

**Dottorato di Ricerca in Scienze Chimiche XVI ciclo**

**ANALISI TERMODINAMICA INTEGRATA DEI SISTEMI DI  
TRASPORTO  
IN DIVERSI LIVELLI TERRITORIALI**

**dr. Mirco Federici**

**Dipartimento di Chimica, Università degli Studi di Siena**

**Email: federici2@unisi.it**



## Premesse:

**Ringrazio Luca Mercalli e Paolo Mattone per avermi dato la possibilità di divulgare il mio lavoro al di fuori dei circuiti accademici, e tutte le persone che mi hanno contattato in queste ultime settimane.**

**Il lavoro è durato complessivamente 3 anni, non è stato commissionato nè retribuito da nessuno**

**Questo è finora l'unico lavoro disponibile nella letteratura internazionale ad aver analizzato e confrontato con diverse metodologie di analisi di approccio globale, i sistemi stradali, ferroviari e i TAV.**

**Uno studio molto datato, che però non tiene conto di tutte le voci di infrastrutturazione è: *Boustead I. and Hancock G.F., 1979. Handbook of industrial energy analysis. Ellis Horwood Limited. Pp.442.* Si riferisce a treni e mezzi di trasporto inglesi.**

## Scopo

**Lo scopo del lavoro è:**

- **Verificare in che modo la differente destinazione d'uso influenzi le prestazioni dei sistemi di trasporto terrestri.**
- **Stabilire quale tipo di sistema di trasporto può contribuire al contenimento dei consumi di energia e alla riduzione delle emissioni.**

**Il caso studio analizzato:**

- **L'asse di trasporto Milano-Napoli**

## **Descrizione della metodologia analisi termodinamica multicriteriale**

**L'approccio utilizzato confronta ed integra metodologie differenti basate sui principi della termodinamica.**

**Analisi dei Flussi Materiali (MFA)  
Analisi Energetica su scala locale;  
Analisi Energetica su scala Globale;  
Analisi Exergetica;  
Analisi Emergetica;  
Bilancio dei Gas ad effetto serra;**

**In questa sede verranno discussi principalmente i risultati dell'Analisi Energetica e dei Flussi di Materia, essendo le altre meno intuitive e più sofisticate.**

## **Le ragioni del treno:**

**L'opinione condivisa che il treno rappresenti sempre l'alternativa “verde” al trasporto su gomma nasce da due motivazioni:**

- 1) la prima è che negli settanta, quando le auto erano inefficienti ed i camion diesel erano dei fumosissimi e inefficientissimi mezzi di trasporto, il treno rappresentava davvero l'alternativa razionale al trasporto;**
- 2) la seconda deriva dal fatto che treno, automobile e camion vengono confrontati sempre, solo per quello che concerne i loro consumi energetici chilometrici trascurando il resto della filiera (costruzione veicoli e infrastrutture).**

## **L'approccio sistemico per l'analisi del trasporto:**

**Senza una strada sarebbe impossibile utilizzare un'automobile, e senza una ferrovia non si potrebbe utilizzare il treno.**

**Allora per valutare il consumo energetico e la produzione di emissioni associate al “passeggero o merce trasportata per chilometro percorso”, è necessario internalizzare tutti i costi ambientali, direttamente o indirettamente, sostenuti per l'ottenimento del servizio (costruzione delle linee stradali e ferroviarie, della loro manutenzione periodica, della costruzione e manutenzione dei veicoli, e del loro funzionamento).**

**Allo scopo di movimentare qualcosa o qualcuno, veicolo ed infrastruttura divengono un oggetto indivisibile, pena la funzionalità stessa del sistema.**

## **Descrizione della metodologia analisi termodinamica multicriteriale**

**Per tutti i sistemi analizzati è stato tenuto conto dei consumi energetici e materiali, della produzione dei rifiuti e delle emissioni legate a:**

- 1.Costruzione delle infrastrutture (scotico, scavi, movimento materia, utilizzo di asfalto, cemento, acciaio, ballast etc.)**
- 2.Costruzione dei veicoli (acciaio, plastiche, olii etc)**
- 3.Funzionamento annuale (consumo di energia elettrica, combustibili etc.)**
- 4.Manutenzione annuale dei veicoli e delle infrastrutture (materiali di consumo e rifiuti);**

**Solo con questo tipo di approccio di analisi “globale” è possibile tener conto di tutti i vantaggi e gli svantaggi ambientali associati ad una tipologia di trasporto a livello di atmosfera.**

## **L'approccio sistemico per l'analisi del trasporto:**

**Il valore finale dell'indicatore di impatto sarà allora dato dalla somma dell'impatto dovuto alla produzione ed al funzionamento del veicolo + l'impatto dovuto alla costruzione delle infrastrutture.**

**Il consumo energetico per passeggero, espresso in MJ/p-km o in grammi di petrolio/pkm si calcherà così:**

$$\text{MJ/p-km}_{\text{tot}} = \text{MJ/p-km}_{\text{veicolo}} + \text{MJ/p-km}_{\text{infrastruttura}}$$

**Trasportare una persona con uno stesso veicolo alla stessa velocità , ma su infrastrutture differenti può comportare differenti impatti.**

## **L'approccio sistemico per l'analisi del trasporto:**

**Gli impatti della infrastruttura per ciascun p-km o t-km vengono calcolati stimando un periodo di durata delle opere (50 anni per le ferrovie e 30 per le autostrade) ed il volume di traffico passeggeri e merci sostenuto.**

**Maggiore sarà il tasso di utilizzo delle infrastrutture, minore sarà il suo costo energetico-ambientale.**

**Si è assunto inoltre che i treni TAV viaggiassero ad una potenza media di 5.5 MW (contro gli 8.8 MW nominali dichiarati da TAV s.p.a. per ottenere una stima cautelativa)**

## **L'Asse di comunicazione Milano-Napoli**

**L'Asse Milano-Napoli è stato scelto perché le dimensioni dell'infrastruttura, la tipologia dei viaggi e l'alta intensità di utilizzo della linea, consentono di confrontare le modalità di trasporto ferroviario e autostradale, al limite delle loro performances.**

La direttrice Milano-Napoli è costituita da:

- l'autostrada Mi-Na (Autosole, A1);
- la linea ferroviaria Mi-Na attualmente in esercizio;
- la futura TAV (Treno ad Alta Velocità).

## L'Autostrada Milano-Napoli

- L'Autosole si estende per una lunghezza totale di 800 km. Nel 2001 l'ammontare del traffico passeggeri percorso sull'intera tratta è stato di 12 miliardi di v-km per un totale di 22 miliardi di p-km, mentre il volume di traffico merci è stato pari a 4.1 miliardi di v-km per un totale di 36 miliardi di t-km.
- Nel complesso l'intero traffico (merci + passeggeri) nel periodo 1995-2001 ha registrato un aumento del 27%.

## **La Linea ad Alta Velocità Milano-Napoli (TAV)**

**La linea ad alta velocità che collegherà Milano a Napoli, avrà una lunghezza totale di 772 km di cui: 193.2 km di gallerie, 74 km di viadotti e 503 km di linee in trincea o su rilevati. Secondo i programmi della TAV, la costruzione della nuova linea dovrebbe consentire aumenti complessivi dell'offerta (passeggeri + merci) del 85% sulla Milano-Bologna, del 108 % sulla Bologna-Firenze, del 74% sulla Firenze-Roma e del 49 % sulla Roma-Napoli.**

Poiché la TAV è una linea ancora in fase di costruzione, non esistono dati reali sul traffico passeggeri e merci.

È stato pertanto deciso di valutare le future performance ambientali della nuova linea ferroviaria utilizzando due stime:

- a) l'ipotesi di massimo utilizzo auspicata da TAV (corrispondente al 70% della capacità massima di trasporto);
- b) una stima basata sui coefficienti attuali di occupazione e di carico dei treni sulla stessa linea, pari invece a circa il 45-50% dell'offerta totale (dati RFI 2000).

In questo modo si ottiene un range di performance ambientale e di efficienza che, come vedremo, fornirà un elemento preziosissimo di discussione.

Nelle due ipotesi di esercizio di minimo e massimo utilizzo, il “peso erosivo” del trasporto passeggeri è pari rispettivamente al 16% e al 15%.

I volumi di traffico passeggeri ipotizzati variano tra 11 miliardi di p-km/anno e 15 miliardi di p-km/anno, mentre per il trasporto merci si ipotizza un range tra 3,8 e 5,5 miliardi di t-km/anno.

## La linea ferroviaria Milano-Napoli

Le differenze sostanziali rispetto alla TAV sono:

- minor numero di gallerie necessarie a causa della possibilità di affrontare pendenze maggiori;
- diverso tipo di sostegno per le linee aeree (pali verticali semplici, con una sezione 4 volte inferiore rispetto ai sostegni avvolgenti della TAV);
- potenza specifica dei treni mediamente inferiore del 30% rispetto agli ETR;
- capacità di trasporto passeggeri (posti/km offerti) superiore (700-800 posti contro i 500 degli ETR della TAV).
- Potenza/posti offerti più favorevole: 6 MW/750 passeggeri contro i 8,8 MW/500 passeggeri della TAV.

Anche in questo caso le analisi sono state condotte ipotizzando un range di utilizzo tra l'attuale tasso, ed un massimo corrispondente alla saturazione totale dell'offerta di trasporto.

# Il confronto tra autostrada e treno

Mirco Federici

## Trasporto Passeggeri

	<b>Bilancio Di Massa Locale (kg/p-km)</b>	<b>MFA Globale (kg/p-km)</b>	<b>Analisi Energetica Locale (MJ/p-km)</b>	<b>Analisi Energetica Globale (MJ/p-km)</b>	<b>Analisi Energetica Globale (MJ/p-km)</b>	<b>Analisi Energetica Globale (10<sup>11</sup> seJ/p-km)</b>
Automobile	0.13	0.53	1.37	1.87	1.31	1.74
Autobus	0.03	0.11	0.24	0.33	0.25	0.24
Ferrovia(*)	0.08-0.11	0.69-0.85	0.16-0.20	0.62-0.77	0.19-0.23	0.94-1.26
TAV (*)	0.08-0.12	1.00-1.40	0.27-0.38	1.02-1.44	0.30-0.42	1.17-1.65

**L'Autobus è la modalità con il minor impatto ambientale in assoluto.**

**L'auto è invece la peggiore soluzione.**

**Mentre il treno classico mostra rispetto all'auto un consumo di energia globale pari alla metà, la TAV mostra consumi doppi rispetto al treno e paragonabili alle auto:**

**Questo significa che se un TAV dovesse trasportare meno di 300 persone, diventerebbe più energivoro di un'auto con 2 persone a bordo.**

\*il valore più basso corrisponde all'ipotesi di massimo utilizzo

**Discussione dei risultati**

# Il confronto tra autostrada e treno

Mirco Federici

## Trasporto Merci

	Bilancio di Massa Locale (kg/p-km)	MFA Globale (kg/p-km)	Analisi Energetica Locale (MJ/p-km)	Analisi Energetica Globale (MJ/p-km)	Analisi Energetica Globale (MJ/p-km)	Analisi Energetica Globale (10 <sup>11</sup> seJ/p-km)
AUTOSTRADA	0.18	0.60	0.91	1.25	1.01	1.08
FERROVIA(*)	1.2-0.65	5.35-7.65	0.17-0.24	1.79-2.5	0.55-0.76	10.3-14.3
TAV MI-NA (*)	1.25-1.78	6.06-8.65	0.17-0.24	2.17-3.09	0.59-0.83	10.9-15.5

Per il trasporto merci, la miglior soluzione dal punto di vista energetico è rappresentata dai Camion:

Il treno mostra consumi che possono variare dal 60% al doppio, a seconda se viaggino a pieno carico o semi vuoti;

Il TAV mostra consumi che vanno invece dal doppio al triplo dei Camion

\*il valore più basso corrisponde all'ipotesi di massimo utilizzo

## Inquinanti gassosi sull'Asse Milano Napoli

### PRINCIPALI INQUINANTI GASSOSI SU SCALA GLOBALE PER IL TRATTO MI-NA

		CO <sub>2</sub>	CO	NO <sub>x</sub>	Particolato	VOC	SO <sub>x</sub>
<b>PASSEGGERI</b>							
AUTOSTRADA							
(AUTOVETTURE)	kg/p-km	0.089	0.006	0.0016	0.000069	0.000523	0.00024
FERROVIA	kg/p-km	0.031	0.000007	0.000057	0.00014	0.0000006	0.00034
TAV	kg/p-km	0.048	0.00001	0.000088	0.00018	0.0000007	0.00056
<b>MERCI</b>							
AUTOSTRADA							
	kg/p-km	0.072	0.00093	0.00065	0.00064	0.000121	0.00021
FERROVIA	kg/t-km	0.150	0.00011	0.00041	0.0021	0.000009	0.00085
TAV	kg/t-km	0.189	0.00014	0.00053	0.0025	0.000011	0.00105

La TAV è sempre peggiore del treno classico, e per alcuni inquinanti è addirittura peggiore del trasporto autostradale.

## Discussione dei risultati

**Quello che penalizza i consumi energetici del treno e della TAV sono i consumi energetici e le emissioni prodotte nella fase di cantierizzazione e nelle fasi di produzione dei materiali necessari (in primo luogo acciaio e cemento).**

**Le merci sono maggiormente penalizzate dei passeggeri, perché ai treni merci e ai camion spetta un maggior peso erosivo delle infrastrutture stesse.**

**Nel caso delle autostrade, il ruolo delle infrastrutture si fa sentire di meno perché il traffico veicolare che esse sostengono rispetto alle linee ferroviarie è immensamente maggiore.**

**Sia la linea classica che la TAV risultano quindi essere “sovradimensionate” o sotto-utilizzate. Per entrambe le linee sono stati utilizzati i flussi di traffico di saturazione delle linee dichiarate da RFI e da TAV s.p.a.**

**Il problema è quindi nella progettazione delle linee.**

## PESO DELLE INFRASTRUTTURE NEGLI INDICATORI INTENSIVI.

	Massa	MFA	Energia	EMIPS	Energia
<b>PASSEGGERI</b>					
<b>AUTOSTRADA</b>	5.0%	4.0%	0.10%	0.10%	2.0%
<b>FERROVIA</b>	99.9%	47%	13%	15%	72.0%
<b>TAV</b>	99.8%	37%	10%	9%	59.0%
<b>MERCI</b>					
<b>AUTOSTRADA</b>	51%	52%	10%	1%	39%
<b>FERROVIA</b>	99.9%	93%	71%	71%	98%
<b>TAV</b>	99.9%	94%	76%	74%	98%

## **L'irrazionalità della TAV**

**L'assurdità sta nel voler mandare un treno a 300 km/h anche dove esistono le montagne.**

**In queste condizioni, il treno non può più confrontarsi con le auto o con i camion, ma diventa un concorrente degli aerei.**

**Poi c'è il peso delle infrastrutture mastodontiche necessarie: nella galleria appenninica che collega Firenze a Bologna, TAV S.p.A. ha dichiarato l'utilizzo di 12.200 tonnellate di acciaio per km lineare per un totale di 900.000 tonnellate. Per produrre questa quantità di acciaio sono necessarie più di 1,700,000 tonnellate equivalenti di petrolio, che immettono in atmosfera più di 5,000,000 tonnellate di CO<sub>2</sub>, e circa 1,100,000 tonnellate di polveri. Poi c'è il cemento e i milioni di viaggi dei camion per portare il materiale in discarica.**

## Discussione dei risultati

**Ai fini della riduzione dei consumi di energia, e della riduzione delle emissioni ad effetto serra (ed obiettivi di Kyoto) per il trasporto merci la TAV è peggiorativa rispetto alla attuale sistema ferroviario e rispetto al trasporto su gomma.**

**Per il trasporto passeggeri la TAV non consente invece miglioramenti significativi.**

**E' bene sottolineare che i treni metropolitani ad alta capacità e a bassa potenza sono invece nettamente migliori di tutti i sistemi stradali ed ovviamente della TAV.**

## **Alcune considerazioni:**

**TAV s.p.a. è stata coinvolta inizialmente nella stesura del lavoro, soprattutto per il reperimento dei dati e delle informazioni riguardanti la cantierizzazione, l'esercizio e la manutenzione delle linee e dei treni.**

**TAV si è poi gradualmente defilata. TAV s.p.a. ha visionato e detiene una copia del lavoro, giudicata, dal proprio Ufficio Stampa, "inadatta" ai propri scopi divulgativi.**

**TAV s.p.a. ha commissionato uno studio di "Ecobilancio comparato" alla società "Ecobilancio Italia" nel 1995. Nonostante i risultati clamorosamente in favore di TAV, lo studio non è stato diffuso.**

## **Alcune considerazioni:**

**Prima d'ora nessun giornalista o movimento si è dichiarato interessato a divulgare (gratuitamente) i risultati del mio lavoro.**

**Questo lavoro è stato giudicato dalla commissione dell'esame del XVI Ciclo del Dottorato di Ricerca in Scienze Chimiche.**

**E' stato presentato e giudicato in due convegni internazionali:**

**•3° Biennial International Workshop on Advances in Energy Studies, Porto Venere, Settembre 2002)**

**•THIRD BIENNIAL EMERGY RESEARCH CONFERENCE Gainesville, Florida, Gennaio 2004).**

**Inoltre è depositato e visionabile presso la Biblioteca Nazionale.**