

*The Evaluation on Mobility Investments:
a Mathematical Model as Support for Decision Making*

LA VALUTAZIONE DEGLI INVESTIMENTI PER LA MOBILITÀ: UN MODELLO MATEMATICO DI AIUTO ALLA DECISIONE*

Sabrina Lo Bosco^a, Federica Suraci^b, Tommaso Verdini

^aUniversità telematica UniPegaso, Centro Direzionale, Isola F2, 80143 - Napoli, Italia

^bDipartimento DICEAM, Università Mediterranea di Reggio Calabria, Via Graziella, Località Feo di Vito, 89122 - Reggio Calabria, Italia
sabrina.lobosco@maruf.it; federica.suraci@unirc.it; tomverdini@gmail.com

Abstract

The Italian mobility system is characterized by obsolete, inefficient, often unsafe infrastructural networks and by long and complex processes in public administrations, as well as by procurement legal disputes that discourage private investments: these multiple factors hinder the socio-economic development and the national GDP growth. In the EU report “*Transport in the European Union*” of March 2019, Italy is below the European average, both in terms of the services quality and the reliability of the transport network, with over 80% car trips. Logistics, local public transport and related *modal integrations* (train-bus-bicycle, etc.), and tariffs are fundamental elements for “*sustainable development*”. Considering the strategic importance and the problem relevance, in this paper, the variables characterizing the quadrinomial “*infrastructural network-mobility service-economy-environment*” are analysed in order to develop a mathematical model to support the decision-making process for transport investments. The proposed algorithm allows to evaluate the right choice among not indifferent alternatives which respect technical, economic and ecosystemic constraints. Thanks to this model, the project manager is able to evaluate and choose the best alternative for improving the “*territory-mobility*” system into a global configuration which considers the overall impact (all effects) of the investment, taking into account every possible scenario. The model is based on the elements of function theory and *linear and relational algebra*: through pre-established “*input*” parameters, a decision-making strategy is set up to achieve pre-established strategic objectives, with “*excellent*” *decision trajectories* which maximize the global utilities of the project or of the action program.

KEY WORDS: *Public Investments, Transport Infrastructures, Mobility System, Local Public Transport, Modal Integration, Sustainability, Environment, Mathematical Models.*

1. Mobilità sostenibile e sviluppo socio-economico del territorio

I trasporti costituiscono da sempre un motore per lo sviluppo dell'economia e per il miglioramento delle caratteristiche di competitività ed efficienza del “sistema Paese”: l'ottimizzazione della rete infrastrutturale e dei nodi, l'integrazione modale e tariffaria e, più in generale, il miglioramento dei servizi di mobilità di persone e merci contribuiscono all'incremento del PIL e rappresentano

un volano anche per l'occupazione.

Nell'ultimo decennio, in Europa e negli Stati membri, si è manifestato un sempre crescente interesse sia da parte dei decisori pubblici, che dei Project Managers, per la determinazione *ex ante* dei costi e dei benefici complessivi di ogni azione pianificata sul sistema dei trasporti (terrestre, marittimo ed aereo), onde valutare previamente gli *effetti globali* generati (positivi e negativi, monetari e non monetari, intenzionali e non intenzionali) comunque connessi ad ogni investimento. Inoltre, in ambito interno ed

* Il documento nella sua interezza è frutto del lavoro congiunto dei tre autori
LaborEst n. 19/2019. doi: 10.19254/LaborEst.19.08

internazionale, nelle scelte decisionali pubbliche particolare valore è stato sempre più attribuito al rapporto "opera-ambiente", al fine di assicurare la più adeguata tutela dei beni a valenza ecologica e della qualità della vita negli ambiti territoriali interessati, per minimizzare anche i cosiddetti "costi esterni" dell'investimento [1].

I beni ambientali, appartengono infatti alla categoria dei "beni pubblici" ed assumono per la collettività un rilievo particolare: essi sono caratterizzati dal fatto che il loro consumo da parte di un consumatore non è "conflittuale" con quello di altri (beni a consumo collettivo), in quanto possono essere goduti contemporaneamente da soggetti diversi, secondo tre caratteristiche-chiave che tali beni presentano:

- non risulta possibile impedire da parte degli utilizzatori la fruizione ad altri "consumatori";
- l'utilità conseguita da ogni fruitore risulta indipendente da quella degli altri;
- il beneficio del consumatore non varia in relazione del numero dei soggetti utilizzatori.

La "non escludibilità" dell'utilizzo del godimento del bene da parte dei cittadini-utenti, peraltro, rafforza l'interesse pubblico alla tutela non solo dal punto di vista giuridico, ma anche per il valore intrinseco economico, caratterizzandosi sia come non escludibilità tecnica (fruizione di un paesaggio, di una spiaggia, ecc.), che economica (es. accessibilità ad un centro storico).

Dunque, l'analisi ex ante degli effetti socio-economici ed ambientali della programmazione degli investimenti assume un ruolo strategico per garantire lo sviluppo armonico del territorio e delle città: i progetti infrastrutturali vanno concepiti in un'ottica complessiva di "sistema di opere integrate" da pianificare per raggiungere lo scopo della massima utilità sociale e l'ottimizzazione dell'allocatione delle risorse pubbliche [2,3].

Anche le aziende che operano nei servizi di pubblica utilità, come l'acqua, l'energia, i trasporti, etc., a prescindere dalla natura del capitale sociale (pubblico e/o privato), devono tenere conto, nelle loro valutazioni di investimento, pure dei preminenti obiettivi di natura sociale ed ambientale, creando il giusto equilibrio fra redditività economica e risultati di natura ambientale o sociale previsti dalle politiche di sviluppo definite dallo Stato e dagli enti locali¹, con cui intercorre un rapporto giuridico di natura contrattuale, funzionale all'espletamento dei predetti servizi collettivi.

In tale ottica, il trasporto pubblico locale (TPL) svolge un ruolo cruciale per l'economia del Paese e favorisce la fruibilità dei territori, visto che assicura a tutte le persone ed a prezzi sostenibili la libertà di circolazione sancita in Italia dalla Costituzione (Art. 16) e in Europa dalla Carta dei diritti dell'Unione europea (Art. II-105). Il diritto alla mobilità è tuttavia un diritto giuridicamente limitato, in quanto, come richiamato nel citato Art. 16, deve misurarsi con le esigenze di "sanità e sicurezza", nonché con altri diritti costituzionalmente garantiti, quali ad esempio la tutela dell'ambiente e il diritto alla salute.

Per ottimizzare il rapporto "trasporti-ecosistema" e perseguire gli obiettivi di crescita sostenibile e di coesione si è generato a livello politico un "cambio di rotta" rispetto al passato, stanziando, ad esempio, dal 2017 in poi e per i prossimi 16 anni, oltre 3 miliardi di euro di finanziamenti per il rinnovo delle flotte autobus, per promuovere l'uso del TPL in area urbana e incentivare la "mobilità sostenibile". In tale contesto, la pianificazione degli investimenti in opere infrastrutturali e servizi ha assunto un ruolo centrale per le dinamiche di scelta della migliore "opzione" possibile, fondata su una valutazione globale di tipo analitico dei processi (complesso di azioni) necessari al pieno raggiungimento degli obiettivi di politica economica (vedi Fig.1) [4].

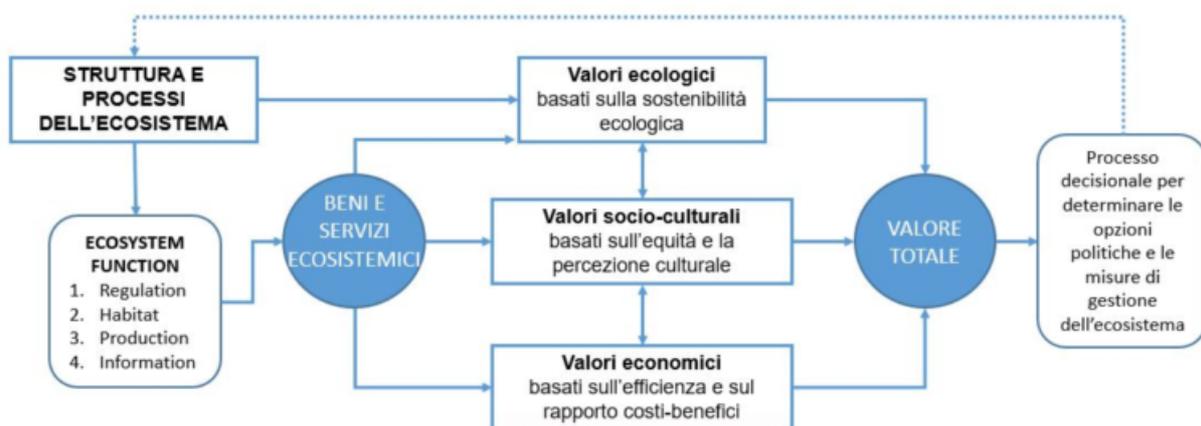


Fig. 1 - Processo di valutazione del sistema globale (Fonte: Propria elaborazione)

¹ L'articolo 112 del Testo Unico degli Enti Locali (d.lgs. 267 del 2000) stabilisce che "gli enti locali, nell'ambito delle rispettive competenze, provvedono alla gestione dei servizi pubblici che abbiano per oggetto produzione di beni ed attività rivolte a realizzare fini sociali e a promuovere lo sviluppo economico e civile delle comunità locali". Successivamente il d.l. n. 269 del 2003 e la legge n. 350 del 2003 hanno generato un ampio ricorso agli affidamenti diretti a società miste o all'"in house providing", a tutto danno dell'effettiva concorrenza tra soggetti imprenditoriali aventi pari diritti sul mercato di riferimento, anche se poi il Legislatore intervenne con la legge n. 248 del 4 agosto 2006 (cosiddetto "Decreto Bersani"), restringendone il relativo campo di applicazione.

Dalla *microeconomia neoclassica* sappiamo che l'eguaglianza tra i *costi marginali* ed i *benefici marginali* rappresenta una condizione di efficienza di un *sistema economico*, in quanto assicura che il benessere totale sia massimizzato. La presenza di una *esternalità*, come ad esempio l'inquinamento acustico ed atmosferico da traffico, l'*intrusione visiva* di un'infrastruttura, etc., altera questo equilibrio e porta ad una sovrapproduzione o sottoproduzione del bene, a seconda che l'esternalità sia positiva (decremento dell'impatto) o negativa. La mobilità è, in tal senso, causa di differenti tipologie di costi che ricadono sui diversi attori coinvolti: amministrazioni pubbliche, aziende di trasporto, utenti e collettività: l'esternalità si verifica quando un *consumatore* o un *produttore* influenzano il benessere di un altro individuo (consumatore o produttore) senza che ciò si rifletta effettivamente sui prezzi di mercato.

La presenza di esternalità sul mercato lo rendono (vedi Fig. 2) in un certo senso *inefficiente* poiché limitano la capacità dei prezzi di fornire l'informazione sulle quantità che devono essere prodotte o consumate (relazione *domanda/offerta*).

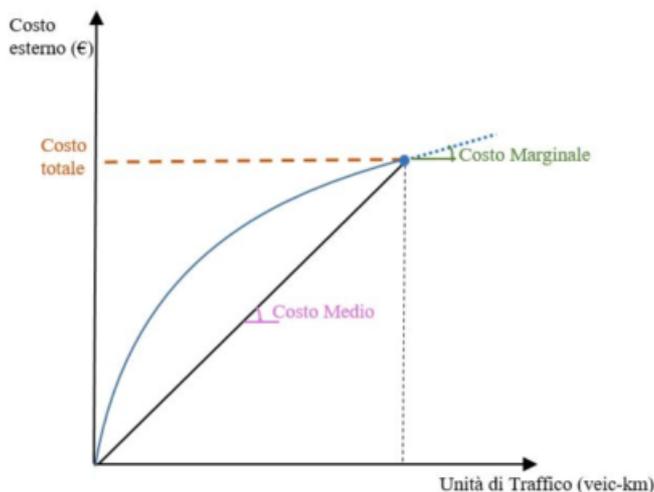


Fig. 2 - Rappresentazione grafica dei costi esterni
(Fonte: Propria elaborazione)

Il legame tra queste e le risorse ambientali diventa, pertanto, un *indicatore* importante per la valutazione dei potenziali benefici sociali per l'intera collettività.

L'ambiente, visto come risorsa, rappresenta una fonte importante per numerosi servizi diretti o indiretti, quali ad esempio la produzione di materia prima e di energia, la produzione di suoli e di ossigeno, la regolazione del clima e del ciclo delle acque, la produzione di risorse genetiche, la produzione di biomassa, l'assimilazione dei rifiuti, ecc. Nel settore dei trasporti, poi, i costi sociali che la collettività deve sostenere per via della circolazione di merci e persone rappresentano un *elemento di rischio* per il territorio che necessita di un'analisi più attenta degli effetti generati: emissione di inquinanti nell'atmosfera, gas serra, rumore, fenomeni di congestione ed incidentalità, etc. (vedi Fig. 3).

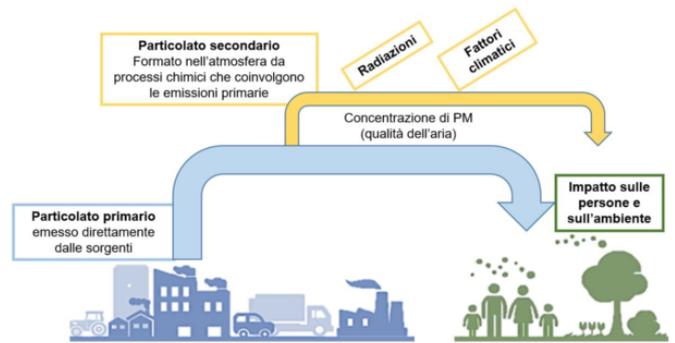


Fig. 3 - Emissioni inquinanti derivanti dal contesto urbano
(Fonte: Propria elaborazione)

Il valore di un'esternalità può essere stimato attraverso metodi *diretti* e *indiretti*: con i primi si simula un mercato interrogando un campione della popolazione sulla *disponibilità a pagare* per un bene/servizio, analizzando il surplus del consumatore o produttore (es. WTP, WTA), mentre con i secondi, si indaga un mercato influenzato dalle esternalità, in cui vengono acquistati e venduti beni o fattori produttivi [5].

Si può, infine, procedere anche al calcolo matematico degli effetti indotti sulla salute umana a causa dell'inquinamento atmosferico da traffico veicolare, mediante la valutazione delle risultanze degli studi epidemiologici che rappresentano la base scientifica di una corretta quantificazione. Metodologicamente, la procedura di *internalizzazione* nel calcolo economico del quadro di "*utilità e disutilità ambientali*" si può effettuare individuando, in relazione al caso in studio, apposite relazioni *dose-risposta*, matematicamente rappresentate da un *rapporto funzionale* caratterizzante il legame esistente tra una *variabile esogena* (la dose) ed una *variabile endogena* (la risposta), dando luogo alla seguente formula:

$$\Delta R = \emptyset \cdot \Delta D \quad (1)$$

dove \emptyset è il coefficiente della funzione che lega la variazione della dose ΔD a quella della risposta ΔR .

Nel caso dell'inquinamento atmosferico, la variabile esogena è solitamente il *livello di concentrazione* di un inquinante in atmosfera, mentre la variabile endogena può essere il numero dei decessi (in generale, o per cause specifiche legate all'inquinamento atmosferico), il numero delle volte in cui si verifica una certa malattia (es. attacchi d'asma, bronchiti, irritazione agli occhi), il numero dei ricoveri ospedalieri o altro.

Ad esempio, la *Valutazione di impatto sanitario* (VIS) condotta sulla città di Roma dal *Dipartimento di epidemiologia* della Regione Lazio [6] ha utilizzato due scenari per valutare i benefici della riduzione di PM_{10} , ozono e $PM_{2.5}$: una riduzione di $5 \mu g/m^3$ e la riduzione fino ai livelli delle linee guida dell'OMS (Organizzazione Mondiale Sanità). Il PM_{10} e l'ozono sono stati usati per valutare gli effetti a breve termine dell'esposizione ad inquinamento dell'aria e il $PM_{2.5}$ per gli effetti a lungo termine. I risultati conseguiti se hanno così dimostrato che se la

sola Roma si adeguasse ai *limiti OMS* risparmierebbe 1.278 morti per malattie croniche. Se un decremento paragonabile a questo avvenisse sul PM_{10} , i cittadini si eviterebbero anche 227 morti per malattie a breve termine e un migliaio di ricoveri all'anno, per un totale economico stimato di 2,2 miliardi di euro e di circa un miliardo se la riduzione fosse appena di $5\mu g/m^3$; quindi, il problema assume oggi proporzioni rilevanti anche per l'incidenza significativa sul PIL nazionale.

Se ne conclude che l'impatto ambientale dovuto alla diffusione e relativa concentrazione di inquinanti in atmosfera (dipendente dalle caratteristiche della circolazione e da quelle della strada, dalla sua conformazione ad "L" ovvero ad "U", dall'altezza degli edifici lungo i cigli della carreggiata, etc.) rappresenta in economia un rilevante *costo esterno* (esternalità negativa) che il soggetto (fisico o giuridico) che esercita un'attività di trasporto impone a terzi², senza che gli venga chiesta una *compensazione* per il danno arrecato, e quindi senza che questi ne tenga conto nel decidere se e come effettuare il viaggio.

Nell'analisi degli effetti sulle risorse ecosistemiche prodotti da un progetto di investimento, anche il paesaggio si configura come *risorsa scarsa* e assume la natura di *bene economico* da tutelare: l'*impatto visivo* prodotto da un'infrastruttura (ad esempio, la relazione "ponte-paesaggio urbano") genera un'alterazione dello stato *ex ante* di tale risorsa, con diseconomie da valutare e da minimizzare già in fase progettuale (scelta dell'architettura dell'opera, utilizzo di opportuni materiali, etc.) [7], scongiurando problemi di "inquinamento da opere di mitigazione", quali quelli dovuti all'impatto delle barriere acustiche in ambito urbano. In ogni caso, il *sistema economico* da prendere in esame per la valutazione del *costo esterno* al mercato da stimare risulta formato dal contributo al PIL in termini di reddito, occupazione e turismo delle aree direttamente o indirettamente interessate, mentre gli indicatori tipicizzanti il problema sono rappresentati dal valore attribuito al bene dalla popolazione interessata, oltre che dalla sua eventuale *utilità ricreativa*, dal decremento dei prezzi immobiliari nel territorio e dai costi di conservazione del bene da tutelare. Uno dei criteri scientifici per un approccio sistematico alla *valutazione estimativa* risulta quello della *Conjoint Analysis* (CA), che consiste nello studiare i modelli di scelta dei consumatori a partire da *giudizi di preferenza* espressi sui diversi profili di un *prodotto/servizio* che si intende sviluppare, emulando una vera e propria *analisi di marketing dell'utilità del consumatore* che deve essere massimizzata, in relazione agli "attributi" definiti [8].

I *punti-chiave* del metodo possono così schematizzarsi:

- *definizione degli attributi*: identificazione delle caratteristiche del bene;
- *assegnazione di diversi livelli agli attributi*: devono essere attivabili e con possibilità di scambio;

- *definizione dello scenario*: ai soggetti interessati dall'indagine sono presentati dall'intervistatore scenari ipotetici in cui sono combinati diversi livelli di attributi;
- *analisi delle preferenze*: le valutazioni degli intervistati definiscono le priorità di scenario;
- *valutazione dei dati statistici acquisiti con il metodo dell'intervista*: mediante *modelli matematici regressivi* si caratterizza il problema estimativo, individuando la ricercata relazione "attributi-preferenze" espressa dal campione statisticamente rappresentativo (non inferiore a 150 interviste).

L'utilizzo della tecnica estimativa della *Conjoint Analysis* negli studi del valore di un paesaggio permette non solo di stabilire l'importanza delle sue *componenti*, ma anche di determinare il valore dei diversi scenari di antropizzazione del bene naturalistico esaminato.

Nello schema seguente è rappresentato graficamente, a titolo di esempio, il *rapporto valore dei beni immobili/qualità dell'ambiente*, per il mercato immobiliare (vedi Fig. 4).

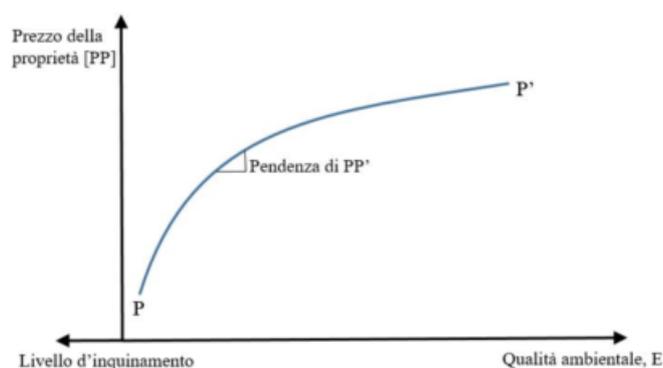


Fig. 4 - Stima dell'incidenza della qualità ambientale sul valore dell'immobile
(Fonte: Propria elaborazione)

2. L'analisi del problema e la valutazione dei vincoli per la scelta "ottima" con il modello matematico proposto.

Per gli interventi pubblici o di pubblica utilità (come i servizi di interesse collettivo), se il valore attuale dei *benefici sociali netti* è positivo, l'investimento è sostenibile per la collettività: l'obiettivo dell'analisi economica consiste allora nella determinazione del contributo dell'azione di spesa al benessere economico della macroarea geografica d'interesse, a seconda delle peculiarità dell'investimento in esame [9].

Compito del *Project manager* risulta comunque quello di attuare nel modo migliore possibile l'intervento, la cui utilità è stata già stabilita ad un primo livello decisionale di politica economica (*rapporto benefici sociali netti* positivo, miglioramento della qualità della vita, sicurezza, etc.) e, pertanto, le azioni di analisi del binomio "investimento-efficacia" possono essere operativamente schematizzate in quattro fasi caratteristiche:

² I terzi sono i cittadini (residenti e non), gli automobilisti e gli stessi operatori economici comunque interessati dagli effetti inquinanti.

Mobilità, Accessibilità, Infrastrutture

1. *definizione degli obiettivi*, individuazione delle *variabili decisionali* e della *funzione del benessere sociale*;
2. *identificazione dei vincoli* per massimizzare la *funzione* caratterizzante le peculiarità dell'investimento;
3. *valutazione degli effetti* generati dall'investimento nel settore/area e nell'indotto, durante la *vita utile*;
4. *confronto dei costi globali e dei benefici globali* e formulazione del *giudizio di convenienza*, attraverso un sistema di *indicatori economici* che esprima i rapporti di *scambio tra i beni* che rendono massima l'utilità socialmente "*ponderata*" dei diversi fattori.

Come descritto graficamente nella figura seguente (vedi Fig. 5), la scelta ottimale sarà geometricamente fornita dall'intersezione fra la funzione rappresentativa in R^2 dei vincoli di bilancio e le *curve di indifferenza*.

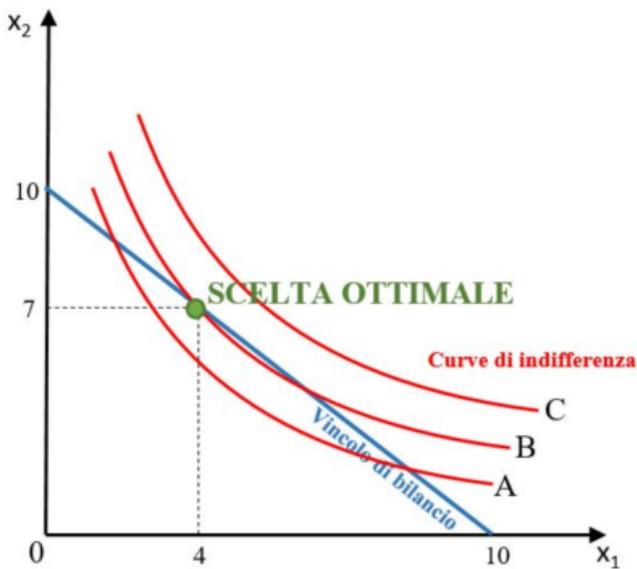


Fig. 5 - Scelta ottimale
(Fonte: Propria elaborazione)

Inoltre, compito del *Project Manager* e delle altre figure aziendali preposte all'attuazione dell'intervento programmato è quello di analizzare tutti gli specifici vincoli tecnici, economico-finanziari e temporali, opportunamente approfondendo ogni elemento del problema in studio. Infatti, una moderna analisi degli investimenti pubblici richiede un opportuno approfondimento di tutte le variabili del problema e dei vincoli, al fine di migliorare *ex ante* le utilità globali, valutando gli effetti *post-operam* di scenario per l'intera vita utile dell'opera [o del programma di interventi] a cui l'investimento è destinato [10].

In tal senso, le *variabili decisionali strategiche* da analizzare devono riferirsi alle differenti fasi dell'intervento (vedi Fig. 6):

- *progetto esecutivo* con il relativo piano finanziario e ogni altro elemento utile, quali la VIA-VAS;
- *avvio e gestione operativa* delle attività realizzative, nel rispetto del *cronoprogramma* dei lavori;
- *immissione nel ciclo produttivo* dell'opera (*esercizio*) e oneri gestionali nel periodo di *vita utile*;
- *dismissione del "bene"* al previsto termine del suo *ciclo d'impiego*.



Fig. 6 - Fasi di valutazione ambientale del progetto e monitoraggio dell'opera
(Fonte: Propria elaborazione)

Mentre per un imprenditore privato (anche nel caso di *Project Financing*), soggetto al *rischio d'impresa*, nella scelta delle *alternative progettuali* assume rilevanza prioritaria l'*analisi di redditività*, in base alla quale il *valore attuale* di tutti i ricavi generati deve superare il valore attuale di tutti i costi nel *ciclo di vita utile* del progetto (ovvero, in alternativa, assicurarsi che il *tasso interno di rendimento* dell'investimento superi il *tasso d'interesse* del mercato³), per il *decisore pubblico* elementi di assoluta rilevanza sono invece l'*utilità sociale*, l'occupazione e lo sviluppo economico, la salvaguardia dell'ecosistema ed il miglioramento della qualità della vita.

In ogni caso, nelle scelte da operare il *project manager* deve considerare che i flussi di *utilità/disutilità* si verificano in momenti temporalmente diversi nello scenario di *vita utile* e, pertanto, devono essere resi omogenei tra loro, *scontando* quelli futuri ad un opportuno *tasso di sconto* " r "⁴.

Nel caso particolare di investimenti realizzati sotto forma di PPP (*partenariato pubblico-privato*) occorrerà pure considerare il *valore attuale netto* del progetto di investimento esaminato. Tale *indicatore* è dato dal *valore attuale dei flussi finanziari* che il progetto è in grado di generare nel tempo, decurtato del valore che sarebbe possibile ottenere mediante *investimenti alternativi* con il medesimo *grado di rischio*⁵.

Infine, nel PPP i *rischi di progetto* influiscono sulle tempistiche di realizzazione dell'investimento, spingendo talvolta la parte privata a ritardarlo in modo sufficiente a

³ Questo tipo di impostazione nell'analisi economica si spiega con il fatto che l'impresa deve remunerare l'investimento programmato, anzi, questo risulta attuabile solo se produce utili monetizzabili, perché l'obiettivo ultimo dell'impresa è quello di massimizzare il profitto.

⁴ Il valore del parametro " r " dipende anche dal *livello di rischio* assunto con l'investimento. Per scontare i flussi può essere in alcuni casi usato, al posto di r il *WACC*, *costo medio ponderato del capitale*, cioè un tasso di attualizzazione creato sulla base delle caratteristiche correnti dell'impresa che rappresenta il rendimento necessario per remunerare adeguatamente eventuali *prestatori di capitale*.

⁵ Tale *valore attuale* di investimenti alternativi consente di individuare un particolare *tasso* denominato *costo opportunità del capitale*, interpretabile in economia come il *tasso di rendimento atteso dagli investitori* per un investimento in azioni o titoli che hanno il medesimo rischio. Su tale punto, bisogna rilevare che esistono diversi tipi di rischio: quello economico, legato a *fattori esterni* rispetto al progetto, come ad esempio l'andamento dei prezzi di mercato e quello *tecnico*, che dipende invece da elementi propri del progetto.

valutarne puntualmente le potenzialità e quella pubblica ad anticiparlo per raccogliere subito i benefici socio-economici attesi.

In tale contesto, nella decisione finale delle parti assumeranno ulteriore rilevanza altri *fattori d'incertezza* nell'investimento: il *rischio operativo* e quello *finanziario* [11]. Mentre quest'ultimo dipende dalla particolare struttura dell'azienda e dalle sue attività (*in primis* dalla distribuzione dei *costi fissi* e dei *costi variabili*), il *rischio finanziario* risulta caratterizzato dal rapporto tra indebitamento e mezzi propri, dai tassi di mercato e dalle oscillazioni nei *tassi di cambio*. Questi due tipi di rischio sono legati all'irreversibilità delle decisioni: più aumentano i costi fissi di un progetto e quindi i costi connessi all'abbandono dello stesso, tanto meno reversibile sarà la scelta operata. Infine, per quei particolari investimenti che riguardano il mercato dei *servizi di pubblica utilità* (ad esempio la gestione di una rete autostradale, di un polo intermodale o di logistica, del TPL su gomma o su rotaia, etc.), occorrerà anche tenere conto del *rischio di settore* che include pure l'influenza delle scelte fatte dai *competitors* e del *rischio tecnologico*. Quest'ultimo risulta determinante soprattutto allorché l'innovazione tecnologica svolge un ruolo determinante: la decisione sarà dunque condizionata pure dal *ciclo di vita del settore* e dalle scelte "di contesto" operate dagli altri operatori del comparto produttivo.

3. La ricerca della "scelta ottima" tramite il modello matematico proposto

Una rigorosa impostazione matematica del problema consente di operare una rigorosa *analisi comparativa* delle alternative di progetto, mediante parametri di ordine tecnico, socio-economico ed ambientale a cui è attribuito un particolare "peso" w_i di "incidenza strategica"; tale approccio *sistematico* permette di operare un'opportuna caratterizzazione della *rilevanza globale di scenario* per ciascuna delle *opzioni* poste a confronto [12].

Consideriamo a questo fine apposite funzioni $S_j(x_j)$:

$$S_1(x^{-w_1}), S_2(x^{-w_2}), \dots, S_m(x^{-w_m}), \text{ con } \begin{cases} S_j(x^{-w_j}) \in [0, \infty] \\ \sum_{i=1}^m w_i = 1 \end{cases} \quad (2)$$

atte a descrivere il complesso di elementi, e_1, \dots, e_n , che soddisfino sia tutti gli obiettivi di minimizzazione del rischio, sia quelli economico-finanziari relativi al programma di investimenti occorrente.

Nella (2) i termini w_i rappresentano i differenti "pesi" caratteristici che i citati obiettivi presi in esame rivestono ai fini dell'ottimizzazione degli effetti generati nel sistema economico, sociale e territoriale.

Alla generica soluzione alternativa *i-esima* a_i considerata (fra quelle che soddisfano tutti i vincoli del problema) si può associare il *grado di incidenza* nello *scenario ex ante* che l'investimento genera nell'intera *macroarea economica* interessata $G(a_i)$, pervenendo (nell'ipotesi di soluzioni in numero finito) alla seguente relazione matematica risolutiva del problema posto:

$$G(a_i) = \min_{i=1, \dots, m} \{S_1(x_{i1}^{-w_1}), S_2(x_{i2}^{-w_2}), \dots, S_m(x_{im}^{-w_m})\} \cdot \rho \quad (3)$$

Nella (3) ρ è il *fattore di rischio globale* stimato (economico-finanziario, operativo-gestionale e per l'ecosistema), per l'intero scenario temporale di riferimento.

Se con il termine p_r si indica la "probabilità di accadimento" degli *eventi critici* tipizzanti il progetto $E_r(r=1, \dots, h)$ e con d_r la "dimensione del danno" stimato per ciascuno di essi, sussisterà la relazione:

$$\rho = \sum p_r^{-w_r} = f(p_r, d_r), \text{ con } \sum w_r = 1. \quad (4)$$

La scala delle probabilità p_r fa riferimento all'esistenza di una correlazione diretta o indiretta tra la tipologia delle singole attività di progetto esaminate e/o le carenze riscontrate (tecniche, economico-finanziarie e/o ambientali) con il danno che potrebbe derivarne nell'intero periodo di vita utile dell'opera (per "scontare" all'attualità gli effetti generati si può utilizzare la formula dell'*interesse composto*) [13]. Il rapporto *carenze/danno* può invece essere studiato attraverso la stesura di apposite *check-list* da compilare per ogni rischio analizzato. Tale valore sarà caratterizzato da una variabile indipendente rispetto alla *gravità del danno* legata all'evento negativo (disutilità). All'indicatore matematico p_r dovrà essere assegnato un valore in ordine crescente di rilievo del fatto, secondo apposite "specifiche" come quelle indicate nella tabella seguente. Infine, per le pratiche applicazioni del metodo, ai fini della quantificazione numerica del rapporto *Probabilità/Gravità del Danno* può farsi utilmente ricorso alla successiva figura (vedi Fig. 7) dove è schematizzata una *matrice di rischio*.

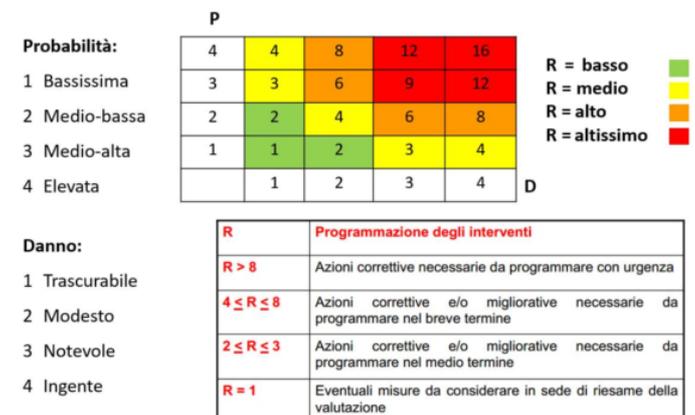


Fig. 7 - Matrice di misurazione del rischio (Fonte: Propria elaborazione)

⁶ *Attributo* matematico caratterizzante i valori assunti dalla variabile indipendente della particolare funzione considerata.

Sulla base di quanto precede, risulta possibile individuare l'*alternativa "ottima"*, come appresso indicato.

Denominiamo con $G(a^*)$ quel particolare indice, fra gli m analizzati nello studio del binomio "*investimento-effetti di scenario*" considerato, corrispondente all'*argomento*⁶ del massimo valore del grado di incidenza $G(a_i)$ sopra individuato.

Infatti, dalle formule [2] e [3] sopra riportate, risulta:

$$a_* = \arg \left\{ \max_{i=1, \dots, m} [S_i(x^{-w_i})] \right\} \cdot \rho \quad (5)$$

Per evidenziare la versatilità del modello matematico qui proposto, il quale si presta a molteplici applicazioni pratiche anche nel settore aziendale, si è sviluppato un *caso-tipo* riguardante il TPL per un progetto di *intermodalità treno-bici-autobus*, nell'ipotesi di una rete di *nodi di scambio* con apposite "*Bike station*", con l'obiettivo di minimizzare gli inquinamenti da traffico ed incentivare il trasporto pubblico collettivo.

Verrà ricercata la correlazione *funzione obiettivo/vincoli del problema*, dovendo valutare i costi globali dell'investimento da parte di un'azienda che gestisca entrambe le modalità di TPL (gomma/rotaia), come ad esempio avviene per la Ferrovia governativa "*Circumetnea*" di Catania, per dare vita al servizio di pubblica utilità in argomento.

Ci si limiterà nel prosieguo, per semplicità espositiva, ad esaminare il solo aspetto del problema della pubblicità per la vendita di abbonamenti mensili del servizio all'utenza, con tariffazione integrata per il trasporto O-D (*origine-destinazione*) treno-autobus ed il noleggio *bike* per un orario prefissato (ad es., 12h).

Nell'ambito della gestione aziendale, come in qualsiasi altro campo di analisi degli investimenti (pubblici e/o privati), ci si trova spesso a dovere affrontare dei problemi di *scelta vincolata* ed occorre prendere delle decisioni soggette a determinati vincoli, perseguendo il migliore risultato possibile sotto i diversi profili.

Si ha quindi a che fare con un *problema di ottimo* caratterizzato da una *funzione obiettivo* che permetta di misurare il "*valore*" raggiunto con l'investimento, ma dovendo osservare un prefissato numero di *vincoli* che limitano l'insieme delle *scelte ammissibili*. In tale contesto, verrà determinato il *valore ottimo* da spendere in pubblicità per quel progetto strategico di integrazione modale, assumendo come dati:

- *spesa pubblicitaria*: S_p (grandezza il cui *valore ottimo* deve essere individuato);
- *utile unitario* per ogni *unità di bene venduta* (abbonamento mensile): $V = 20$;
- *quantità vendute* Q , in funzione della spesa pubblicitaria

taria S_p : $Q(S_p) = 10 \cdot \sqrt{S_p}$;

- *vincolo ipotizzato* sulla spesa pubblicitaria: $0 < S_p \leq 25.000$.

L'obiettivo da conseguire da parte del *Project manager* sarà dunque quello di massimizzare l'*utile totale* U derivante dalle vendite di quel servizio di *mobilità multimodale*:

$$U(S_p) = V \cdot Q(S_p) - S_p \quad (6)$$

Risulta allora possibile effettuare la seguente rappresentazione matematica del problema, con U che assume il significato di *funzione obiettivo* e S_p la *variabile di scelta*, cioè quella a cui il *Project manager* dovrà assegnare il valore più opportuno, al fine di massimizzare la predetta *funzione* U :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } \{U(S_p)\} = \text{Max } \{V \cdot Q(S_p) - S_p\} = \text{Max } \{20 \cdot 10 \cdot \sqrt{S_p} - S_p\} = \text{Max } \{200 \cdot \sqrt{S_p} - S_p\} \\ 0 < S_p \leq 25.000 \end{array} \right. \quad (7)$$

Il problema sopra posto può essere ora risolto imponendo le seguenti condizioni:

- condizioni di *primo ordine*, per cui in corrispondenza del *punto di ottimo* la *derivata prima* della *funzione obiettivo* U dovrà assumere valore nullo⁷;
- condizioni di *secondo ordine*, secondo cui la *derivata seconda* di U dovrà essere negativa⁸.

Sviluppando analiticamente il procedimento, si ha:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial [U(S_p)]}{\partial S_p} = 100 \cdot \frac{1}{\sqrt{S_p}} - 1 = 0, \quad \text{per } S_p^* = 10.000 \\ \frac{\partial^2 [U(S_p)]}{\partial S_p^2} = -50 \cdot \frac{1}{\sqrt{S_p^3}} < 0, \quad \text{per qualunque } S_p \text{ ammissibile} \end{array} \right. \quad (8)$$

Il valore $S_p^* = 10.000$ così individuato rappresenta l'importo ottimo che l'azienda di TPL (per il "*caso-studio*" la *Ferrovia Circumetnea*) deve investire in pubblicità se vuole massimizzare l'utile considerato con l'investimento in pubblicità per la vendita degli abbonamenti del servizio di TPL intermodale *treno-bici-autobus*.

Il massimo *utile totale* corrispondente si può, pertanto, ricavare con un ulteriore passaggio algebrico:

$$U(10000) = 20 \cdot (10 \cdot \sqrt{10000} - 10000) = 200 \cdot 100 - 10000 = +10000. \quad (8)$$

Infine, nel caso di un investimento riguardante più elementi del sistema "*rete di mobilità-economia-ambiente*", il ricercato "*problema di ottimo*" sarà caratterizzato da una più complessa *funzione multiobiettivo* $U(x)$:

$$U(x) = \{u_1(x)^{-w_1}, \dots, u_n(x)^{-w_n}\} \quad (9)$$

Occorrerà poi effettuare un'analisi sistematica di tre insiemi caratteristici: "*A*" di *variabili* x_1, x_2, \dots, x_n (i cui valori e rispettivi "*pesi*" w_i devono essere definiti dal *decisore*),

⁷ Il caso esposto riguarda una funzione ad una sola variabile, mentre per le funzioni a più variabili occorre fare riferimento al gradiente, costituito dall'insieme di tutte le derivate prime parziali.

⁸ Per le funzioni in più variabili occorre fare riferimento alla *matrice Hessiana* formata dall'insieme di tutte le *derivate seconde parziali* che danno luogo ad una *matrice quadrata* di ordine $n \times n$, secondo l'*operatore matematico* $H_{ij} = \partial^2 / (\partial x_i \partial x_j)$.

“B” di *vincoli funzionali* che devono essere soddisfatti (espressi da opportune equazioni o disequazioni) e “C”, rappresentativo dello *scenario di contesto socio-economico ed ambientale*.

Se I è l'*insieme intersezione* dei tre insiemi sopra descritti, la ricercata soluzione “*ottima*” dovrà soddisfare la relazione $\Phi \in I$ (vedi Fig. 8).

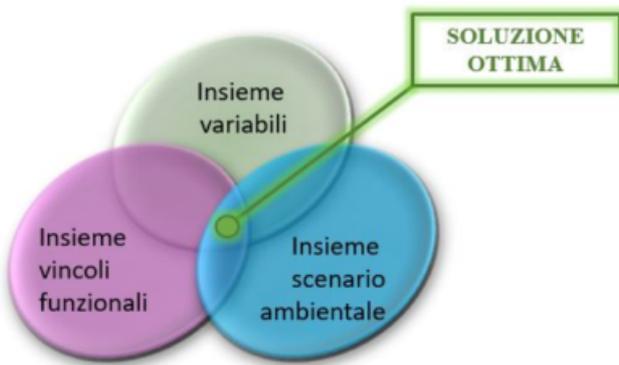


Fig. 8 - Reappresentazione della soluzione ottima di progetto
(Fonte: Propria elaborazione)

Infine, nella figura successiva (vedi Fig. 9), è rappresentata geometricamente la relazione “*livello di servizio-costò*”: fissata una prefissata “*soglia minima di accettabilità*”, per un insieme di alternative progettuali, tramite le formule [2], [3] potrà individuarsi il valore a_* per il problema considerato, pervenendo così alla soluzione che massimizza le utilità dell’investimento programmato.

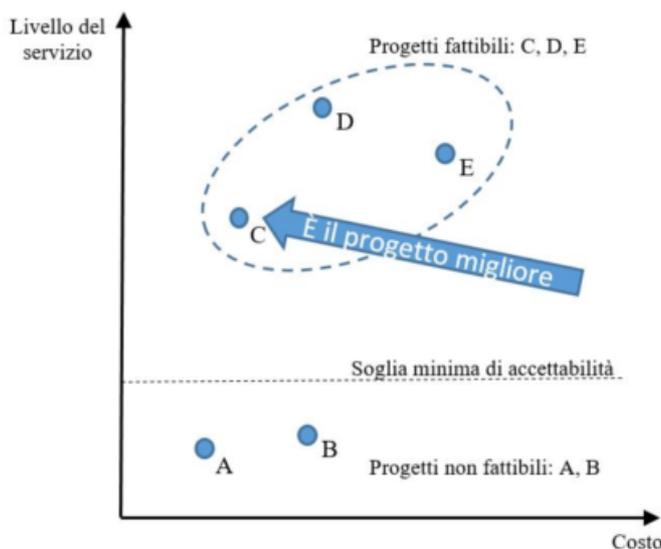


Fig. 9 - Reappresentazione grafica della scelta ottima di progetto in funzione del livello di servizio e del costo
(Fonte: Propria elaborazione)

4. Conclusioni

Gli investimenti in infrastrutture di mobilità di persone e merci costituiscono oggi più che mai una risorsa fondamentale per garantire uno sviluppo del territorio *di tipo integrato* fra le diverse modalità terrestri, marittimo ed aereo, favorendo la migliore crescita “*sostenibile*” delle nazioni, nel rispetto dell’ecosistema.

Dal punto di vista econometrico, la migliore interconnessione fra i nodi delle reti massimizza il valore di esse e consente di minimizzare il *costo generalizzato del trasporto*, migliorando l’affidabilità in esercizio e la sicurezza. Tuttavia, la *qualità globale del sistema* dipende oltre che dalle caratteristiche intrinseche del trinomio “*rete infrastrutturale-veicolo-ambiente*” e dalle relazioni intercorrenti fra l’insieme dei suoi elementi, anche dalla funzionalità dei servizi di mobilità e, soprattutto in ambito urbano e suburbano, dallo scenario organizzativo-gestionale del TPL e dai relativi livelli di *integrazione modale* (ad esempio, “*treno-bici-autobus*”).

La diffusa vulnerabilità ambientale del territorio ed in particolare la criticità degli inquinamenti nelle aree metropolitane, unitamente alla sempre maggiore ristrettezza delle disponibilità delle risorse pubbliche, comporta oggi la necessità di valutarne *ex ante* e con appropriati metodi scientifici, gli effetti diretti ed indiretti degli investimenti sull’intero *sistema della mobilità* e quelli generati nella *macroarea* interessata, per lo scenario di “*vita utile*”.

A fronte della complessità crescente dei progetti, della capacità delle imprese di essere flessibili e dell’incertezza che caratterizza il contesto economico, occorre affidarsi a metodologie di tipo matematico, come quelle illustrate nel presente lavoro, che permettano di rappresentare il problema mediante apposite *funzioni obiettivo* in R^m , per conseguire la massimizzazione delle *utilità* attese, nel pieno rispetto dei vincoli.

Se si vuole conseguire il migliore rapporto “*utilità/disutilità*” per ottimizzare l’investimento programmato, è necessario che il *Project manager* operi fin dall’inizio scelte tempestive, razionali ed economiche, incidendo sui profili di organizzazione, esecuzione e monitoraggio di tutte le principali attività da svolgere nelle diverse fasi progettuali, esecutive e di *gestione dell’esercizio*, in un’ottica di LCCA [*Life Cycle Cost Analysis*], anche attraverso un’appropriata analisi dei rischi operativi ed economico-finanziari. Questo modo di procedere, anche nello spirito della legge anticorruzione n. 190/2012, farà opportunamente conseguire la massima ed imparziale cura dell’interesse pubblico, evitando il ricorso a *varianti* in corso d’opera, nonchè slittamenti nei tempi di realizzazione dei programmi di investimento [*asincronie temporali*] e, in ultima analisi, aumenti dei costi a carico della finanza pubblica e della collettività.

Bibliografia

- [1] Fonte F., Lo Bosco S., Pagone R., Suraci F., *L'analisi delle variabili di progetto nel processo di ottimizzazione del trinomio mobilità-economia-ambiente: l'impatto acustico nel caso ferroviario*. In: *Ingegneria Ferroviaria* n.11, pp. 855 - 894, 2019
- [2] Alessandri T., Ford D., Lander D., Leggio K., Taylor M., *Managing risk and uncertainty in complex capital projects*. In: *The quarterly review of economics and finance*, vol. 44, issue 5, pp. 751 - 767, 2004
- [3] Bragadin M.A., *Heuristic Repetitive Activity Scheduling Process for Networking Techniques*. In: *Proceedings of the CIB 2010 World Building Congress*, Salford Quays, U.K. pp. 1 - 12. 2010
- [4] Bragadin M., Kähkönen, K., *Heuristic Solution for Resource Scheduling for Repetitive Construction Projects*. *Proceedings of the MISBE 2011 CIB Congress*, Amsterdam, The Netherlands, 2011
- [5] Hanemann M.W., *Willingness to pay and willingness to accept: how much can they differ?*, *American Economic Review*, 1991
- [6] Dipartimento di Epidemiologia del Servizio Sanitario del Lazio (DEP), *L'impatto dell'inquinamento atmosferico sull'ambiente e sulla salute* Roma, 4 giugno 2015 Auditorium, Ministero della Salute - Roma
- [7] Manivel L., *Prehomogeneous spaces and projective geometry*. In: *Rend. Sem. Mat. Univ. Politec. Torino*, vol. 71(1), pp. 35 - 118, 2013
- [8] Masera R. (a cura di), *Saggi sulla metodologia della ricerca in economia*. Università degli Studi G. Marconi, Roma, Gangemi Editore, 2010
- [9] Nuti F., *La valutazione economica delle decisioni pubbliche. Dall'analisi costi-benefici alle valutazioni contingenti*. Giappichelli, Torino, 2001
- [10] Leonardi G., Moretti M., Stoka M., *L'analisi del funzionamento della rete. Un approccio metodologico*. In: *Argomenti*, n. 1, R.F.I., 2003
- [11] Kohli K.N., *Economic Analysis of Investment Projects: A Practical Approach*, Oxford University Press for the Asian Development Bank, 1993
- [12] Lo Bosco S., *Un criterio matematico per l'analisi dell'utilità globale di un intervento pubblico sulle reti di mobilità*. Collana scientifica Aracne, Giocchino Onorati Editore Srl, Roma, 2018
- [13] Stoka M., *Calcolo delle probabilità e statistica*. Ed. Cedam, Torino, 2004

