

## Sostenibilità energetica dei trasporti: analisi dei consumi e della soluzione ferroviaria

Prof. Ing. Bruno DALLA CHIARA<sup>(\*)</sup>, Dott. Ingg. Roberto RICAGNO<sup>(\*\*)</sup>, Massimo SANTARELLI<sup>(\*\*\*)</sup>

### 1. Introduzione

Una delle principali sfide che la nostra società dovrà affrontare nel prossimo futuro è rappresentata dall'approvvigionamento e dalla gestione dei flussi di energia nonché dalle conseguenze del loro impiego sull'ambiente. Tale problematica è di elevato impatto in tutti i settori di consumo energetico, in particolare nel settore dei trasporti, che dipendono oggi quasi esclusivamente dal petrolio.

Seppure sia controversa la sua collocazione temporale - prescindendo peraltro da riserve naturali non ancora sfruttate, incluso il carbone, o sfruttabili, per quanto verosimilmente a costi ben superiori di quelli attuali - è presumibile che il momento in cui la domanda di *energia da petrolio* ne supererà l'offerta si collochi grossomodo in questi decenni, stanti i ritmi di consumo attuali e la letteratura in materia: le conseguenze di varia natura di tale evento potrebbero essere tali da condizionare la sostenibilità dello sviluppo globale, così come oggi impostato; ciò non va visto tuttavia necessariamente come fatto negativo. Trasversalmente al problema energetico si pone la *tecnologia*, come strumento col quale l'uomo può porre rimedio al fatto che la risorsa oggi prevalentemente usata per consentire i trasporti divenga o possa divenire scarsa, rendendo *efficienti* e razionalizzando i consumi delle proprie attività e sviluppando un sistema che possa essere sostenibile anche senza l'apporto dei combustibili fossili.

Il settore dei trasporti, nel mondo, è prevalentemente caratterizzato dall'impiego di mezzi ad uso energetico distribuito - fatta eccezione quasi solo per gli impianti fissi - e dalla forte espansione negli anni passati del trasporto aereo, quasi solo per passeggeri. Tali opzioni di trasporto sono basate sui carburanti di derivazione petrolifera, le cui alternative presentano tuttora limiti importanti, mentre la ferrovia ne è svincolabile (linee elettriche alimentate da centrali, a prescindere dalla fonte energetica: nu-

ciare, idroelettrica,...) e, secondo una convinzione diffusa in letteratura, permette un miglior uso dell'energia.

Scopo di questo articolo è analizzare il contesto attuale dei trasporti basato su presupposti energetici forse non più validi per il futuro e verificare se e quanto il trasporto ferroviario risulti meno gravoso in termini di consumo energetico ovvero meno energivoro rispetto agli altri modi, in particolare nel confronto con l'automobile privata.

### 1.1. Cenni sulla situazione energetica mondiale

Per comprendere al meglio la rilevanza del problema energetico, è utile osservare l'analisi dei consumi eseguita dall'EIA - *Energy Information Administration*, l'ente governativo americano dedicato a queste tematiche.

Gli studi degli esperti consistono nella proiezione nel futuro - di venti, massimo trenta anni - delle condizioni energetiche di partenza, mediante consolidati ed articolati modelli analitici. Va specificato che le proiezioni si fondano su ipotesi politiche, macroeconomiche e sociali che, se rovesciate, comporterebbero uno stravolgimento dei risultati presentati.

Il consumo mondiale per settori è riportato in tabella 1; ricordando che in letteratura le perdite di trasformazione discriminano il fabbisogno energetico dalla domanda di energia, emerge che il settore dell'industria è il più energivoro, seguito da quello dei trasporti, che, a causa dell'aumento in corso del prezzo del petrolio, presenta comunque la crescita percentuale annua minore (a carico soprattutto del trasporto merci stradale). Si noti che l'incidenza in Europa (EU-25) dei trasporti (30.7% secondo Eurostat 2004) è più elevata di alcuni punti percentuali rispetto alla media mondiale, stante la maggiore mobilità media rispetto ad altri continenti.

L'aumento complessivo dei consumi energetici, nel quale giocano un ruolo chiave i Paesi in via di sviluppo, risulta preoccupante (71.48%); in particolare, se si considera che lo scenario energetico è e potrebbe rimanere incentrato sui combustibili di derivazione fossile, si comprende facilmente il motivo per cui il sistema economico e politico attuale nel prossimo futuro potrebbero vacillare.

<sup>(\*)</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento DITIC-Trasporti.

<sup>(\*\*)</sup> Collaboratore esterno Politecnico di Torino, Dip-DITIC-Trasporti

<sup>(\*\*\*)</sup> Politecnico di Torino, Dipartimento DENER-Energetica.

TABELLA 1

CONSUMI ENERGETICI MONDIALI PER SETTORE (Mtep)[1]

	2003	2010	2020	2030	Incidenza 2003 [%]	Incidenza 2030 [%]	2003-2030 var. annua [%]
<i>Trasporti</i>	2165	2449	2737	3150	20.42	17.32	1.4
Residenziale	1263	1550	1751	1968	11.91	10.82	1.7
Commerciale	615	716	852	983	5.8	5.4	1.8
Industria	3959	4869	6194	7522	37.34	41.37	2.4
Perdite di trasform.	2601	3258	3916	4559	24.53	25.07	2.1
TOTALE	10603	12842	15450	18182	100	100	2.0

Tuttavia, grazie allo sviluppo tecnologico e, implicitamente, all'aumento del prezzo del petrolio, le fonti rinnovabili acquisiranno con ogni probabilità col tempo una maggiore competitività nei confronti dei combustibili fossili [1].

## 1.2. Trasporti ed energia: dati generali e previsioni sui consumi

Il settore dei trasporti, il cui ruolo nelle moderne economie post-industriali è divenuto ormai fondamentale, è l'unico settore basato pressoché esclusivamente (98% in Europa e 96% nel Nord America) su una sola fonte primaria, il petrolio per l'appunto. Gli altri settori, invece, si fondano su un mix energetico variegato e non costante nelle diverse aree del mondo, a causa della variabilità della disponibilità di risorse sul territorio, del livello di sviluppo economico e di altri fattori della società, politici ed economici.

Tra il 1995 e il 2004, *il trasporto delle merci* nell'Europa a 25 (tabella 2), misurato in t-km (tonnellate di merci nette per chilometro)<sup>(1)</sup>, è cresciuto all'incirca del 28%; tuttavia, la crescita più blanda è stata proprio quella del trasporto ferroviario, passato da una quota di mercato pari al 12.1% nel 1995 al 10% nel 2004 [2].

<sup>(1)</sup> Le t-km non hanno un significato economico e possono risultare fuorvianti se utilizzate per la comparazione del traffico in contesti o modi differenti di trasporto. Infatti, per esempio, il costo del trasporto di un carico da 25 t con un autoarticolato per 1000 km non ha evidentemente nulla a che vedere con il costo del trasporto di 1000 carichi di 250 chilogrammi con 1000 piccoli veicoli commerciali per 100 km. Eppure le t-km sono uguali, mentre la fatturazione al cliente potrà variare, ad esempio, da 1 a 50 unità monetarie. La stessa considerazione può valere per la quantificazione del traffico, in quanto nel primo caso si ha a che fare, per esempio, con l'occupazione di una o più strade in successione per 1000 km da parte di un veicolo pesante; nel secondo, con un intenso uso di una rete di strade in ambito metropolitano da parte di veicoli commerciali, per la distribuzione.

In contesti omogenei dei trasporti (per esempio, solo trasporto ferroviario, solo distribuzione urbana su strada,...), l'utilizzo di tale unità di misura è significativo. In ogni caso, tale unità di misura viene spesso utilizzata nelle statistiche ufficiali di traffico e trasporti, nazionali ed internazionali.

Facendo riferimento al solo traffico terrestre, si nota che la quota di mercato della ferrovia è scesa dal 19.8% del 1995 al 16.4% del 2003.

Nel periodo tra il 1995 e il 2003, *il trasporto passeggeri* ha fatto registrare un incremento complessivo del 15.8% (tabella 3, dati in (p-km), passeggeri-chilometro). La ferrovia, pur perdendo quote di mercato in favore

de della strada e del trasporto aereo, ha avuto un incremento del 7%, imputabile prevalentemente all'ampliamento delle reti ad alta velocità [2].

La crescita del trasporto su strada e dell'aviazione civile, in parte riconducibili alla diversa natura dei relativi mercati rispetto a quello ferroviario, ha alimentato significativamente le emissioni di inquinanti ed il consumo di energia [2].

Secondo studi autorevoli, i trasporti offrono concreti margini nella riduzione dei consumi energetici: nel periodo 2004-2030 dovrebbe essere infatti incrementata l'efficienza di tutti i modi. Tuttavia, l'incremento di (p-km) e (t-km) potrebbe essere tale da provocare l'aumento dei consumi assoluti ed il petrolio, nonostante le politiche adottate da molti Paesi per promuovere l'impiego dei combustibili alternativi, rimarrebbe la fonte più usata dal settore, salvo clamorose scoperte scientifiche o tecnologiche (*breakthrough*) che consentano di usare efficacemente altre fonti primarie o vettori energetici.

Sulla base dello scenario attuale, nell'ambito del trasporto passeggeri europeo si prevede che l'utilizzo dell'auto privata cresca ancora (1.2% medio annuo), ma *ad un ritmo minore rispetto al passato* e, pertanto, la quota dei (p-km) effettuati con le auto potrebbe decrescere. Perderebbero quote di mercato anche il trasporto pubblico stradale (0.4% di incremento medio annuo) e quello ferroviario (0.9%) a vantaggio dell'aviazione (3.8%). Quest'ultima fornirebbe il contributo più importante (1.5% medio annuo) alla crescita dei consumi energetici, mentre l'uso di elettricità a carico della ferrovia diminuirebbe dell'1.2% tra il 2000 ed il 2030.

Il tema dell'*energia nei trasporti* è in realtà ben più complesso, ma quanto accennato in questa sede permette di comprendere le ragioni per cui è considerabile come un *vincolo* per la futura sostenibilità della *mobilità* e del *trasporto delle merci*.

Un secondo vincolo importante riguarda la condizione di prossimità alla saturazione delle strade di molte zone dell'Europa centrale. Inoltre, quando sono presenti troppe infrastrutture di trasporto in una data regione, ha senso parlare di *saturazione del territorio*, fenomeno per cui le popolazioni residenti tendono ad opporsi alla realizzazione di ulteriori vie di collegamento. In realtà, sapendo che la ferrovia presenta minori emissioni dirette di inquinan-

TRASPORTO MERCI IN EUROPA PER MODO DI TRASPORTO  
(1 miliardo di t-km) [3]

	Strada*	Ferrovia	Navigazione interna	Oleodotti	Mare**	Aereo**	Totale
1995	1248	358	120	105	1133	1.8	2967
1998	1386	370	127	117	1220	2	3222
2001	1521	359	130	124	1388	2.2	3524
2004	1684	379	130	124	1484	2.5	3804
Δ 1995-2004	35%	6%	9%	18%	31%	39%	28%

(\*) Le (t-km) della strada sono date dalla somma del trasporto nazionale ed internazionale di tutti i veicoli registrati nell'Europa dei 25.

(\*\*) Sono qui considerati solo il trasporto all'interno dei 25 Stati membri e all'interno di un Paese; i dati sono sotto revisione.

ti e di rumore, potrebbe essere giustificato un suo maggiore sviluppo per sottrarre alla strada, ad esempio, parte del traffico pesante ed all'aereo, parte del traffico di passeggeri.

## 2. Strumenti di analisi

L'analisi dei testi di riferimento a livello internazionale in materia di energia e trasporti [4], [5], [6] fornisce informazioni che, sebbene indicative sull'efficienza energetica dei vari modi di trasporto, non possono essere considerate pienamente soddisfacenti dal punto di vista metodologico. Infatti, la spesa energetica necessaria per produrre i carburanti a partire dalla fonte primaria viene spesso ignorata e i consumi specifici di ciascun modo vengono forniti su scala nazionale, quando non continentale: si tratta pertanto di analisi incomplete e poco dettagliate, che non sono in grado di fornire risposte particolarmente significative.

L'indicazione ricavata da tali analisi genera in ogni caso la convinzione della "convenienza" energetica del trasporto ferroviario: con una tonnellata equivalente di petrolio (tep), infatti, la ferrovia può produrre 32000 (t-km), contro le 5500 della strada. Nel settore dei passeggeri, con un tep, la ferrovia produce circa 50000 (p-km), contro i 6500 dell'aereo e i 16500 della strada [2].

Per condurre una vera e propria analisi energetica si deve utilizzare l'indice *well-to-wheel* (WTW, dal pozzo alla ruota)<sup>(2)</sup>, strumento nato

<sup>(2)</sup> Il riferimento al pozzo (*well*) implica quello al petrolio: è chiaro che se si prescindesse da tale fonte, alla quale questo articolo prevalentemente si riferisce, sarebbe forse più corretto fare riferimento alla *source* o *sink* invece che *well*. L'espressione WTW è invece consolidata nel settore e letteratura dell'analisi energetica.

TABELLA 2

e consolidatosi nel settore automobilistico, ma raramente applicato agli altri modi.

### 2.1. L'indice well-to-wheel

Il WTW è un indice energetico assoluto, la cui funzione è rendere confrontabili tra loro combinazioni di diverse tecnologie propulsive e diversi carburanti, o vettori energetici (idrogeno ed elettricità, che una volta prodotti sono considerabili alla stregua dei carburanti), ottenuti dalle più svariate fonti primarie.

Esso quantifica l'energia necessaria per rendere disponibile un carburante nel "serbatoio", in senso lato, di un mezzo partendo dalla fonte primaria, e l'energia usata per eseguire lo spostamento vero e proprio del mezzo stesso. Un'analisi energetica oggettiva deve quindi considerare che a carico dell'auto o del treno che si spostano c'è anche l'energia spesa per trasformare in carburante (energia fruibile dal sistema di propulsione del mezzo) una fonte primaria (energia nella forma disponibile in natura).

L'indice well-to-wheel, definibile come *l'integrazione di tutti i processi richiesti per produrre e distribuire un combustibile (iniziando dalla risorsa energetica primaria) e utilizzarlo in un veicolo* [7], è costituito dalla combinazione di due più specifici sottoindici: il *well-to-tank* (WTT, dal pozzo al serbatoio) e il *tank-to-wheel* (TTW, dal serbatoio alla ruota).

Il WTT considera l'ammontare di energia necessario per rendere disponibile un carburante dalla fonte energetica primaria (spesa energetica per l'estrazione, per i processi chimici di trasformazione e per il trasporto) fino al rifornimento nel serbatoio dell'automobile [8]; solitamente è espresso in MJ/MJ<sub>p</sub>, dove MJ<sub>p</sub> è l'energia totale spesa per rendere disponibile tale MJ di carburante e MJ<sub>i</sub> è l'energia contenuta nel carburante immagazzinato nel serbatoio del veicolo.

Il TTW considera invece l'ammontare di energia usato per muovere un mezzo di trasporto per una determinata

TABELLA 3

TRASPORTO PASSEGGERI IN EUROPA PER MODO DI TRASPORTO  
(1 miliardo di (p-km))[3]

	Auto private	Moto e motorini	Bus e pullman	Ferrovia	Tram e metrop.	Aereo*	Mare*	Totale
1995	3819	121	466	322	64	307	55	5155
1998	4060	128	473	328	66	370	52	5476
2001	4316	137	485	353	71	441	35	5836
2003	4444	142	483	345	72	449	35	5970
Δ '95-'03	16.4%	17.2%	3.7%	7.1%	12.5%	46.3%	-36.7%	15.8%

(\*) Sono qui considerati solo il trasporto all'interno dei 25 Stati membri e all'interno di un Paese; i dati sono sotto revisione.

distanza, dipendente dalla combinazione del carburante e della tecnologia propulsiva usata [7]; rappresenta, più intuitivamente, il consumo specifico di carburante ed è la componente più evidente della catena del consumo energetico di un veicolo. Solitamente è espresso in MJ/km o in MJ/100 km e rappresenta quindi la quantità di energia usata per muovere un veicolo per 1 o 100 km. Nel settore automobilistico, per la determinazione del TTW esistono percorsi di guida standardizzati, in cui le velocità e le condizioni di guida (fermate ai semafori e dislivelli) sono le più aderenti possibili alla realtà.

Dal punto di vista analitico, la valutazione dell'indice WTW è fornita dalla relazione (1):

$$WTW \left[ \frac{MJ_t}{km} \right] = WTT \left[ \frac{MJ_t}{MJ_f} \right] \cdot TTW \left[ \frac{MJ_f}{km} \right] \quad (1)$$

È necessario specificare che il WTW delle auto così definito, essendo riferito ad un veicolo con il solo guidatore a bordo [7], [8], non è applicabile ai treni, in quanto *mezzi ad uso energetico condiviso*. Pertanto, volendo confrontare le prestazioni dei due modi, bisogna valutarle entrambe in MJ/(p·km). A tal proposito, per tenere conto della diversa utilizzazione dei mezzi, si introducono il WTW\*, con cui viene indicato l'indice WTW considerando l'occupazione media reale dei mezzi, e il WTW<sub>pc</sub>, con cui si indica il WTW dei mezzi idealmente sfruttati a pieno carico (per l'auto si considera che ci siano quattro passeggeri a bordo).

## 2.2. Analisi energetica del trasporto ferroviario

Va detto innanzitutto che il calcolo del WTW per i rotabili ferroviari è esercizio complesso, soprattutto a causa della pochissima esperienza nel settore. L'unica analisi energetica di un certo livello nota, anche se limitata alla sola fase TTW, è stata infatti condotta in Germania una decina di anni fa [9].

Altri limiti significativi sono la mancanza di un percorso standard sul quale calcolare il consumo dei diversi convogli e la grande eterogeneità di materiali circolanti e prestazioni. Per questo si manifesta la necessità di collezione e comparare i dati esistenti sul traffico e sugli equipaggiamenti dei convogli; ad oggi, nonostante l'ampia disponibilità di dati, essi non sono ritenuti utili per analisi di tipo WTW [9]. In definitiva, in assenza di disponibilità al pubblico di dati da un contabilizzatore di energia a bordo dei locomotori [10] o presso le sottostazioni con connesso traffico, si possono sfruttare tre alternative:

- l'impiego di formule empiriche, specifiche per ogni tratta e ogni tipo di convoglio; è tuttavia un'opzione più funzionale come caso studio perché, proprio a causa della grande eterogeneità di linee e mezzi, non è in grado di fornire indicazioni generali come il WTW delle auto;

- l'impiego di altre formule empiriche basate sulle resistenze del treno e, quindi, sull'equazione del moto: in questo caso si ottiene soltanto una stima dei consumi e si devono accettare alcune imprecisioni; inoltre, viene ignorata la tratta percorsa dal rotabile di cui si calcola il TTW;
- l'impiego di modelli analitici della dinamica del moto del treno [9], che però richiedono dati di alta precisione e spesso di difficile reperibilità; infine, i tempi necessari a compiere queste analisi sono ritenuti troppo elevati per trovare una giustificazione pratica.

Nel settore automobilistico, inoltre, la massa del veicolo è poco importante e di per sé conteggiata nel WTW; in ferrovia essa riveste un ruolo di maggiore importanza, perché è predominante rispetto al peso dei passeggeri trasportati. Per questo motivo, limitatamente al confronto tra diversi treni, non sempre è interessante proporre ed analizzare i dati in MJ/(p·km), ma talvolta è più significativo farlo con riferimento al carico trasportato, per esempio in MJ/(t·km).

Per quanto riguarda l'analisi condotta mediante la stima dei consumi, se i dati sulle prestazioni dei convogli (velocità media e numero di fermate) sono facilmente desumibili dagli orari, la determinazione delle resistenze al moto è molto più complessa: ricavate le caratteristiche della linea (pendenza, curve, ecc.) dall'analisi del suo profilo, i coefficienti specifici dei convogli, essendo dati non disponibili in letteratura, possono essere determinati soltanto in galleria del vento o stimati mediante complessi algoritmi [9].

L'ultimo parametro da conoscere per determinare il WTW dei treni è il fattore di carico o *grado di utilizzazione*, che, rapportando percentualmente il numero di passeggeri sui posti disponibili sul treno, ne quantifica l'occupazione e, quindi, ne indicizza lo sfruttamento. Per determinarlo si usa o un valore pesato medio su un periodo di tempo piuttosto lungo (regola generale) o misure casuali nel tempo e nelle stagioni (per un particolare tipo di treno) [9].

## 3. L'analisi well-to-tank per auto e treno

Con la tabella 4 si introducono i WTT dei carburanti tradizionali e dei vettori energetici considerabili come loro principali alternative (idrogeno ed elettricità) prodotti a partire da diverse fonti primarie.

Appare subito evidente che l'unica opzione migliore dei carburanti tradizionali, in termini di WTT, è l'elettricità prodotta a partire dall'energia eolica. Infatti, a quest'ultima opzione, essendo il vento una fonte rinnovabile, non vengono convenzionalmente assegnate spese energetiche al di fuori della modesta componente relativa alle perdite di distribuzione.

La produzione tradizionale di elettricità comporta spese energetiche non indifferenti, a causa della bassa effi-

TABELLA 4  
WTT DEI PIÙ COMUNI E PROMETTENTI  
CARBURANTI [8]

Carburante	WTT [MJ/MJ <sub>f</sub> ]
Benzina	1.14
Gasolio	1.16 <sup>(*)</sup>
Gas naturale compresso	1.19
Idrogeno da gas naturale	1.82
Idrogeno da elettrolisi (da energia eolica)	1.74
Idrogeno da elettrolisi (mix europeo)	4.58
Elettricità (mix europeo)	2.86
Elettricità (mix europeo carbonioso)	2.59
Elettricità da energia eolica	0.04
Elettricità da nucleare	3.73

<sup>(\*)</sup> Circa un barile ogni sei non va dunque oggi a beneficio del suo uso finale.

cienza della tecnologia di produzione, valutata come valor medio dei rendimenti dei diversi impianti utilizzati in Europa. Una alternativa più efficiente è rappresentata dal mix carbonioso, che però incrementa l'utilizzo di carbone che è la fonte fossile più inquinante in assoluto. Per quanto riguarda il *nucleare*, bisogna specificare che è pratica comune calcolarne l'efficienza degli impianti (WTT) come la frazione di energia trasferita nel vapore poi impiegato per generare elettricità [8].

Per la produzione di idrogeno si segnalano problemi simili a quelli per la generazione di potenza elettrica: le fonti fossili, come fonte di idrogeno, consentono un certo risparmio energetico, ma, essendo a rischio di esaurimento o comunque di estrazione a costi elevati, non possono essere una soluzione utile. D'altro canto, l'uso dell'elettrolisi da mix elettrico europeo trova scarsa giustificazione al momento su larga scala, a causa della bassa efficienza già evidenziata del mix elettrico europeo, associata alla ancora relativamente bassa efficienza di questa tecnologia: tale opzione verrà pertanto scartata nel proseguo dell'analisi.

#### 4. L'analisi tank-to-wheel per auto e treno

Con la tabella 5 si introducono i TTW delle principali tecnologie propulsive attualmente disponibili sul mercato automobilistico, i motori a combustione interna (ICE – *Internal Combustion Engine*), e di quelle che i costruttori stanno sviluppando per lo sfruttamento di elettricità (motori elettrici e ibridi) e idrogeno (Fuel Cell – FC).

Nel 2010 la propulsione a *fuel cell* dovrebbe avere la miglior efficienza, seguita da quella elettrica a batterie. Tuttavia, data la scarsa maturità di queste tecnologie, è possibile assistere ad uno sviluppo nel medio termine del-

l'auto ibrida elettrica e a benzina/diesel con trazione a selezione<sup>(3)</sup>, in grado di mediare i pregi delle nuove tecnologie con l'affidabilità di quelle tradizionali. Occorre peraltro tenere presente che i *mezzi pesanti* su strada sulle lunghe percorrenze non hanno al momento un'alternativa competitiva alla trazione con derivati dal petrolio, sia essa legata a soluzioni ibride, ai motori elettrici o idrogeno. Tale alternativa esiste al momento solo su brevi distanze o per veicoli leggeri: questo porterebbe ad indirizzare l'autotrasporto verso *percorrenze brevi o medie* (alcune decine di chilometri) dalle aziende o centro di distribuzione ai terminali ferroviari, snelli e distribuiti lungo la rete ferroviaria, garantendo peraltro in genere margini maggiori agli operatori del trasporto su strada.

Prima di descrivere il comportamento energetico dei rotabili ferroviari, è necessario specificare che i TTW delle auto di tabella 5 sono piuttosto ottimistici, perché la velocità media cui sono state condotte le prove in ambito extraurbano è stata fissata in 62.6 km/h [7], ovvero prossima a quella di maggior rendimento (intorno a 80-95 km/h per le auto a benzina, 60-85 per quelle a gasolio [11]). In realtà, né in città né in autostrada la velocità media delle auto è paragonabile a quella ideale e, pertanto, il TTW reale sarà verosimilmente maggiore di quello proposto. Inoltre, le auto con motore "freddo" consumano molto di più (le prestazioni sono degradate di circa il 25% rispetto alle normali condizioni operative) e molti spostamenti urbani, essendo più brevi di quelli previsti dal ciclo standard (anch'esso eseguito con partenza a freddo), non consentono al

TABELLA 5  
TTW DELLE PRINCIPALI TECNOLOGIE PROPULSIVE  
DEL SETTORE AUTOMOBILISTICO NEL 2010 [7]

Tecnologia propulsiva	TTW [MJ/km]
ICE – benzina*	1.91
ICE – gasolio*	1.72
ICE – gas naturale compresso	1.9
ICE – idrogeno	1.67
ICE-ibrido – benzina	1.62
ICE-ibrido – gasolio	1.41
Auto elettrica (batterie)	1.1
FC – idrogeno	0.91

<sup>(\*)</sup> Nel 2002, i TTW di ICE – benzina e gasolio erano rispettivamente 2.25 e 2.09 MJ/km.

<sup>(3)</sup> L'utente può selezionare il tipo di trazione in base all'ambito territoriale in cui si muove oppure la selezione può avvenire automaticamente in base a sistemi di localizzazione automatica e comunicazione tra veicolo ed infrastruttura, qualora disponibili.



TABELLA 6  
TTW\* E  $TTW_{PC}$  PER ALCUNI TIPI DI TRENI EUROPEI [9], [12]

Treno	TTW [MJ/(t·km)]	[t/posto]*	[t/posto] <sub>PC</sub>	grado di utilizzo	TTW* [MJ/(p·km)]	$TTW_{PC}$ [MJ/(p·km)]
TGV	0.148	0.914	0.966	65%	0.209	0.143
ICE	0.104	1.294	1.336	51%	0.263	0.138
AVE	0.136	1.305	1.346	66%	0.268	0.183

motore di raggiungere le condizioni ottimali di funzionamento [11]. Infine, i TTW proposti fanno riferimento ad una berlina nuova, di medie dimensioni e media cilindrata, mentre il parco circolante è composto anche da auto più vecchie e da vetture di cilindrata e peso superiori.

Per quanto riguarda il TTW dei rotabili ferroviari, si è deciso di considerare tre convogli ad alta velocità: il francese TGV, il tedesco ICE e lo spagnolo AVE, ovvero i treni il cui consumo è stato misurato (nel 1997) ed i risultati sono disponibili in letteratura [9]. Per i primi due, dal momento che sono in servizio con diverse composizioni e condizioni operative, si è ritenuto opportuno fare una media dei consumi e del peso/posto, mentre per il rotabile spagnolo, all'epoca in servizio in composizione bloccata solo sulla Madrid-Siviglia, il problema non si pone.

Per ricavare il TTW\* dei treni, in MJ/(p·km), si deve applicare la relazione (2):

$$TTW^* \left[ \frac{MJ}{pkm} \right] = TTW \left[ \frac{MJ}{tkm} \right] \cdot \left[ \frac{t}{posto} \right] \cdot \left[ \frac{p}{posto} \right]^{-1} \quad (2)$$

dove [t/posto] rappresenta il peso (comprensivo della massa di ciascun viaggiatore, stimata in 80 kg) per ogni posto a sedere, mentre [p/posto]<sup>-1</sup> indica l'inverso del grado di utilizzazione del convoglio. La tabella 6 mostra i dati ricavati per i treni presi in esame.

In termini di  $TTW_{PC}$  si nota un vantaggio per il treno tedesco, mentre il TTW\* evidenzia che il TGV, essendo sfruttato meglio, spende meno energia per trasportare ogni singolo passeggero per l'unità di spazio.

## 5. Confronto tra auto e treno sulla base del well-to-wheel

Per i treni, dunque, è facile determinare  $TTW_{PC}$  e TTW\*. Per le auto, invece, il discorso è più complesso: la loro occupazione media, determinata nel 1990 in 32 diverse città del mondo, è di 1.52 persone/auto [13] e, quindi, non si commettono errori significativi nel considerare il  $WTW^*$  pari al WTW. Supponendo, invece, che l'auto con 4 passeggeri a bordo (la cui incidenza sul peso di una berlina media è pari al 22.44%) necessiti di più energia per

avanzare rispetto ad un'auto col solo guidatore, e non disponendo di un dato dalla letteratura che quantifichi questa sensazione, si è ritenuto opportuno calcolare in tre modi il WTW a pieno carico delle automobili. Nel caso 1 si è scelto di considerare il TTW dell'auto carica uguale a quello dell'auto con il solo guidatore; nel caso 3 è stata eseguita una proporzione tra il peso del veicolo con una persona a bordo e quello con cinque persone a bordo e, in virtù di tale rapporto, si è maggiorato il TTW, ammettendone quindi una proporzionalità diretta con il peso. Il caso 2 è la media aritmetica<sup>(4)</sup> dei due casi estremi.

Per ragioni di brevità si è ritenuto opportuno operare il confronto tra auto e treno a mezzo del  $WTW_{PC}$ , per poi adattare l'analisi ai dati reali, che tengono quindi conto del grado di occupazione, per il successivo caso studio applicato alla realtà italiana della Torino-Milano. La tabella 7 riassume detti indici well-to-wheel per i treni ad alta velocità di Francia, Spagna e Germania e per le migliori opzioni del settore automobilistico.

Il confronto tra i treni non viene chiaramente modificato nel passaggio dal TTW al WTW; tuttavia, supponendo ad esempio che il TGV sfrutti l'energia nucleare e l'ICE quella derivante dal mix europeo, il divario tra i due treni, fin qui poco significativo, diventa apprezzabile (0.166 MJ/(p·km) a vantaggio del treno tedesco).

Confrontando il WTW del treno con quello dell'auto nel caso 3, ovvero con la condizione più penalizzante per l'auto, si evidenzia una certa supremazia del trasporto ferroviario su quello stradale privato: infatti, i tre treni (a pieno carico) sono più efficienti dell'auto elettrica (con 5 persone a bordo) a parità di fonte primaria con cui si produce l'elettricità. Ciò è riconducibile alla maggior efficienza complessiva dei motori di trazione ferroviaria rispetto a quello impiegato sull'automobile, ma anche al fatto di aver considerato che il TTW dell'auto peggiori linearmente in relazione al peso delle persone a bordo, ipotesi certamente molto penalizzante e non del tutto realistica.

Facendo riferimento al caso 1, in cui ogni singola auto è sfruttata in condizioni ideali (solo conducente, auto nuova e guidata in condizioni standard), i risultati del confronto con il treno sono più incerti: a parità di fonte primaria, il treno si rivela più efficiente dell'auto elettrica, ma, in generale, le migliori alternative per il trasporto privato (FC con idrogeno da gas o elettrolisi da eolico, ICE-ibrido con gasolio) presentano un WTW confrontabile con i treni alimentati da elettricità di derivazione tradizionale.

<sup>(4)</sup> La media pesata, per quanto apparentemente più corretta, implicherebbe l'utilizzo di dati o informazioni di difficile oggettività.

TABELLA 7

WTW DELLE AUTO E WTW<sub>PC</sub> DI TRENI ED AUTO

Mezzo di trasporto	WTW [MJ/km] [9],[10]	Caso 1 (conducente)	Caso 2 (media)	Caso 3 (5 pers.)
TRENO ICE – energia eolica(*)	-		0.005	
TRENO TGV – energia eolica	-		0.006	
TRENO AVE – energia eolica	-		0.007	
Auto elettrica – energia eolica	0.044	0.011	0.012	0.013
TRENO ICE – mix carbonioso	-		0.333	
TRENO ICE – mix europeo	-		0.368	
TRENO TGV – mix carbonioso	-		0.371	
TRENO TGV – mix europeo	-		0.410	
Auto a FC – H <sub>2</sub> da elettrolisi da eolica	1.583	0.396	0.440	0.485
Auto ibrida – elettricità e gasolio	1.636	0.409	0.455	0.501
Auto a FC – H <sub>2</sub> da gas naturale	1.656	0.414	0.461	0.507
TRENO AVE – mix carbonioso	-		0.473	
TRENO ICE – energia nucleare	-		0.479	
Auto ibrida – elettricità e benzina	1.847	0.462	0.514	0.565
TRENO AVE – mix europeo	-		0.522	
TRENO TGV – energia nucleare	-		0.534	
Auto a combustione interna – gasolio	1.995	0.499	0.555	0.611
Auto a combustione interna – benzina	2.177	0.544	0.605	0.667
Auto a combustione interna – gas naturale	2.261	0.565	0.629	0.692
TRENO AVE – energia nucleare	-		0.681	
Auto elettrica – mix carbonioso	2.849	0.712	0.792	0.872
Auto a comb. interna – H <sub>2</sub> da elettrolisi da eolica	2.906	0.726	0.808	0.889
Auto a comb. Interna – H <sub>2</sub> da gas naturale	3.039	0.760	0.845	0.930
Auto elettrica – mix europeo	3.146	0.787	0.875	0.963
Auto elettrica – energia nucleare	4.103	1.026	1.141	1.256

(\*) In alcune regioni europee (per esempio, Spagna) l'energia eolica raggiungeva già nel 2005 il 6.1% dell'energia totale ivi prodotta e l'1.3% dell'energia totale ivi consumata, il che ne permette l'uso completo per le ferrovie o altre applicazioni (Fonte: Eurostat).

Il caso 2 si pone in una situazione intermedia che, in mancanza di dati più precisi, può essere considerata quale la più corrispondente alle reali prestazioni dei mezzi considerati.

In definitiva, il confronto non esprime una supremazia di un modo sull'altro, anche se bisogna sottolineare che è piuttosto raro che le auto viaggino con cinque persone a bordo. I treni, invece, mostrano un fattore di carico compreso nell'intervallo tra il 50 e l'85% e, almeno in termini generali, sono sfruttati meglio delle auto, i cui WTW<sub>PC</sub> risultano quindi poco veritieri.

Inoltre, se i dati relativi all'automobile sono, come già esplicitato, ottimistici e calcolati in proiezione futura, quelli del treno sono più vecchi e ragionevolmente si può pensare che, avendo le compagnie ferroviarie preso coscienza delle problematiche energetiche solo negli ultimi

tempi, gli attuali WTW dei rotabili siano migliorati e possano migliorare ulteriormente.

È necessario specificare che il confronto sarebbe stato più aderente alla realtà se si fossero paragonati i treni AV con il trasporto aereo continentale e l'auto con la ferrovia tradizionale. Tuttavia, in assenza di dati precisi sia sul TTW dei treni "storici" che degli aerei, si è ritenuto più opportuno operare nel modo descritto.

## 6. Metodi empirici per il calcolo del tank-to-wheel in ferrovia

Secondo il documento di riferimento[9], il consumo energetico medio di un convoglio che percorre una determinata tratta con  $N$  coppie velocità media – distanza tra

due fermate successive, si può calcolare analiticamente proprio come una funzione della velocità media ( $v_{med}$ ) e della distanza media tra le fermate ( $d$ ) compiute dal treno (equazione (3)). TTW:

$$\left[ \frac{MJ}{tkm} \right]_{medio} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{MJ}{tkm}(v_{med}; d) \right]_i \quad (3)$$

I parametri fondamentali per la stima del TTW dei rotabili sono dunque la velocità e il numero di fermate; in realtà gioca un ruolo importante anche la massa che, però, per rendere più confrontabili i TTW di treni diversi, viene normalizzata precedentemente al calcolo stesso. Una possibile semplificazione dell'equazione precedente, utile per un calcolo di massima dei TTW dei convogli, è data con l'equazione (4)[9]. TTW:

$$\left[ \frac{MJ}{tkm} \right] = A \cdot \frac{v_{medio}^2}{\ln(x)} + B \quad (4)$$

dove  $x$  indica la distanza media tra due fermate del treno e A e B (tabella 8) sono due parametri numerici empirici funzioni delle resistenze al moto e dei parametri utili per uguagliare l'analisi dimensionale dei due membri della (4).

A giudizio degli stessi Autori, questa formula empirica non rappresenta sempre una soluzione accettabile: ad esempio, l'effettivo consumo degli ICE tedeschi è risultato troppo distante dalle stime prodotte con questa tecnica [9].

L'alternativa migliore è quindi l'utilizzo dell'equazione della dinamica, che richiede la determinazione delle resistenze al moto, tra cui le principali sono quella aerodinamica, di rotolamento e alle livellette. La somma algebrica di tali resistenze fornisce lo sforzo istantaneo ( $F$ , espresso in Newton) che può essere utilizzato per determinare il carico stazionario di

TABELLA 8

VALORI DEI PARAMETRI A E B PER ALCUNI TRENI EUROPEI [9]

Treno	A	B
Serie ICE, Germania	0.007	74
TGV, Francia <sup>(*)</sup>	0.0097	70
APT <sup>(**)</sup> , Gran Bretagna	0.012	70
Grossi treni merci (più di 600 t a vuoto) <sup>(***)</sup>	0.019	63
RC, Svezia	0.015	81

<sup>(\*)</sup> I treni AVE spagnoli sono simili ai TGV: si possono ritenere quindi validi gli stessi parametri.

<sup>(\*\*)</sup> Pur non avendo avuto riscontro nella circolazione in esercizio, questo dato è utile per rendere più ampio il confronto.

<sup>(\*\*\*)</sup> Per i carri merci è stato ipotizzato un sistema di frenatura simile a quello delle carrozze.

un treno che viaggia ad una data velocità. L'espressione tipica di partenza di questo modello è la (5) [9]:

$$F = A_0 + A_1 v + A_2 v^2 + mg \sin \alpha \quad (5)$$

in cui  $A_0$ ,  $A_1$ ,  $A_2$  sono tre costanti,  $v$  è la velocità media espressa in metri al secondo,  $m$  la massa del treno,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $\alpha$  la pendenza. Dividendo per la massa (sempre allo scopo di ottenere risultati più generici) ed eseguendo un'appropriata conversione delle unità di misura, è possibile ottenere l'equazione (6), in cui lo sforzo  $F'$  è fornito in kN/t:

$$F' = B_0 + B_1 v + B_2 v^2 + g \sin \alpha \quad (6)$$

$B_0$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  sono tre costanti (tabella 9), funzioni dei coefficienti specifici per la determinazione delle resistenze al moto (coefficiente di resistenza al rotolamento, alle curve, ecc.).

TABELLA 9

VALORI DEI COSTANTI  $B_0$ ,  $B_1$  E  $B_2$  PER ALCUNI TRENI EUROPEI [9]

Treno	$B_0$	$B_1$	$B_2$
APT, Gran Bretagna	16.6	$36.6 \cdot 10^{-2}$	$26 \cdot 10^{-3}$
Vecchi treni inglesi	15.5	$29.2 \cdot 10^{-2}$	$57.4 \cdot 10^{-3}$
Treni merci	24.7	0	$84.5 \cdot 10^{-3}$
IC3, Danimarca – unità singola	19.7	0	$42.5 \cdot 10^{-3}$
IC3, Danimarca – unità multiple	19.7	0	$24 \cdot 10^{-3}$
ICE, Germania – Loco BR103	16	0	$22.5 \cdot 10^{-3}$

Ottenuto lo sforzo di trazione con la (6), è possibile, integrandolo lungo il percorso del treno, determinare anche il TTW. Tuttavia, il grado di precisione ed il tempo richiesti da questa operazione, unitamente alla specificità dei risultati ottenuti (validi solo sulla tratta in questione), rendono preferibile l'impiego di metodi approssimativi, basati su un tipico carico del treno. Tra questi, seppure si esegua una pesante semplificazione, conviene scegliere il metodo che considera il carico stazionario ed accelerato su una certa tratta e, per semplicità, ipotizzare che il treno acceleri sempre alla massima velocità dopo ogni fermata [9].

Dato che la (6) è riferita al solo carico stazionario, per procedere con l'integrazione (equazione (7)) è necessario aggiungere l'accelerazione  $a$ :

$$E' = \frac{1}{L} \int_0^L (a + B_0 + B_1 v + B_2 v^2) dl + g \frac{\Delta h}{L} \quad (7)$$



Nella (7),  $E'$  è l'energia consumata in kJ/(t-km),  $L$  la lunghezza della tratta esaminata e  $\Delta h$  è la variazione di altitudine tra le due fermate.

Infine, ipotizzando un treno che viaggia a velocità costante, pari al suo valore medio  $v_{med}$ , lungo tutta la tratta (carico stazionario in funzione della velocità media), in cui effettua un certo numero di soste,  $N_{fer}$ , accelerando ogni volta fino alla sua velocità massima,  $v_{max}$ , si ottiene l'equazione (8):

$$E' \cong \frac{N_{fer} + 1}{L} \cdot \frac{v_{max}^2}{2} + B_0 + B_1 \cdot v_{med} + B_2 \cdot v_{med}^2 + g \cdot \frac{\Delta h}{L} \quad (8)$$

in cui il primo addendo indica il carico relativo all'accelerazione, mentre i restanti quantificano l'energia spesa per mantenere il convoglio alla velocità di marcia. Il risultato della (8) è il TTW del treno, ottenuto per approssimazione dell'integrale della (7).

Nonostante gli effetti della massa e della velocità massima sul TTW siano intuitivamente predominanti e spesso apprezzabili, l'analisi dei dati proposti dal documento di riferimento [9] invita a supporre che a condizionare il TTW dei treni sia soprattutto la distanza media tra le fermate e, quindi, che la fase più energivora sia l'accelerazione alla velocità di marcia. Come esempio pratico, esemplificativo di quanto detto, si osservino (tabella 10) i consumi di due identici IC3 danesi a singola unità, uno utilizzato come "interregionale" e l'altro come convoglio urbano.

TABELLA 10

ESEMPIO APPLICATIVO DI TTW AI TRENI PER UNO STESSO MATERIALE CHE PERCORRE DUE DIVERSI ITINERARI [9]

Tratta	Interregionale	Urbano
Lunghezza (km); numero di fermate	80; 1	9; 3
Velocità massima; velocità media (km/h)	130; 100	90; 65
TTW per moto stazionario (kJ/(t-km))	52.5	33.6
TTW per accelerazione (kJ/(t-km))	16.3	139
TTW (kJ/(t-km))	68.8	173
Quota dell'energia di accelerazione (%)	24	81

Il TTW proposto, calcolato con la (8), è certamente da ritenersi ideale, in quanto non sono stati considerati gli eventuali rallentamenti, imputabili alle condizioni del traffico o a lavori di manutenzione, che possono condizionare il regolare svolgimento del servizio ferroviario.

### 6.1. Caso studio: da Torino a Milano con diversi modi di trasporto

Per valutare gli effetti delle diverse prestazioni energetiche tra auto privata e treno è utile eseguire un caso stu-

dio, ad esempio prendendo in esame la connessione tra Torino e Milano. Le due città sono infatti collegate da un'autostrada, da una linea ferroviaria tradizionale e da una linea ad alta velocità ferroviaria. L'obiettivo è calcolare il consumo energetico assoluto di auto, pullman, treno intercity, interregionale ed ETR 500, supponendo di dover trasportare, con i reali fattori di utilizzazione, 1000 persone in una data fascia oraria.

La distinzione tra auto e pullman è utile per confrontare il trasporto stradale privato con quello pubblico, così come quella tra intercity ed interregionale evidenzia l'effetto del diverso numero di fermate su uno stesso percorso. Il calcolo del TTW dei treni (in MJ/(t-km)) è stato condotto mediante la formula empirica (8), anche se non si dispone delle opportune costanti per i treni italiani, che verranno pertanto assimilati a convogli stranieri. Si è ritenuto, infatti, più opportuno accettare questa rilevante imprecisione di fondo piuttosto che determinare le costanti per i treni italiani, dato che, non disponendo pubblicamente di precise valutazioni sui coefficienti utili a determinarle, non si sarebbe ottenuto un livello accettabile di precisione.

TABELLA 11

DATI SULLA TORINO-MILANO PER I TIPI DI TRENI CONSIDERATI NEL CASO STUDIO

Treno	Simbolo	Lunghezza tratta [km]	$V_{max}$ [km/h]	$V_{med}$ [km/h]	Fermate intermedie
Intercity	IC	153	160	95.625	3
Interregionale	IR	153	160	88.954	7
ETR 500	ETR	125	250*	150*	0

(\*) Dal sito [www.tav.it](http://www.tav.it)

Con la tabella 11 vengono forniti i dati, desunti dall'orario di *TRENITALIA*, relativi a ciascun treno esaminato e alla tratta in questione.

Desiderando calcolare il WTW\* secondo la (2), è necessario conoscere la massa e il peso per posto di ciascun treno (tabella 12). Si è ipotizzato pertanto che l'intercity sia trainato da un locomotore E402B e che non abbia carrozze semipilota, che l'interregionale sia trainato da un locomotore E464 con carrozza semipilota UIC X, mentre la composizione dell'ETR 500 è quella che *TRENITALIA* dichiara fissa, con 1 carrozza "business" (con 33 posti), 3 carrozze di prima classe, 7 di seconda ed una ristorante. L'intercity si ipotizza composto da 3 carrozze di prima classe e 9 di seconda, mentre l'interregionale da 1 di prima e 8 (7 più la semipilota) di seconda, seppure sia oggi di regola composto di sole carrozze di seconda classe.

Come già accennato, i treni italiani sono stati comparati a materiali di altre Amministrazioni; più precisamente:

- l'intercity italiano con l'APT (*Advanced Passenger Train*) inglese, perché entrambi sono omologati per

TABELLA 12

DATI SULLE MASSE DEI TRENI PRESI IN ESAME PER IL CASO STUDIO

Treno	Tipo carrozze	Massa carrozze [t]	Posti 1°cl/2°cl	Numero carrozze	Massa loco [t]	Massa a vuoto [t]	Posti totali	t/posto effettive
IC	UIC Z1	42.6	54/66	12	89	600.2	756	0.794
IR	UIC X	48*	58/80	9	72	504	618	0.816
ETR	-	42.2	54/68	12	268	642	671	0.957

(\*) Il peso di queste carrozze può variare da 40 a 48 t.

una velocità massima di 200 km/h, sono relativamente moderni (anni '90) e sono destinati a viaggi nazionali lunghi; d'altro canto, l'APT è dotato del sistema di pendolamento e ha la motrice più aerodinamica rispetto all'E402B usato in Italia;

- l'interregionale italiano, essendo perlopiù composto da materiale non propriamente recente (anni '80) può essere ragionevolmente assimilato ai citati treni inglesi di cui si dispone delle costanti  $B_0$ ,  $B_1$  e  $B_2$ ;
- l'ETR 500 (fig. 1) è paragonabile all'ICE tedesco, essendo entrambi treni ad alta velocità.

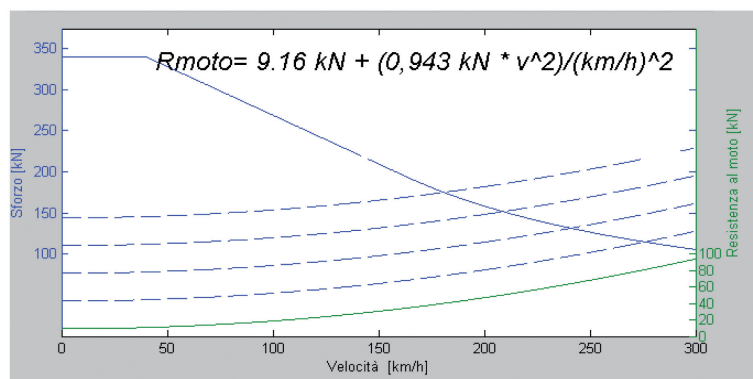


Fig. 1 - Sforzo di trazione e resistenze al moto dell'ETR 500, secondo prove svolte da TRENITALIA.

La maggiore differenza riscontrabile tra gli accostamenti eseguiti consiste nella massa dei rotabili: la singola carrozza dell'IC italiano è più pesante di quella dell'APT inglese (42.6 t contro 24), mentre l'ETR è più leggero dell'ICE (642 t contro 853); tuttavia, considerando che la massa è normalizzata nel calcolo del TTW, è ragionevole supporre che questa non sia una limitazione particolarmente importante.

Avendo a disposizione le costanti (tabella 9) ed il fattore di occupazione medio[14] è possibile calcolare il consumo energetico specifico dei tre convogli (tabella 13). Dal momento che dalla fonte [14] non si rilevano i fattori di oc-

cupazione, ma solo un'indicazione (>50%), si è deciso di essere conservativi e di limitare l'occupazione di IC ed IR al 50%. Per quanto riguarda i WTT, non disponendo in Italia di energia nucleare di produzione interna, quest'ultima opzione è stata scartata dall'analisi.

I treni italiani, sulla Torino-Milano, sono molto competitivi con quelli stranieri, sia in termini di TTW che di  $WTW_{PC}$ . Tuttavia, bisogna considerare che i treni tradizionali, avendo velocità inferiori ai treni esaminati in precedenza, consumano inevitabilmente una quota minore di energia nell'unità di spazio. Come già evidenziato, il numero di fermate intermedie gioca un ruolo determinante nel TTW (si veda il più lento IR) mentre l'ETR 500, che non dovrebbe fermare in nessun punto della tratta esaminata, presenta un consumo decisamente minore degli altri treni veloci. Supponendo invece che l'ETR, spinto fino a 300 km/h, vada da Torino a Firenze (passando per Milano e Bologna), e si fermi in tre stazioni intermedie, il consumo specifico cresce a 99.55 kJ/(t·km), dato in linea con i treni tedeschi e peggiore di quello dell'Intercity.

Conclusa la determinazione dei  $WTW$  dei treni, e ricordando che per le auto private valgono i risultati forniti con la tabella 7, è possibile discutere l'opzione del trasporto pubblico stradale. Tra i più comuni mezzi pubblici extraurbani (pullman a 2 e 3 assi), essendo i primi perlopiù destinati a spostamenti di carattere metropolitano, si è deciso di considerare nell'analisi solo i secondi; per completezza di informazione vengono comunque forniti entrambi i TTW (tabella 14). L'occupazione media degli autobus urbani, determinata come quella delle auto e ritenuta sufficientemente adatta per rappresentare anche l'occupazione media dei pullman, risulta di 13.83 persone/mezzo [13], valore non necessariamente sempre valido, ma comunque conservativo. Si specifica che solo il  $WTW_{PC}$  tiene in considerazione, come è stato assunto per auto e treni, la massa aggiuntiva delle persone che viaggiano sul mezzo in questione, mentre il  $WTW^*$ , a causa del basso fattore di occupazione, non considera il peso dei passeggeri.

I treni, con le riscontrate situazioni di carico, appaiono come l'opzione migliore; i pullman, qui penalizzati dal basso fattore di occupazione utilizzato, si rivelano in gra-

TABELLA 13

TTW, WTW\* E WTW<sub>PC</sub> PER I TRENI ITALIANI CONSIDERATI

Treno	Fonte primaria	Fattore occup.	TTW [kJ/(t·km)]	TTW* [MJ/(p·km)]	TTW <sub>PC</sub> [MJ/(p·km)]	WTW* [MJ/(p·km)]	WTW <sub>PC</sub> [MJ/(p·km)]
IC	Mix europeo	> 50%	70.49	0.118	0.062	0.336	0.176
	Mix eur. carbon.					0.304	0.159
	Energia eolica					0.005	0.002
IR	Mix europeo	> 50%	109.4	0.187	0.098	0.476	0.280
	Mix eur. carbon.					0.431	0.254
	Energia eolica					0.007	0.004
ETR 500	Mix europeo	54.8%	74.35	0.136	0.077	0.388	0.220
	Mix eur. carbon.					0.352	0.200
	Energia eolica					0.005	0.003

do, se adeguatamente sfruttati, di garantire prestazioni paragonabili alla ferrovia.

Sapendo che nel 2002 il mercato italiano dell'auto era composto per il 76.4% da auto a benzina e per la restante parte da auto a gasolio [16], seppure questo valore sia stato alquanto ridotto dalle immatricolazioni fino al 2008, ha senso calcolare il consumo energetico assoluto considerando solo tali modelli. Per completezza d'informazione, si è fatto riferimento sia al WTW delle auto del 2002 che a quelle ipotizzate per il 2010. Per quanto riguarda i treni, ha senso considerare la sola opzione del mix europeo, il cui WTT è paragonabile con quello italiano.

In definitiva, per trasportare 1000 persone con l'auto, dato il fattore di occupazione medio di 1.52 persone/mezzo, sono necessari 658 veicoli, di cui, in virtù delle percentuali di mercato, se ne ipotizzano 503 a benzina e 155 a gasolio; volendo effettuare tutti gli spostamenti con dei pullman, dato il fattore di occupazione di 13.83 persone/mezzo, ne servirebbero 73, mentre, supponendo di impiegare un solo tipo di treno per volta, servirebbero 3 Intercity, 4 interregionali e 3 ETR. Dal momento che il numero di mezzi necessari a trasportare le 1000 persone è stato determinato arrotondando per eccesso, va specificato che il reale fattore di occupazione medio dichiarato, soprattutto per i treni, non è rispettato nell'analisi. Tuttavia, dato che tale fattore è calcolato su base giornaliera e non su una determinata fascia oraria come quella considerata, questa imprecisione è ritenuta accettabile.

Per il calcolo della spesa energetica assoluta di ciascun modo (fig. 2) è necessario moltiplicare il WTW\* per i passeggeri trasportati e per i chilometri percorsi da ciascun mezzo. Si ricorda che la distanza stradale tra i due capoluoghi, ipotizzando di partire dall'area urbana di Torino e di voler arrivare nell'area urbana di Milano, è valutabile in 120.9 km.

Il mezzo energeticamente più efficiente per percorrere la Torino-Milano è risultato l'ETR 500: il dato in termini assoluti modifica la classifica dei TTW, in cui l'Intercity si era rivelato il treno più efficiente. Questa affermazione permane vera, dato che l'ETR è privilegiato dal fatto di percorrere una linea di 28 chilometri più breve. Il treno interregionale, a causa del numero più elevato di fermate intermedie e della scarsa tecnologia del materiale (materiale meno efficiente) risulta meno efficiente del trasporto pubblico stradale, il cui consumo è risultato comunque paragonabile a quello dei treni. Di tutt'altra entità, invece, il consumo dell'automobile che, nonostante 32 km in meno della lunghezza della ferrovia tradizionale, consuma circa 3.3 volte più dell'Intercity.

Alla luce di questi risultati - nei quali si sono comunque messe in evidenza alcune ipotesi e assunzioni che possono costituire un limite alla valutazione, ma che possono eventualmente essere ridiscusse - sembra possibile esprimere che la TAV non sia, a patto di essere *realmente sfruttata* al meglio e di rispondere ad una *effettiva domanda*, un'opzione scarsa dal punto di vista energetico, anche se, nel momento in cui si considerano i costi e le spese energetiche per la sua realizzazione, potrebbe perdere una parte o gran

TABELLA 14

DATI GENERALI E TTW MEDI PER ALCUNI PULLMAN [15]

Mezzo	Massa [t](*)	Posti	TTW [MJ/km] <sup>†</sup>	TTW* [MJ/(p·km)]	TTW <sub>PC</sub> [MJ/(p·km)]	WTW* [MJ/(p·km)]	WTW <sub>PC</sub> [MJ/(p·km)]
Pullman a 2 assi	17.67	50+26	10.615	0.583	0.188	0.677	0.218
Pullman a 3 assi	20.91	60	10.692	0.464	0.219	0.538	0.254

(\*) Media di pesi e consumi di alcuni modelli entrati sul mercato nel corso del 2006 [15].

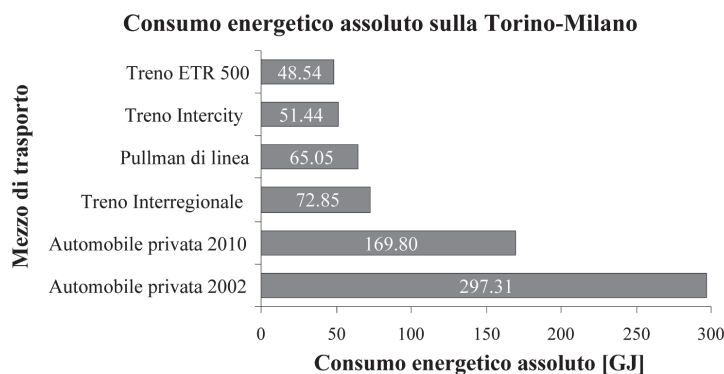


Fig. 2 - Consumo energetico assoluto sulla Torino-Milano per i modi di trasporto considerati.

parte del suo vantaggio, ma tale aspetto non è oggetto di questo articolo. Sono poi da sottolineare due aspetti: la scelta di non eseguire fermate intermedie, ad esempio a Novara, ed il fatto che bisognerà verificare la reale domanda di traffico tra i due capoluoghi per poter fornire una risposta definitiva e completa sulla reale convenienza di quest'opzione di trasporto. Non è da dimenticare, inoltre, che avendo ottimizzato la distanza tra le due città il consumo assoluto è stato, a sua volta, minimizzato.

Detto che le opzioni innovative per l'autotrasporto presentano problematiche tali da non far propendere il WTW a favore dell'auto e che il raggiungimento di una maggiore efficienza dei treni è un obiettivo dichiarato delle amministrazioni ferroviarie, la politica dei trasporti deve in qualche modo *entrare nel contesto energetico*. La soluzione un po' utopistica sarebbe ancora lo sfruttamento delle energie rinnovabili, scoperte o meno che siano, ad esempio l'eolico, che dovrebbe avere il miglior rendimento nella generazione di potenza elettrica. Più realisticamente, almeno nel breve-medio termine, volendo adeguarsi agli obiettivi comunitari (riduzione del consumo energetico dell'intero settore del 20% entro il 2020), oltre alla ricerca di mezzi più efficienti, è importante che il trasporto ferroviario venga il più possibile razionalizzato nei propri consumi. Il problema energetico, per quanto riguarda la ferrovia, è quindi un problema più che altro organizzativo, complicato dal fatto che un sistema di trasporto pubblico, ad *uso condiviso*, deve anche essere economicamente e facilmente accessibile ai più: è stato dimostrato (tabelle 10 e 13) che il numero di fermate intermedie innalza notevolmente il consumo specifico dei treni e, quindi, pur nel rispetto delle esigenze delle piccole comunità, per ridurre i consumi energetici dovrebbero essere effettuate solo le fermate necessarie.

Passando agli interregionali e osservando l'orario di *TRENITALIA*, si nota che quasi tutti i 19 treni che percorrono in una giornata la tratta si fermano nelle stesse 7 sta-

zioni intermedie e partono ogni ora, eccetto le 9:50, dalle 4:50 alle 22:50 oltre ad un treno che parte alle 7:31. Questo orario, definito cadenzato, è nella fattispecie il migliore possibile? Si potrebbe evitare qualche sosta intermedia, o sarebbe meglio alternarle con le altre 17 stazioni presenti sulla linea? Sono state eseguite delle indagini per verificare la presenza di una domanda di trasporto tale per cui valga la pena mantenere questo orario o per determinare l'eventuale presenza di una domanda soppressa nelle altre località? La risposta a questi interrogativi è in grado di determinare definitivamente se l'attuale uso energetico della ferrovia è il migliore possibile. Inoltre,

tale risposta consentirebbe di individuare le misure correttive per migliorarlo (se non c'è domanda) o per aumentare l'offerta della rotaia al fine di togliere quote di mercato alle autostrade: in questo modo, nonostante l'aumento del consumo della ferrovia, potrebbe ragionevolmente diminuire il consumo totale del settore dei trasporti.

Inoltre, dato che la maggior parte dei consumi della ferrovia è rappresentata dall'elettricità (70% in Europa), il rendimento del settore ferroviario è più che altro funzione del rendimento con cui si produce la potenza elettrica; al contrario, l'influenza dell'efficienza ferroviaria su quella elettrica è molto limitata, data la minima quota parte di elettricità consumata dai treni.

Infine, l'efficienza energetica del treno è ulteriormente migliorabile con interventi tecnologici, quali il *recupero dell'energia durante le fasi di frenatura* e lo sviluppo di *nuovi motori*, sia diesel che elettrici. Interventi sul materiale rotabile sono possibili, ma considerato il lungo ciclo di vita medio, la loro applicazione è meno immediata nel tempo [2].

## 7. Conclusioni

Analizzate sommariamente la questione energetica e la struttura economico-energetica del settore dei trasporti si comprende la necessità di intervenire, sia politicamente che fisicamente, su un sistema che a livello mondiale è incentrato sullo sfruttamento intenso dei mezzi più energivori.

In queste note non è stata considerata l'ipotesi, comunque non da scartare a priori, di possibili rilevanti scoperte scientifiche o tecnologiche (*breakthrough*) su fonti di energia illimitata o abbondante, non inquinante e facilmente fruibile. Tale ipotesi permetterebbe di affermare che il problema energetico - di conseguenza anche quello ambientale - sarebbe risolto e non condizionerebbe il

mantenimento o lo sviluppo dell'attività di trasporto. Tuttavia, se così non fosse, lo sviluppo della ferrovia è auspicabile: è stato dimostrato, infatti, che il treno presenta un ottimo WTW, verosimilmente migliorabile in futuro con gli opportuni sviluppi tecnologici, e che è in grado di contrastare l'aumento dei consumi dell'intero settore dei trasporti e, quindi, di garantirne la sostenibilità. D'altro canto, va sottolineato che l'analisi WTW proposta, a causa della mancanza di esperienza in questo campo e dell'assenza di una sorta di ciclo standard su cui valutare i consumi, è da intendersi come indicativa, perché il numero ed il peso delle ipotesi sono molto significativi. È stato dimostrato che la massa e la velocità dei convogli ne influenzano il consumo specifico, ma i loro effetti sono spesso mascherati dal numero di fermate. Infatti, più del consumo stazionario, che si ha in condizioni di velocità di marcia, è il consumo in fase di accelerazione a caratterizzare le prestazioni energetiche dei convogli.

Mentre per l'autotrasporto il problema energetico è soprattutto tecnologico e ben insito nella sfera dei trasporti (la ricerca deve puntare a migliorare i rendimenti per la produzione di carburanti alternativi e quelli dei motori), si ritiene che il problema del consumo energetico della ferrovia sia soprattutto di carattere organizzativo. Qualora le ferrovie volessero o dovessero realmente diminuire i loro consumi, la soluzione migliore sarebbe quella di ottimizzare le velocità medie di percorrenza, le fermate intermedie ed i tracciati allorquando possibile. Nel caso studio della Torino-Milano, in cui sono stati stimati i consumi di auto, treni e pullman, infatti, il consumo minore in termini assoluti è dell'ETR 500 AV che, nonostante un consumo specifico maggiore, in virtù della più alta velocità massima, presenta un consumo assoluto minore, grazie ad una linea di 28 km più breve di quella storica e all'assenza di fermate intermedie. Il problema energetico, inoltre, assume per la ferrovia anche un carattere tecnologico: oltre ad interventi sul peso, sulla forma dei rotabili, sui motori di trazione e sul possibile recupero, per risparmiare energia si dovrebbe soprattutto migliorare il rendimento di produzione dell'elettricità; però in questo caso il problema energetico, più che riguardare il sistema dei trasporti, è da contestualizzare trasversalmente ai settori dell'economia.

Infine, tutte le valutazioni sono state fatte ponendo attenzione al solo aspetto energetico; altri aspetti ugualmente significativi, come l'evoluzione dei costi delle fonti primarie, la loro disponibilità e collocazione futura, gli aspetti geopolitici, l'evoluzione delle tecnologie, ecc., non sono stati trattati ma si è consapevoli che potrebbero influire notevolmente sui risultati ottenuti.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] EIA – *Energy Information Administration*, International Energy Outlook, June 2006.
- [2] Commissione Europea, *The annual energy and transport review for 2004*, December 2005.
- [3] Commissione Europea, *Energy and Transport in Figures 2005*, 2005.
- [4] IEA – International Energy Agency, *World Energy Outlook 2004*, October 2004.
- [5] Commissione Europea, *European Energy and Transport: scenarios on energy efficiency and renewables*, 2006.
- [6] Commissione Europea, *European Energy and Transport: scenarios on high oil and gas prices*, 2006.
- [7] Commissione Europea, *Well-to-Wheel analysis of future fuels and powertrains in the European context: WELL-to-WHEEL REPORT*, Version 1b, January 2004.
- [8] Commissione Europea, *Well-to-Wheel analysis of future fuels and powertrains in the European context: WELL-to-TANK REPORT*, Version 1, December 2003.
- [9] M.W. JØRGENSEN, S.C. SORENSON, *Estimating Emissions from Railway Traffic*, Report for the Project MEET – Methodologies for Estimating air pollutant Emission from Transport, July 1997.
- [10] L. CECCHI, M. CARNEVALI, *Misura dell'energia elettrica a bordo dei mezzi di trazione ferroviari – L'esperienza italiana*, La Tecnica Professionale, (2005), 9, 17-21.
- [11] D. STEAD, *Relationships between transport emissions and travel patterns in Britain*, Transport Policy, (1999), 6, 247-258.
- [12] Commissione Europea, *"COST 318 – Interactions between High-Speed Rail and Air Passenger Transport"*, 1998.
- [13] The Worldwatch Institute, *State of the World 2007, our urban future*, 2007.
- [14] TRENITALIA, *Rapporto Ambientale 2005*, 2005.
- [15] Autobus, *Vado e Torno Edizioni*, aprile 2006, 4, 20-35.
- [16] H. STRELOW, *Statistic in focus: Passenger Transport in the European Union*, September 2006.