


UN MODELLO MATEMATICO PER L' ANALISI INTEGRATA DEI PROGETTI DI INTERVENTO PER LA RETE FERROVIARIA, I NODI E PER I PROBLEMI DI INTERSCAMBIO MODALE : L'OTTIMIZZAZIONE DEI PROFILI DI SICUREZZA E QUALITA' GLOBALE D'ESERCIZIO.

Nella moderna analisi progettuale dei sistemi infrastrutturali complessi a rete, come quelli su rotaia, al fine di ottimizzare gli *standard globali di esercizio*, occorre analizzare molteplici variabili (*indicatori sintetici*) utili a descrivere compiutamente, ad esempio, nel caso di interventi infrastrutturali, lo scenario caratterizzante le differenti fasi dell'impianto ed esercizio del cantiere e della *gestione dell'esercizio* (Cfr. Tav. 1).



Uomo	Ambiente	Sistema veicolo - infrastruttura
<i>Conducente</i>	<i>Condizioni atmosferiche avverse</i>	<i>Carenze attribuibili ad opere tecnologiche e ad apparati di linea e di stazione</i>
<ul style="list-style-type: none"> – Problemi psico-fisici e/o errate valutazioni nella marcia; – inosservanza dei segnali, di limitazioni o prescrizioni, etc.; – 	<ul style="list-style-type: none"> – Neve, gelo, turbolenze, nebbia, etc.; – escursioni termiche eccessive; – 	<ul style="list-style-type: none"> – Anomalie tecnologiche degli impianti fissi; – inadeguatezza del materiale rotabile rispetto alle condizioni tipologiche della linea; –
<i>Personale addetto e operatori</i>	<i>eventi calamitosi ed altri imprevisti</i>	<i>Dissesti ed ammaloramenti del corpo stradale</i>
<ul style="list-style-type: none"> – Deficit manutentivi; – carenza nelle procedure di esercizio ed operazioni connesse (inosservanza di norme, regolamenti, etc.); – 	<ul style="list-style-type: none"> – Movimenti tellurici, smottamenti di terreno, frane, caduta massi, etc.; – presenza di ostacoli sulla linea, anche a seguito di raffiche di vento o di trombe d'aria, etc.; – 	<ul style="list-style-type: none"> – Problemi connessi alle tipologie costruttive dei manufatti, etc.; – carenza di apposito protocollo manutentivo, etc.; –
<i>Passeggeri</i>	<i>Incendi nel territorio interessato ed altre cause esterne</i>	<i>Problemi di funzionamento degli equipaggiamenti fissi e mobili</i>
<ul style="list-style-type: none"> – Conseguenze derivanti da imprudenze, sabotaggi, etc.; – trasporto di sostanze pericolose; – 	<ul style="list-style-type: none"> – Vulnerabilità specifiche del territorio, etc.; – pedologia e gestione agronomica dei suoli, etc.; – 	<ul style="list-style-type: none"> – Deficit del materiale rotabile; – affidabilità dei componenti del sistema di equipaggiamento e segnalamento per i distanziatori di linea, etc.; –

TAV. 1 - Fattori di rischio per il comfort e la sicurezza d'esercizio

In particolare, per i nodi di scambio modale, soprattutto ai fini dell'ottimizzazione dei progetti di *logistica integrata*, occorre poi riferirsi ad un più ampio contesto di *sistema plurimodale di trasporto*, con l'inevitabile conseguenza della necessità di procedere all'analisi di un'ancora più rilevante numero di *classi di variabili*, fra di loro caratterizzate da differente origine e natura.

Sotto il profilo metodologico, comunque, qualunque sia il caso preso in esame dall'*Ingegnere trasportista* o dall'*équipe multidisciplinare* di studio, a ciascuna alternativa *compatibile* (per i diversi vincoli : tecnici, economici, ambientali, etc.) analizzata potrà essere associato un apposito *indicatore di utilità* U_g che esprima, per l'intero sistema di variabili considerato l'utilità globale relativa per la *i*-esima opzione in esame.

Tale indicatore può essere opportunamente costruito sulla base dei *flussi di utilità attualizzati*⁽¹⁾ associati alla specifica alternativa progettuale, rapportati all'*ipotesi neutra*, cioè al "*non intervento*".

Dal punto di vista metodologico, può, dunque, procedersi costruendo opportuni modelli interpretativi dei fenomeni e dei processi oggetto di valutazione e, fra questi, ad esempio, le interazioni fra il fenomeno circolatorio (binomio "uomo-veicolo") con la componente di rete interessata (ramo, nodo, impianto, etc.), le eventuali interferenze e correlazioni con altre infrastrutture di viabilità, trasporto e logistica presenti nell'ambito territoriale interessato (sito ed *area vasta*), le interazioni con l'ambiente, etc. .

In particolare, nel caso di un intervento infrastrutturale nella rete ferroviaria, ad esempio, operativamente, denominando con Δb_{ij} gli *incrementi di utilità* globalmente riscontrati per il generico componente *j*-esimo della rete (fra gli *m* complessivamente analizzati), per l'*i*-esimo

⁽¹⁾ In particolare, nel caso di effetti indotti su talune risorse ecosistemiche non risulta possibile fare riferimento all'usuale *indicatore di scarsità e di utilità* rappresentato dal prezzo di mercato; inoltre, nel caso di impatti (positivi o negativi) permanenti non è neanche applicabile il criterio classico dell'attualizzazione, basato sul ricorso alla nota formula dell'*interesse composto*. In tali circostanze, sarà pertanto necessario ricorrere ad appositi criteri "*suppletivi del mercato*", fondati sulle diverse teorie per il calcolo delle "*esternalità*" [2].

elemento dell'insieme \mathbf{K} dei *fattori* k_i (supposti in tutto pari a n) caratterizzanti il problema di ottimizzazione in studio e con Δc_{ij} le rispettive variazioni negative di utilità, il ricercato indicatore di *utilità globale* (comfort e qualità d'esercizio, sicurezza, affidabilità, economie gestionali, impatti ambientali, etc.) assume l'espressione

$$U_g = \sum_{j=1}^m u_{gj}, \quad (1)$$

essendo u_{gi} *l'utilità globale relativa* (con il proprio segno algebrico) associata ad ogni specifico elemento j -esimo della rete, con

$$u_{gi} = \sum_{i=1}^n (\Delta b_{ij} - \Delta c_{ij}).^{(2)}$$

Dal punto di vista vettoriale, la (1), costruito il *vettore colonna* (di ordine n)

$$\vec{U}_{gj} \equiv \begin{pmatrix} u_{g1} \\ \vdots \\ u_{gi} \\ \vdots \\ u_{gn} \end{pmatrix}$$

è formata dall'insieme degli m *vettori componenti*

$$\vec{U}_g = \{\vec{u}_{gj}\}_{j=1}^m \quad (1')$$

Sotto il profilo metodologico, per l'analisi dello specifico problema ferroviario, il concetto di “*comfort globale*” in esercizio, correlato intrinsecamente a quello di “*sicurezza percepita*”, può essere qualitativamente rappresentato considerando una particolare condizione psico-fisica dell'uomo durante il viaggio, tale che si sia verificata la sussistenza di uno stato di soddisfazione nei riguardi del rapporto intrattenuto con l'ambiente (sistema “*veicolo-strada ferrata*”).

⁽²⁾ Il termine Δc_{ij} va considerato in valore assoluto.

Secondo tale impostazione, il modello di studio a cui risulta possibile matematicamente riferirsi per la caratterizzazione del suddetto problema consiste in un sistema operativo \mathbf{O} atto a definire il rapporto funzionale esistente fra le grandezze tipicizzanti il trinomio *infrastruttura-veicolo-ambiente*, le quali si configurano come stimoli per l'utente, e la condizione di *comfort globale* registrato; quest'ultimo, a sua volta, rappresenta l'*output* del sistema analizzato nel suo complesso.

Lo schema di analisi proposto può, così, essere rappresentato in Fig. 1

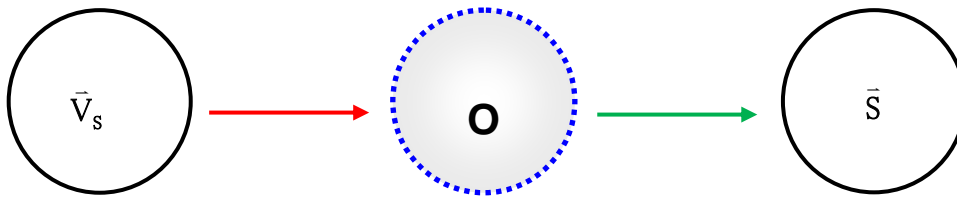


FIG. 1 - Schema operativo del rapporto tra il vettore algebrico \bar{V}_s delle grandezze stimolanti e quello \bar{S} rappresentativo della sensazione indotta.

Poiché uno stato privo di malessere è determinato da quelle grandezze caratterizzanti il trinomio “*veicolo-infrastruttura-ambiente*” che presentano valori ricadenti nel *dominio di tolleranza biologica* dell'utente, ne consegue che lo stato di assenza di malessere individuato dalla non esplicitazione, durante il viaggio, di azioni volontarie di protezione da parte del soggetto interessato.

Pertanto, l'insieme degli stati di soddisfazione per gli standard di qualità del viaggio da parte dell'uomo, si configura come un particolare sottoinsieme \mathbf{C}^* degli stati privi di malessere da egli registrati durante lo spostamento A-B effettuato; discende, dunque, che condizione necessaria perché durante la marcia si verifichi uno stato di comfort è che non si generi malessere.

Se, allora, con \mathbf{I} si indica l'insieme degli stati privi di malessere,

$$\mathbf{C}^* \subset \mathbf{I}$$

rappresenta il ricercato sottoinsieme delle configurazioni di comfort. Sotto il profilo *econometrico*, tuttavia, il comfort va correlato anche al costo c^* sopportato dall'utente per compiere lo spostamento desiderato (al crescere

di c^* , più elevato sarà il valore del *comfort atteso*) ed al tempo t complessivamente impiegato.

Il comfort può, comunque, configurarsi come una grandezza soggettiva del “*sistema uomo*”, di *tipo logico*. In termini *booleani* risulta così possibile attribuire alle diverse interazioni che si realizzano in esercizio il valore 1 o 0 (cioè, lo stato di confort esiste, ovvero non esiste).⁽²⁾

L'uomo può essere assimilato ad un particolare sistema **S** rappresentabile per mezzo di opportune coordinate nello spazio \mathbb{R}^d ; la coesistenza degli equilibri che si realizzano (meccanico, chimico, termico, etc.) è condizione necessaria ma non sufficiente a determinare una situazione di equilibrio globale.

A tal fine, si consideri una opportuna variabile v che tenga conto delle azioni di adattamento e modifica comportamentale dell'utente, a seguito delle sue interazioni con il predetto sistema **A**.

Dette allora $z_1, \dots, z_h, \dots, z_n$ le varie sensazioni (visive, acustiche, termiche, igrometriche, etc.) che svolgono il ruolo di variabili indipendenti del sistema **S**, esisteranno delle funzioni f ed f' tali che

$$v = f(z_1, \dots, z_h, \dots, z_n); \quad (2) \quad v = f'(\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m); \quad (3)$$

essendo $\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m$ le variabili indipendenti del sistema *veicolo-infrastruttura-ambiente*.

Da quanto precede, considerando la (2) e la (3), si ha:

$$F(z_1, \dots, z_n, \alpha_1, \dots, \alpha_m) = 0. \quad (4)$$

La (4) dimostra che l'insieme **B_S** delle variabili di stato dell'utente che affronta il viaggio e quello **B_A** caratterizzante il trinomio *veicolo-infrastruttura-ambiente* sono formati da elementi che danno luogo ad un sottoinsieme intersezione **V**.

⁽²⁾ Da quanto precede, è possibile osservare che in materia di comfort, si può solo definire una scala di valutazione e non una unità di misura. Inoltre, va evidenziato come la condizione di “*comfort globale*” sarà conseguentemente desumibile per mezzo di un *prodotto logico* e sarà legata alla contemporanea esistenza degli stati di benessere relativi ad ogni singolo organo sensoriale interessato durante il viaggio.

A titolo esemplificativo, può farsi riferimento nello studio delle azioni dinamiche tra veicolo ed infrastruttura, soprattutto per le linee con rilevante traffico merci, anche alle modificazioni indotte sull'insieme degli indicatori di stato \mathbf{B}_A , relativi al sistema *veicolo-infrastruttura-ambiente*, al particolare fenomeno dei sobbalzi dei carri a vuoto (Fig. 2). Ciò, valutata l'incidenza che la problematica può rivestire per la sicurezza d'esercizio e, dunque, per il ruolo che può assumere negli studi di ottimizzazione delle interazioni durante il moto fra tale sistema complesso e l'uomo.



FIG. 2 – Il sobbalzo dei carri a vuoto genera azioni sull'armamento, con gravosi effetti sul sistema della risposta della piattaforma, dovuto anche a situazioni di stress dinamico.

Tale fenomeno risulta peraltro recentemente maggiormente problematico in ambito UE, perché incentivato, tra l'altro, dalle seguenti circostanze verificatesi nell'esercizio ferroviario (in assenza, ancora oggi, di idonei *sistemi smorzanti* sui carri per il contenimento delle forze ruota/rotaia):

- incremento UE velocità massima e commerciale;
- aumento del rapporto carico/asse da 22,5 t/asse a 25 t/asse ÷ 30 t/asse;
- incremento del rapporto carico/vuoto (con soluzioni atte a ridurre la massa del carro).

Esso può costituire, dunque, un elemento di potenziale criticità, da opportunamente affrontare e risolvere da parte dell'Ingegnere ferroviario, onde assicurare sempre adeguati standard di sicurezza e qualità di marcia; ciò, soprattutto in presenza in linea di convogli passeggeri ad elevata velocità.

Ciò premesso, osserviamo, ora, i domini $Z = (z_1, \dots, z_h, \dots, z_n)$ e $A = (\alpha_1, \dots, \alpha_k, \dots, \alpha_m)$ sui quali sono definite le funzioni f e f' sopra

considerate; le molteplici interazioni che si verificano in esercizio fra i due sistemi **S** ed **A**, posto $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_v \cup \mathbf{Z}_t \cup \mathbf{Z}_a \cup \mathbf{Z}_i \cup \dots$, ove i simboli posti al pedice v, t, a, i, \dots , indicano, rispettivamente, le interazioni visive, termiche, acustiche, igrometriche, etc., si perviene alla relazione:

$$\mathbf{Z} \rightarrow \mathbf{V} \quad (4)$$

In virtù di quanto precede, a sua volta, l'insieme

$$\mathbf{A} = \alpha_v \cup \alpha_t \cup \alpha_a \cup \alpha_i \cup \dots,$$

deve dare luogo ad una specifica variabile v caratterizzante il sistema **A**, con $v_i \subset \mathbf{V}$.

E', infine, possibile pervenire alla rappresentazione geometrica del problema in un iperspazio \mathfrak{R}^d , mediante un'opportuna operazione di *partizione*, tale spazio (*omogeneo*) \mathfrak{R}^d può considerarsi composto da una *famiglia di sottospazi* S_j fra loro disgiunti la cui unione è l'intero \mathfrak{R}^d .

Si perviene, così, alla relazione

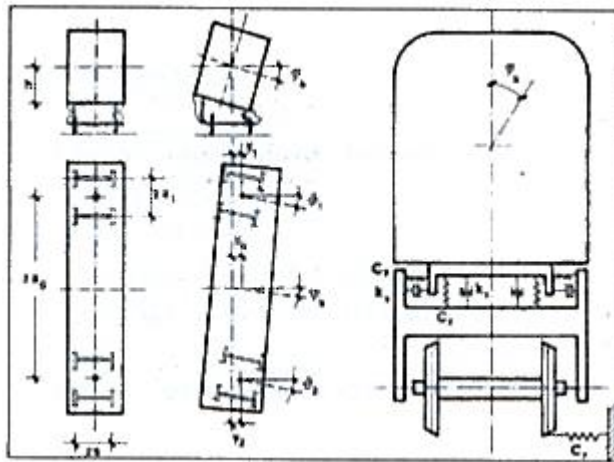
$$\mathfrak{R}^d = S_a + \dots + S_j + \dots + S_v ,$$

essendo, rispettivamente, S_a il *subspazio ridotto*, formato dalle proprietà relative alle relazioni acustiche, etc.

Ad esempio, esaminando il contributo fornito al *comfort di marcia* ed alla stessa *sicurezza d'esercizio percepita* dall'utente dal complesso di azioni attribuibili al sistema *ruota-rotaila*, si dovranno, tra l'altro, prendere in esame gli effetti delle sollecitazioni sull'armamento ferroviario indotte dal transito dei veicoli passeggeri/ merci nella linea e valutare, per data tipologia di convoglio, i particolari sistemi di smorzamento di cui è dotato.

Occorrerà, così, analizzare anche le azioni del mezzo in corsa sul binario trasmesse dal sistema *rodiggio e carrelli*, con riferimento, a titolo esemplificativo, ai seguenti elementi caratterizzanti il problema:

- sospensioni (verticali, trasversali, longitudinali);
- caratteristiche sede ed armamento ferroviario;
- sforzi tangenziali e verticali generati dal transito del mezzo;
- imperfezioni e irregolarità (*micro* e *macro*) della via.



Tali indicatori, come si evince anche dal semplice schema-tipo riportato per lo studio modellistico della dinamica di marcia di un veicolo su rotaia, ammettono sempre un determinato *range* di valori $\Delta=(s-i)$ entro cui è verificata (sia pur con diverso livello di qualità e di *percezione* della stessa) l'esistenza dello *stato di comfort* per l'utente ferroviario.

Applicando, ora, le risultanze della *geometria euclidea* alle grandezze caratterizzanti il problema in studio, risulta possibile analizzare contestualmente le interazioni fra i diversi *sistemi di variabili* sopra enucleate e superare così la loro differente natura, compresa la relativa eterogeneità delle rispettive unità di misura.

Mediante un'opportuna trasformazione delle coordinate dei punti dello spazio \mathfrak{R}^d , indicando con $\lambda_h = (z_h - z_h^i) / (z_h^s - z_h^i)$ e con $\mu_h = (\alpha_h - \alpha_h^i) / (\alpha_h^s - \alpha_h^i)$, si può individuare una particolare *ipersfera* di equazione

$$\lambda_1^2 + \dots \lambda_h^2 + \dots + \mu_1^2 + \dots \mu_h^2 + \dots = 1. \quad (5)$$

Con tale impostazione geometrica del problema, il livello di *soglia inferiore di comfort* corrisponde all'origine 0 degli assi, mentre i punti P^s relativi alla *soglia superiore* appartengono alla sua *frontiera*.

Pertanto, risulta possibile definire il vettore $\bar{\beta}$ *benessere specifico*, individuato dai seguenti vettori componenti

⁽⁴⁾ Tale corrispondenza univoca fra le predette grandezze è fornita dalla funzione f della (2).

$$\vec{\beta} \equiv \vec{\lambda}_1 + \vec{\lambda}_h + \dots + \vec{\mu}_1 + \dots + \vec{\mu}_h + \dots$$

Dall'espressione (5) sopra riportata, inoltre, deriva che l'assenza di *malessere* durante il viaggio deve comportare il verificarsi della condizione matematica

$$\left| \vec{OP} \right|_{\max} \leq 1.$$

Infine, nell'*iperspazio di riferimento* considerato, risulta anche possibile caratterizzare geometricamente l'esistenza del raggiungimento della sensazione di *comfort relativo* a tutte le n sensazioni (\mathbf{t} = termiche, ..., \mathbf{a} = acustiche), complessivamente percepite durante lo spostamento in treno; ciò, mediante il calcolo dei rispettivi *coseni direttori* $\mathbf{b}_t, \dots, \mathbf{b}_a$:

$$\mathbf{b}_t = \left| \vec{\beta}_t \right| / \left| \vec{\beta} \right|, \dots, \mathbf{b}_a = \left| \vec{\beta}_a \right| / \left| \vec{\beta} \right|.$$