la complessa e vasta problematica dell'economia globale di rete e, mediante un apposito criterio matematico, viene ricercato il legame esistente fra variabili economiche classiche caratterizzanti l'offerta ed altri indicatori strategici di qualità, efficienza e vulnerabilità del sistema viario.

## **ABSTRACT**

The progressive increase of traffic on the road network has highlighted more and more the need to design adequate rationalisation and improvement measures of the transport infrastructures. This in order to efficiently satisfy the demand and, at the same time, to obtain positive effects on the ecosystem. This aspect has been fully accepted by the Italian Government, within the general outline of the transport policy, and has been introduced in the "Nuovo Codice della Strada", in particular, within the Article 36. this article requires that all cities with a population greater than 30000 inhabitants and every province adopt traffic plans.

This article proposes specific criteria of analysis for the optimisation of the binomial "transport network – environment" and practical guidelines which may be followed in the design of Urban Traffic Plans (P.U.T.) and Provincial Traffic Plans (P.T.P.).

## **1. PREMESSA**

Il potenziamento e il miglioramento dei sistemi di trasporto costituisce, senza dubbio alcuno, uno dei momenti fondamentali e qualificanti nello sviluppo di un territorio.

Nei paesi ad economia avanzata, come l'Italia, il ruolo dei trasporti è volto al conseguimento di un opportuno consolidamento degli equilibri socio-economici nel contempo acquisiti, mentre in quelli ancora in via di sviluppo essi rappresentano una componente di supporto primaria e insostituibile per pervenire a condizioni sempre più soddisfacenti sia dal punto di vista economico che in vita sociale.

Occorre, però, rilevare che, pur costituendo un notevole elemento acceleratore delle dinamiche di sviluppo territoriale, i trasporti sono, tuttavia, suscettibili di produrre, al tempo stesso e in varia misura, a seconda delle particolari situazioni ambientali cui ci si riferisce, effetti negativi nell'ecosistema di pertinenza.

Basti, per esempio, osservare come il progressivo incremento della domanda di mobilità delle persone e delle merci che si è registrato in Italia, in assenza di oculate azioni di adeguamento dell'offerta, abbia ormai prodotto un notevole grado di inquinamento (molto spesso oltre le soglie ammissibili) i cui effetti penalizzano fortemente l'intero territorio e le condizioni di vivibilità che in esso si realizzano.

Tele circostanza impone, dunque, la necessità e l'urgenza di adottare opportune strategie pianificatorie sui regimi circolatori nelle reti viarie urbane ed extraurbane e idonei accorgimenti (di tipo infrastrutturale, di razionalizzazione delle esistenti, etc.), per migliorare le condizioni di efficacia, di efficienza e di sicurezza dei sistemi di trasporto su gomma e, nel contempo, per potenziare i servizi di trasporto pubblico collettivo e ridurre entro limiti accettabili gli impatti sulle risorse ecosistemiche, favorendo il più possibile l'opzione intermodale per la movimentazione delle merci.

È necessario, pertanto, che tutte le Amministrazioni locali che hanno governo e gestione di strade predispongano (in conformità a quanto previsto dall'Art. 36 del D.L. 285/92 – Nuovo Codice della Strada), per la viabilità di propria competenza e in accordo con i contenuti del Piano regionale dei trasporti e degli eventuali altri esistenti atti di pianificazione di settore e di area interconnessi, appositi piani di intervento finalizzati all'ottimizzazione della qualità dell'offerta di rete. Tali piani dovranno espressamente indicare, secondo una definita scala di priorità, gli accorgimenti necessari e le opere da eseguire per migliorare efficacemente le condizioni globali del deflusso e rendere minimi gli inquinamenti connessi all'esercizio della rete e ad una sua adeguata gestione (manutenzione programmata), tenendo nel debito conto sia gli aspetti tecnici, che quelli economici e ambientali, onde pervenire ad una compiuta ed organica ottimizzazione del binomio "sistema di trasporto-ambiente"[4][5][8].

## **2. I PIANI DEL TRAFFICO A SCALA TERRITORIALE URBANA E PROVINCIALE, SECONDO IL D.L. 285/92**

Il D.L. 30/4/1992, n.285 (G.U. n.114 del 18/05/92) più noto come "Nuovo Codice della Strada"[6], obbliga, già a far data dal 1993, (Art.36, commi 1 e 2) i Comuni con popolazione residente superiore a 30.000 abitanti e quelli che comunque, registrino anche in specifici periodi dell'anno una particolare affluenza turistica, ovvero risultino interessati da elevati fenomeni di pendolarismo o da rilevanti problemi di tipo ambientale connessi alla congestione della circolazione, i piani urbani del traffico. Ad analoga incombenza sono soggette le province per l'adozione di appositi piani del traffico per la viabilità extraurbana di propria competenza, mentre la legge regionale può prevedere lo stesso adempimento per gli organi della città metropolitana.

Nel succitato disposto legislativo, vengono, poi, esplicitati (comma 4) gli obiettivi-chiave che il P.U.T. deve perseguire (miglioramento delle condizioni di circolazione e della sicurezza stradale, riduzione dell'inquinamento acustico e atmosferico e risparmio

energetico), realizzando il tutto in accordo con gli strumenti urbanistici vigenti e nel rispetto dei valori ambientali.

Sulla base dei principi e degli indirizzi generali contenuti nel predetto art. 36 e in virtù delle indicazioni fornite dal C.I.P.E.T. nella seduta del 7 aprile 1993 (G.U. n. 109 del 12/5/93), per quanto concerne la struttura schematica dei P.U.T. e P.T.P.[7], si può fare tecnicamente riferimento a quanto riportato nel successivo paragrafo.

## **2.1 Strategie ed indirizzi metodologici per l'ottimizzazione della pianificazione di rete**

Gli obiettivi chiave da raggiungere con la progettazione dei piani integrati di intervento per l'ottimizzazione della qualità globale della mobilità nel territorio urbano e provinciale possono essere sinteticamente così rappresentati:

- a) minimizzare il costo generalizzato del trasporto, compreso l'uso di risorse non regolate dai tradizionali meccanismi di mercato (qualità ambientale delle aree antropizzate, etc.) e migliorare gli standards di sicurezza nella rete;
- b) ottimizzare il funzionamento dei nodi di scambio, nell'ambito della rete plurimodale di trasporto, favorendo l'uso dei sistemi di movimentazione di persone e merci più ecologici;
- c) incentivare, proteggere e qualificare gli spostamenti pedonali all'interno delle città per garantire il rispetto dei valori ambientali e potenziare i livelli di servizio del trasporto pubblico collettivo.

Gli strumenti di pianificazione sopra indicati dovranno prevedere appositi interventi che vanno dal breve al medio periodo (P.U.T.), ovvero anche al lungo periodo (P.T.P.). I primi si riferiscono soprattutto ad una diversa destinazione d'uso delle vie, attraverso l'attuazione di mirate azioni di regolamentazione del sistema, mentre gli interventi di più esteso periodo discenderanno principalmente dalle verifiche sulle indicazioni infrastrutturali e localizzate dalle esigenze pertinenti agli insediamenti produttivi, commerciali, residenziali e ai servizi presenti nel PRG, nel piano dei servizi e nel P.P. del centro storico.

In ogni caso, sarà sempre opportuno redigere un adeguato programma dei lavori, con l'uso di tecniche reticolari, per l'attuazione degli interventi più significativi sulla rete di trasporto, onde garantire i migliori risultati, anche per ciò che concerne la minimizzazione degli impatti ambientali correlati alla durata e al modo di svolgimento delle diverse fasi delle attività di cantiere per la costruzione delle opere.

In particolare, il P.U.T. deve progettualmente svilupparsi secondo i tre principali settori di intervento:

- 1 - *centro storico* (circolazione e sosta, zone pedonali, trasporti pubblici, merci, emergenza);
- 2 - *viabilità principale* (breve periodo: assetto circolatorio; medio periodo controllo e regolazione; lungo periodo: progetti infrastrutturali);
- 3 - *trasporti pubblici* (stato attuale dei servizi, modifiche, sotto i profili di efficacia, affidabilità ed efficienza).

Il P.U.T., invece, dovrebbe essere prioritariamente mirato all'ottimizzazione delle seguenti componenti di sistema:

- a) *viabilità provinciale* (progetti di adeguamento dell'offerta alla domanda e programma di interventi da prevedere sulla rete, perseguimento dell'opzione intermodale, etc.);

- b) *viabilità agricola* nel territorio di pertinenza (miglioramento delle caratteristiche di accessibilità, etc.);
- c) *trasporti pubblici* (stato attuale dei servizi, modifiche sotto i profili di efficacia, affidabilità ed efficienza).

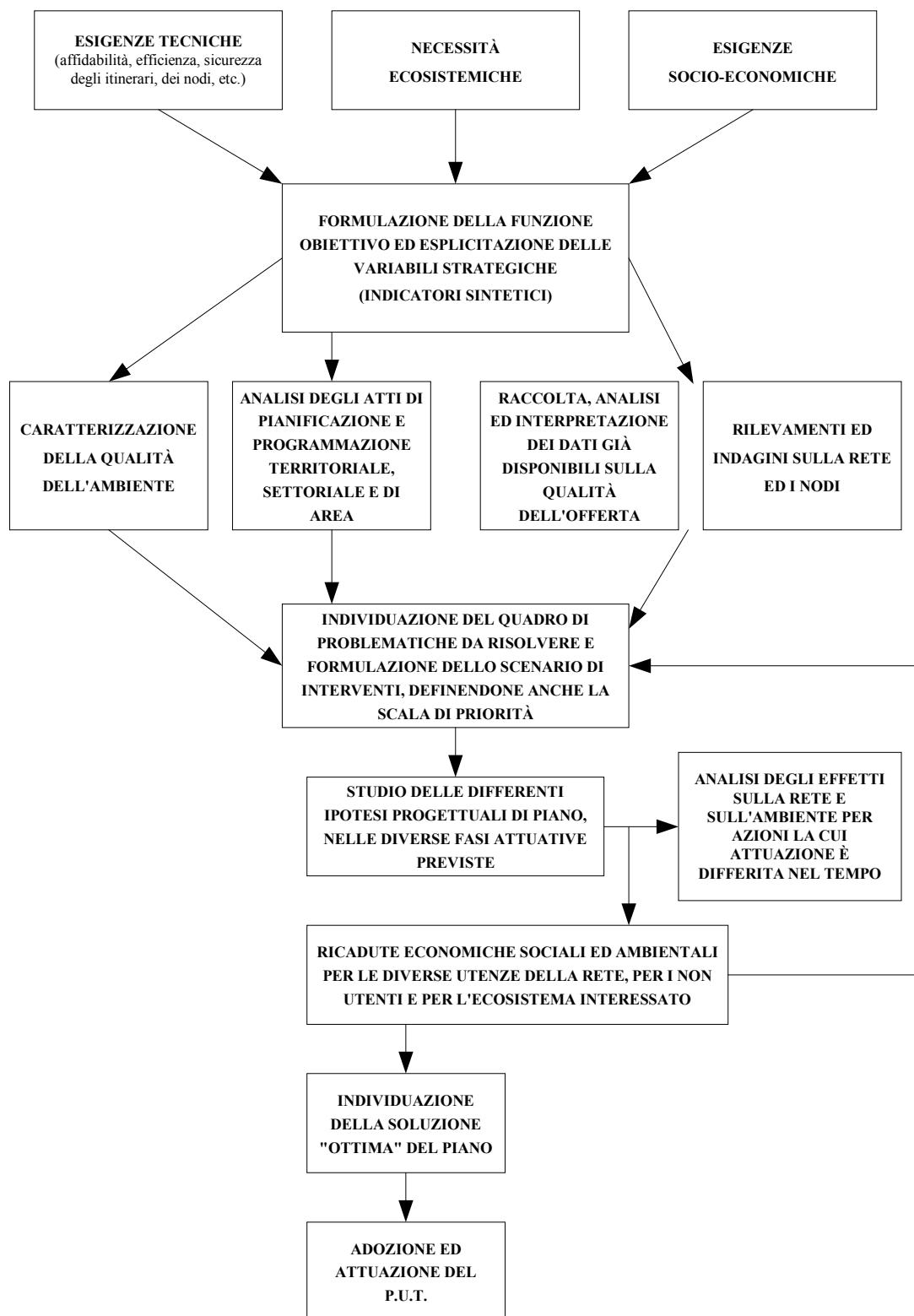
La nuova configurazione del binomio “sistema dei trasporti-ambiente” che con l’attuazione degli interventi previsti verrà a configurarsi, dovrà essere, comunque, a monte, tecnicamente approfondita in modo opportuno, con particolare riferimento agli effetti che verranno prodotti, nel sito e nell’area vasta di pertinenza delle azioni proposte, sulle seguenti classi di soggetti a diverso titolo interessati:

- a) *utenti (passeggeri e merci):*
  - variazione del tempo di percorrenza, costi, tariffe, pedaggi per parcheggio, etc.;
- b) *operatori pubblici:*
  - risorse per realizzazione di interventi di vario tipo e per la gestione dell’esercizio del sistema;
  - ricavi dalla vendita dei servizi;
- c) *non utenti:*
  - impatti economici (valori di immobili, ricollocazione di attività, etc.)
  - impatti sociali (variazione di accessibilità alle attività sociali, etc.)
  - ambientali (modificazioni di standards di inquinamento acustico ed atmosferico, intrusione visiva, etc.).

In virtù di quanto precede, dal punto di vista operativo, le fasi logiche in cui dovrà articolarsi lo studio di ottimizzazione della qualità dell’offerta di rete dovranno essere così caratterizzate:

- analisi dello scenario relativo all’opzione zero (non intervento) e formulazione del quadro di azioni coordinate sulla rete;
- studio delle alternative, sulla base di parametri di ordine tecnico, economico ed ambientale e definizione delle sequenze temporali di attuazione degli interventi;
- valutazione degli effetti indotti sul sistema viario della eventuale realizzazione differita delle previste opzioni di intervento;
- analisi delle interazioni delle scelte di piano con gli altri strumenti di programmazione territoriale quali il PRG, il PIP del centro storico, il Piano dei servizi, i piani dei trasporti di bacino regionale, etc;
- formulazione matematica del sistema domanda/offerta;
- simulazione quantitativa e/o quali-quantitativa (per eventuali problemi connessi all’analisi delle “esternalità”) degli effetti globalmente prodotti dalle alternative di piano, tenendo conto delle diverse fasi di attuazione degli interventi (le informazioni e dati ottenuti a valle delle simulazioni potranno essere anche utilmente organizzati in indicatori sintetici (variabili strategiche);
- individuazione delle scelte “ottime” di piano e programmazione degli interventi sulla rete, con l’uso delle tecniche reticolari.

Nella figura - 1 è rappresentato lo schema di formazione e attuazione del piano di interventi di ottimizzazione della qualità della rete.



**Figura 1 – Fasi logiche per la scelta della soluzione “ottima” degli interventi di pianificazione sulla rete**

Infine, occorre evidenziare che uno degli obiettivi fondamentali che, con mirate scelte progettuali, attraverso l'elaborazione di un P.U.T o di un P.T.P. si deve prioritariamente perseguire è quello del miglioramento complessivo della qualità della vita nell'ambito territoriale direttamente o indirettamente interessato.

Occorre, in effetti, evidenziare come pervenire ad una sostanziale riduzione dell'inquinamento acustico e atmosferico e al contenimento entro livelli accettabili degli altri impatti ambientali prodotti ante-operam dall'esercizio del sistema dei trasporti, significhi ottimizzare anche dal punto di vista economico i risultati globali dell'attuazione del piano. Fra interessi economici e salvaguardia ambientale vi è, infatti, generalmente perfetta rispondenza.

Se è vero che esercitare una soddisfacente tutela delle nostre preziose risorse naturali (come, per esempio, l'aria) comporta, nella maggioranza dei casi, oneri iniziali non indifferenti per concretizzare mirati interventi, è, tuttavia, da rilevare come non proteggere adeguatamente l'ecosistema in cui l'uomo vive, significhi sopportare costi sociali nettamente superiori.

Individuando compiutamente, nel processo di formazione opportune azioni di gestione e di razionalizzazione del funzionamento del sistema dei trasporti (ad esempio, nel caso del PUT, impianti semaforici possibilmente sincronizzati in itinerari, disciplina dell'occupazione di tutti gli spazi stradali, strumenti di segnaletica e pannelli informativi per consentire all'utenza di scegliere/indirizzare i propri spostamenti nella rete, etc.) e prevedendo adeguate opere infrastrutturali (creazione di idonei nodi di scambio per realizzare un efficace integrazione intermodale del trasporto e/o intramodale fra trasporto di tipo individuale e collettivo, predisposizione di una rete di parcheggi, etc.), è possibile sempre pervenire a un sostanziale miglioramento delle caratteristiche di sicurezza, affidabilità ed efficienza del sistema.

Se, poi, le scelte effettuate sono tali da produrre, nel contempo, benefici effetti rispetto alle condizioni ambientali relative *all'opzione zero* (non adozione del piano), si otterrà anche la minimizzazione dei costi globali generalizzati del trasporto (quantificabili monetariamente e non) che gravano sui singoli e sull'intera collettività. Al fine di ottimizzare i risultati complessivi del piano, occorrerà, però, scegliere, fra le possibili alternative, quella che rende massimi *i flussi di utilità* connessi alle diverse azioni sul sistema.

Per ciò che concerne l'ottenimento del miglioramento degli standards dei valori ambientali nel territorio di pertinenza, per valutare l'efficacia delle strategie pianificatorie sulla rete, è sempre consigliabile riferirsi a uno studio modellistico dei fenomeni.

Attivate adeguate metodologie di analisi della domanda di spostamento per differenti componenti di traffico (studio della mobilità delle persone su veicoli individuali e su quelli collettivi di linea, analisi del trasporto delle merci, etc.) è possibile, mediante opportuni modelli di assegnazione, conoscere preventivamente, per ogni alternativa di intervento finalizzata all'adeguamento dell'offerta, il carico su ciascun tronco della rete.

Determinati, così, nei diversi rami, le caratteristiche del deflusso (numero di veicoli leggeri e pesanti nell'unità di tempo e velocità media della corrente), in relazione alle peculiarità fisiografiche dei siti, è, quindi, agevole individuare, per mezzo di idonei modelli previsionali di inquinamento acustico e atmosferico, quelle soluzioni che conducono al desiderato miglioramento delle condizioni di esercizio della rete, garantendo il pieno rispetto della qualità della vita nel territorio interessato.

Occorrerà infine prevedere, ove opportuno, per conseguire l'obiettivo dell'ottimizzazione della configurazione ambientale in esercizio, anche l'utilizzo di adeguate reti di monitoraggio per l'analisi dinamica del livello di rischio.

### 3. UN APPROCCIO METODOLOGICO PER L'ANALISI SISTEMICA FRA CARATTERISTICHE DI ECONOMICITÀ ED EFFICIENZA GLOBALE DELLA RETE STRADALE

Per ottimizzare le attività d'esercizio del sistema della mobilità su gomma, sia dal punto di vista economico, sia sotto il profilo dell'efficacia che della *qualità globale*, occorre valutare opportunamente i parametri caratteristici della configurazione dell'offerta e della domanda, tenendo contestualmente conto del rispetto di adeguati standards ambientali del territorio e dell'area vasta interessati.

Bisogna, cioè, porre in essere adeguate strategie di analisi di specifiche variabili strategiche tipicizzanti la configurazione del trasporto delle merci e delle persone e, per tale ultima tipologia di spostamento, occorrerà effettuare un apposito screening del funzionamento sia del trasporto locale pubblico che di quello individuale privato.

In ambito urbano occorrerà, poi, favorire gli spostamenti su mezzi collettivi e porre in essere, nell'ottica di rete, opzioni atte a contenere il più possibile gli impatti sull'ecosistema ed operare in modo che ciascun servizio venga erogato in condizioni di efficienza e minimizzando i costi (tecnologici, dovuti alla forza-lavoro impiegata, per il parco veicolare, etc.) ed assicurando, però, allo stesso specifiche caratteristiche quali-quantitative che consentano di soddisfare con accuratezza le effettive necessità dell'utenza (regolarità e frequenza del servizio, comfort, etc.).

Per "efficienza" di un servizio, o di un sistema di servizi, deve intendersi, dunque, l'attitudine a garantire un adeguato livello di offerta di trasporto, in rapporto alle risorse di qualsivoglia entità e natura complessivamente impegnate.

Per il trasporto pubblico gli indicatori di efficienza sono espressi per lo più attraverso indici di costo unitario o di energia impiegata per veicolo·Km prodotto o per passeggero·Km trasportato, ovvero attraverso misure di redditività del servizio.

Altri indici di efficienza che interessano più direttamente l'utente del trasporto pubblico sono, ad esempio, la frequenza del servizio, ottenuta mediante il rapporto tra il numero di posti disponibili ed il numero di passeggeri trasportati, la regolarità, espressa dal numero di corse in orario sul numero totale delle corse esercitate, etc. Esistono, infine, altri parametri che caratterizzano in modo significativo l'affidabilità e l'efficienza del sistema nel suo complesso. I primi fanno riferimento alla sicurezza dello spostamento fra la prefissata origine e la prescelta destinazione e sono quasi sempre espressi da misure di incidentalità, quali, per esempio il numero di incidenti verificatisi lungo un itinerario, rapportato al numero di veicoli·Km percorsi od al numero di passeggeri trasportati. I secondi, invece, sono generalmente riferiti alla rete monomodale di trasporto interessata e, considerando l'obiettivo dell'utilizzabilità del sistema di pertinenza e della flessibilità del servizio, è possibile fare ricorso a specifici indicatori che esprimono la particolare *connessione della rete* ove viene svolto il servizio di trasporto analizzato.

Nel caso di trasporto urbano, ad esempio, si può fare riferimento *alla disponibilità di circuiti* nella rete stradale, calcolando il valore assunto dalla variabile  $\alpha$  così definita:

$$\alpha = \frac{r-n+1}{2 \cdot n-5} \quad (1)$$

dove:



$\alpha$  = numero dei circuiti disponibili (compreso tra 0 e 1);  
 $r$  = numero dei rami della rete viaria;  
 $n$  = numero dei nodi della rete;

Una rete è connessa quando tutti i nodi sono connessi tra loro (per una rete planare connessa il numero massimo di circuiti è  $2n-5$ , mentre il numero effettivo di circuiti presenti in una rete reale è dato dall'espressione  $r-n+1$ ).

Il rapporto  $\alpha$  può variare da zero ad uno, maggiore è questo indice, maggiore è il numero di circuiti disponibili.

Un secondo indice di utilizzabilità della rete e di flessibilità del servizio può essere basato sul numero dei rami del grafo in cui la rete può essere schematizzata.

In una rete planare connessa con  $n$  nodi, si può avere un numero massimo di rami pari a  $3(n-2)$ , che è quello che corrisponde al massimo numero di circuiti; pertanto l'indice di connettività  $\beta$  è dato dal rapporto fra il numero di rami esistenti ed il massimo numero di rami possibili sulla rete, ovvero:

$$\beta = \frac{r}{3 \cdot (n - 2)} \quad (2)$$

più grande è il numero dei rami esistenti, più interconnessi risultano i nodi del grafo; l'indice di connettività  $\beta$  della rete può variare da  $1/3$  ad 1.

I due indici  $\alpha$  e  $\beta$  risultano, ovviamente, tra loro correlati: quando aumenta  $\alpha$  aumenta  $\beta$  e viceversa.

Sia l'indice  $\alpha$  della disponibilità di circuiti nella rete che l'indice  $\beta$  della disponibilità dei rami di interconnessione tra i nodi rappresentano misure di efficienza sotto il profilo della utilizzabilità del sistema e della flessibilità del servizio di trasporto.

Ovviamente, tanto maggiore è la connessione della rete, tanto più è facilitato il cambiamento di destinazione o di itinerario; ciò acquista grande rilevanza in presenza, ad esempio, di eventi particolari che possono mettere in crisi alcuni rami ed ove sono richieste elevate capacità di trasporto concentrate su poche relazioni "origine-destinazione" e, ciò, perché la interconnessione della rete consente, allorché alcuni rami sono in condizioni critiche sotto il profilo strutturale o funzionale, la continuazione del viaggio seguendo altri rami o nodi alternativi, garantendo in ogni caso lo svolgersi dell'attività di spostamento prefigurata.

In generale, sia per l'utenza collettiva, sia per quella individuale, si può schematizzare matematicamente il problema dell'affidabilità e dell'efficienza della rete, facendo riferimento a due classi di variabili caratteristiche: la *domanda di spostamento*  $D$  e la *capacità di resistenza offerta*  $R$  e le *condizioni di affidabilità del sistema* saranno verificate se risulta  $R > D$  e, quindi,  $M = R - D > 0$  (margine di sicurezza) e  $\Phi = R/D > 1$  (fattore di sicurezza).

Note le funzioni di probabilità delle variabili aleatorie  $R$  e  $D$ , la probabilità che venga raggiunto lo stato limite di vulnerabilità è espresso dalla somma integrale delle probabilità che il fattore di sicurezza  $\Phi$  sia compreso nell'intervallo  $[0,1]$ :

$$P_r = \int_0^1 f_\Phi(\Phi) d\Phi \quad (3)$$

dove  $f_\Phi$  è la funzione di densità della probabilità della variabile  $\Phi$ , mentre la corrispondente affidabilità è misurata dall'espressione:

$$P_a = 1 - P_r \quad (4)$$

Sulla base di quanto precede, emerge chiaramente come le condizioni di *efficienza della rete* e di *economicità dell'esercizio* sono strutturalmente legate alle caratteristiche

di affidabilità e di vulnerabilità dei singoli itinerari. Infatti, anche il costo globale di produzione del trasporto  $C_p^G$  sia su mezzo individuale che collettivo, risentirà delle particolari condizioni di funzionamento della rete di trasporto, per il notevole "peso" esercitato da tali *fattori di sistema* (esterni all'efficienza di Impresa per le Aziende di trasporto ed allo specifico mezzo utilizzato dai singoli utenti) sulle variabili fondamentali classiche "tempo dello spostamento" (ovvero, velocità commerciale) e "consumo di carburante".

Per gli spostamenti su mezzo pubblico, se con  $c_i^t$  si indica il costo convenzionale unitario del tempo di spostamento per l'i-esimo utente (per tale variabile si può, per facilitare il calcolo, assumere anche un valore prossimo a un quarto del reddito orario dell'utente) e con  $r_{ii}$  il consumo di tempo che si è registrato, l'onere economico del tempo di trasporto può essere valutato mediante la seguente espressione[9]:

$$C_t = \sum_i c_{ii} r_{ii} \quad (5)$$

se, invece, lo spostamento viene effettuato su mezzo individuale privato, il costo complessivo del trasporto per percorrere il generico arco  $h \wedge k$  della rete potrà essere ricavato per mezzo della (6) appresso riportata:

$$C_{hk} = \sum_i r_{i,hk}(q_{hk}, Q_{hk}) c_{i,hk} \quad (6)$$

ove il termine  $c_{i,hk}$  indica il valore unitario sociale della i-esima risorsa (tra cui il tempo), mentre  $r_{i,hk}(q_{hk}, Q_{hk})$  rappresenta il consumo delle risorse impiegate (carburante, usura di pneumatici, consumo di lubrificante, tempo di percorrenza, etc.) per ogni utente che in un ben preciso periodo, in presenza di un certo flusso di veicoli leggeri  $q_{ik}$  e di mezzi pesanti  $Q_{ik}$ , compie quel prefissato tragitto.

Tale consumo sarà, ovviamente, dipendente dal tipo di marcia e dalla velocità con cui l'automobilista percorre il tracciato e, per assegnata tipologia di strada, sarà anche funzione della relativa caratteristica di deflusso.

Per calcolare il tempo di percorrenza T del generico veicolo censito, si può utilmente fare riferimento q quanto suggerito dalla normativa francese, recepita dalle norme tecniche C.N.R. (bollettino Ufficiale, A. XVII, n.91, 1983). In base alla predetta normativa si ha:

$$T = \frac{3600}{[a + bl^2 + dl^3][1 - \delta(p - 0,025)]} + \alpha(q + eQ) + \beta(q + eQ)^3 \quad [s/Km] \quad (7)$$

in essa, le variabili q e Q assumono il significato già noto, mentre gli altri simboli rappresentano:

$l$  la percentuale di visibilità per il sorpasso;

$p$  la pendenza fittizia, pari a  $\sum |h|/L$ , dove  $\sum |h|$  è la somma di tutti i dislivelli, considerati in valore assoluto, e L è la lunghezza complessiva dell'arco  $\overline{hk}$ ;

$\delta$  un parametro che assume un valore nullo per pendenze  $p \leq 0.025$  e valore unitario per  $p > 0.025$ .

Gli altri coefficienti che compaiono nella (7) risultano, infine, variabili con il tipo di strada presa in esame, secondo quanto indicato in apposite tabelle riportate nel predetto Bollettino C.N.R. per la determinazione della redditività degli investimenti stradali.

Inoltre, alla formazione del costo globale di produzione del trasporto  $C_p^G$ , sopra definito, nel caso di Azienda esercente trasporto collettivo, concorrono i cosiddetti *oneri impropri*  $C_k$ , connessi agli obiettivi pubblici assegnati al particolare servizio offerto.

Pertanto, il costo  $C_p^G$  risulta determinato dalla somma di una serie di variabili econometriche  $C_p^i$  ( $j=1, \dots, q$ ), secondo la formula generale:

$$C_p^G = \sum_{i=1}^q c_p^i \quad (8)$$

la (8), in virtù delle (1), (2), (3), indicando con  $c_p^S$  i costi di esercizio dovuti alle specifiche condizioni di inefficienza del sistema per le caratteristiche di connettività della rete, della disponibilità in essa di circuiti alternativi per il trasporto e della vulnerabilità degli itinerari, con  $c_p^I$  i costi imputabili a fattori tipizzanti la modalità dello spostamento considerata (per un'impresa di trasporto, in particolare, gli oneri  $c_p^I$  sono ricavabili per mezzo dello studio della funzione di costo  $c_p^I = f(l, k, e, q, i)$ , ove "l" e "k" sono fattori rappresentativi del lavoro e del capitale, "e" dell'efficienza complessiva del servizio (tecnologico e gestionale), "q" del livello qualitativo dell'offerta e, infine, "i" di altri fattori produttivi caratteristici della specifica Azienda di trasporto esaminata.), con  $c_p^A$  i flussi delle diseconomie ambientali globalmente generati a causa dell'effettuazione dello spostamento considerato (nel sito e nell'area vasta), e, infine, con  $c_p^F$  gli oneri prodotti da tale spostamento, in conseguenza delle variazioni del costo generalizzato del trasporto che si determinano su ciascun ramo della rete, può scriversi:

$$C_p^G \equiv \left\| c_{ij} \right\|, \quad i = 1, \dots, q; j = 1, \dots, r,$$

con  $q = S+I+A+F$  e  $r =$  numero dei rami.

La matrice, così individuata, consente una agevole rappresentazione matematica, con metodi propri dell'analisi vettoriale, del complesso problema dell'economia globale di rete ed è la base di partenza per l'analisi del sistema costo-rami e delle possibili relative affinità costo  $h -$  costo  $k$ , costo  $h -$  ramo  $j$ .

In particolare è necessario, per risolvere lo specifico problema, individuare un'espressione matematica atta a valutare il minor numero possibile di autovalori necessario per ottimizzare adeguatamente le attività d'esercizio della mobilità su gomma nell'area interessata.

Si ritiene che tale aspetto possa essere affrontato riferendosi al classico modello della "barra spezzata"[1][2][3]:

$$l_k = \frac{1}{m} \sum_{i=k}^m \frac{1}{i} \quad (9)$$

dove  $l_k$  è la lunghezza più probabile del k-esimo elemento fra gli  $m$  complessivi in cui la barra, di lunghezza unitaria, è stata divisa.

Attraverso la (8), in virtù della natura casuale dei valori assunti dagli autovalori  $\lambda$  della matrice  $K$  di correlazione[10] degli  $m$  complessivi indicatori di costo individuati, il valore più probabile del k-esimo autovalore è dato dalla sommatoria:

$$\lambda_k = \sum_{i=k}^m \frac{1}{i} \quad (10)$$

e, considerando ammissibile riferirsi, nei problemi di ottimizzazione, ad una varianza cumulata (ricordiamo che la varianza relativa al generico  $i$ -esimo autovalore è:  $V_i = \frac{\lambda_i}{m}$  mentre, la varianza cumulata  $\bar{V}_k$ , fino al  $k$ -esimo valore, è data dalla sommatoria:  $\bar{V}_k = \sum_{i=1}^k V_i = \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{m}$ ) pari al 90% (con conseguente minimizzazione della perdita di informazioni compatibile) si perviene all'espressione generale:

$$s = 0.9 \overline{\left[ 1 + \sum_{i=s+1}^m \frac{1}{i} \right]} \quad (11)$$

ove:

- $\bar{V}_s$  (%) è la varianza cumulata dei primi  $s$  autovalori proposta per rappresentare il problema senza una conseguente apprezzabile perdita di informazioni (per esempio il 90%);
- $m$  è il numero complessivo degli indicatori di costo valutati;
- $s$  è il numero di autovalori relativi alla varianza cumulata scelta.

La relazione (9) permette di ricavare facilmente, una volta fissato il valore di  $\bar{V}_s$  (%), il numero strettamente necessario di autovalori  $s$  per pervenire a una più agevole rappresentazione nello spazio vettoriale, mediante un apposito ellissoide di riferimento[11], degli indicatori caratterizzanti l'offerta (le variabili di costo sopra esplicitate).

L'ingegnere stradale potrà, così, operare secondo il seguente schema di lavoro, necessario per conseguire l'obiettivo prefisso dell'analisi sistemica fra caratteristiche di economicità ed efficienza globale della rete stradale.

## INDIVIDUAZIONE DEI RAMI $hk$ COSTITUENTI LA RETE DI TRASPORTO IN ESAME

### DETERMINAZIONE DEL COSTO GLOBALE DI PRODUZIONE DEL TRASPORTO SU CIASCUN ARCO DELLA RETE: $C_p^G = \|c_{ij}\|$

$C_p^S$ : Costi di esercizio dovuti alle specifiche condizioni di inefficienza del sistema.

Disponibilità di circuiti  $\alpha$ :

$$\alpha \in [0,1]; \alpha = \frac{r-n+1}{2 \cdot n-5}$$

Indice di connettività  $\beta$ :

$$\beta \in [1/3,1]; \beta = \frac{r}{3 \cdot (n-2)}$$

Stato di affidabilità:

$$P_a = 1 - P_r;$$

$$P_r = \int_0^1 f_\Phi(\Phi) d\Phi$$

$C_p^I$ : Costi imputabili a fattori tipizzanti la modalità dello spostamento considerata.

$$c_p^I = f(l, k, e, q, i)$$

$C_p^A$ : Flussi delle diseconomie ambientali globalmente generati (nel sito e nell'area vasta)

$C_p^F$ : Oneri prodotti in conseguenza delle variazioni del costo generalizzato del trasporto.

Mezzo Pubblico:

$$C_t = \sum_i c_{ti} r_{ti}$$

Mezzo Privato:

$$C_{hk} = \sum_i r_{i,hk} (q_{hk} \cdot Q_{hk}) c_i$$

### DETERMINAZIONE DELLA MATRICE DI CORRELAZIONE $K$ E DEI RELATIVI

AUTOVALORI, RADICI DELL'EQUAZIONE:  $\det(K - \lambda I_m) = 0$

Determinazione degli assi dell'ellissoide di riferimento di equazione[11]:

$$\frac{x_1^2}{\lambda_1} + \dots + \frac{x_m^2}{\lambda_m} = 1$$

Individuazione di un valore  $\bar{V}$  di varianza cumulata (per esempio il 90%):

$$\bar{V}_k = \sum_{i=1}^k V_i = \sum_{i=1}^k \frac{\lambda_i}{m}$$

Individuazione del valore  $s$  ( $\bar{V}_k = 0$ ):

$$s = 0.9 \left[ \frac{m}{1 + \sum_{i=s+1}^m \frac{1}{\lambda_i}} \right]$$

### CALCOLO DELLE RELATIVE AFFINITÀ:

Costo  $h$  – Costo  $k$ :

il grado di affinità tra due generici indicatori di costo può essere stimato geometricamente analizzandone le reciproche posizioni rispetto agli assi dell'ellissoide;

Costo  $h$  – Ramo  $j$ :

l'importanza della  $h$ -esima variabile di costo per la caratterizzazione economica del  $j$ -esimo ramo delle rete analizzata è valutabile attraverso l'agevole misura della distanza dei rispettivi vettori - posizione nello spazio multidimensionale di riferimento  $\mathfrak{R}^m$ .

#### 4. CONCLUSIONI

La necessità per le Amministrazioni che hanno governo e gestione di strade di dotarsi di idonei strumenti per la pianificazione degli interventi di razionalizzazione e di miglioramento dell'offerta di trasporto, è diventata un'esigenza improrogabile e continua. È, a tal fine, opportuna la predisposizione di appositi piani (PUT e PTP) in conformità con quanto previsto dall'art. 36 del Nuovo Codice della Strada, al fine di conseguire una ottimizzazione sistemica del binomio domanda – offerta (miglioramento delle condizioni ambientali e di vivibilità per l'intero territorio interessato e contemporanea minimizzazione del costo generalizzato del trasporto per gli utenti della rete viaria interessata).

In particolare, per migliorare la correlazione “rete di trasporto – ambiente”, l'ingegnere stradale dovrà effettuare un preliminare studio delle caratteristiche ecosistemiche ante-operam del sito e dell'area vasta interessata dalle azioni del piano e verificare a monte, mediante adeguati modelli matematici, gli incrementi e i decrementi di impatto che queste comporteranno nel breve, medio e lungo termine.

Tale tipo di studio necessita di un'approfondita analisi sistemica atta ad individuare ed esplicitare le relazioni esistenti tra variabili economiche classiche caratterizzanti l'offerta e gli altri indicatori sintetici rappresentativi delle qualità, dell'efficienza e vulnerabilità della rete.

Si è, quindi, voluto ricercare un adeguato criterio matematico, su base statistica, per ridurre il numero di variabili indispensabili per un'agevole e dinamica analisi e descrizione delle informazioni economico-ambientali originarie; tale strumento analitico consente, infatti, di valutare opportunamente, anche attraverso una rappresentazione geometrica nello spazio  $\mathfrak{R}^m$  di riferimento, gli effetti di ogni azione programmata, in modo da pervenire, fin nella fase di progettazione dei piani del traffico, a soluzioni ottimali per l'efficienza globale della rete di trasporto, anche per gli aspetti della gestione dell'esercizio.

#### 5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kendall M.G. – “*The advanced theory of statistics - 1*” – London, Charles Geiffin and Co., 1943;
- [2] Kendall M.G. – “*The advanced theory of statistics - 2*” – London, Charles Geiffin and Co., 1946;
- [3] Legendre L. and Legendre P. – “*Numerical Ecology*” – Amsterdam, Elsevier, 1983;
- [4] Tesoriere G., Lo Bosco D. – “*I problemi connessi con l'inserimento di un'opera stradale nell'ambiente*” – Autostrade, n.9, settembre 1987;
- [5] Lo Bosco D., Marino S. – “*La strada come elemento dell'ambiente. Aspetti tecnici ed economici della problematica*” – Selezione Tecnica, n.12, dicembre 1988;
- [6] G.U. della Repubblica Italiana – “*Nuovo codice della strada*” – n.114 del 18/05/92, Suppl. ord., Art. 36: Piani urbani del traffico e piani del traffico per la viabilità extraurbana;
- [7] Podestà C. e Coll. – “*I piani urbani del traffico*” – 48 Conferenza del Traffico e della Circolazione, Stresa, Ottobre 1992;

- [8] Lo Bianco A., Lo Bosco D., Sortino M. – “*La progettazione stradale e vincoli ambientali. Un criterio di verifica delle scelte adottate*” – Le Strade, n.1281, gennaio 1992;
- [9] Di Mino G., Lo Bosco D. – “*La progettazione integrata delle infrastrutture viarie*” – Le Strade, n.1295, luglio/agosto 1993;
- [10] Stoka M. – “*Calcolo delle probabilità e statistica*” – Ed. CEDAM, 1994
- [11] Lo Bosco D. - “*Studio del binomio Strada-Ambiente*” - Autostrade gennaio - marzo 1995;